**Relativité Générale :**

**Une centenaire qui se porte bien!**

**Diapo 1 Bonsoir…**

«**Ce n’est pas ce que vous ne savez pas qui vous crée des ennuis, c’est ce que vous croyez certain et qui ne l’est pas…**» Cette phrase de Mark Twain décrit à peu près ce qui est arrivé au monde de la physique en **1905**, quand **Albert Einstein**, un jeune chercheur passionné de physique sans poste universitaire, employé au Bureau des Brevets de Berne, a bouleversé notre conception de l’**espace**, du **temps**, de la **lumière** et de l’**univers**, une conception héritée de vingt-cinq siècles de questions et de controverses.

Pendant cette année miraculeuse, en quatre articles, il a contribué à des progrès décisifs en physique. À chacun des problèmes, Einstein donne une solution qui ouvre des perspectives nouvelles pour la physique de son époque.

Le premier de ces articles concerne **l’existence effective des atomes** restés jusque-là une hypothèse.

Le deuxième article porte sur le rayonnement électromagnétique, dont il montre qu’il se présente sous forme de grains d’énergie discontinus, donnant ainsi l’un des premiers aperçus de la physique quantique. C’est pour la découverte du **photon** et l’explication de **l’effet photo-électrique** qu’il obtiendra le prix Nobel en 1921.

Le troisième propose une reformulation du problème de l’«électrodynamique des corps en mouvement» et constitue ce qui a été appelé par la suite la **théorie de la relativité restreinte**.

Mais c’est une autre théorie, publiée dix ans plus tard (1915), celle de la **Relativité Générale** qui a été le grand ’œuvre de sa vie et lui a assuré une célébrité mondiale, pour avoir dépassé et renouvelé la théorie de la gravitation universelle de Newton.

**Diapo 2 100 ans plus tard**

Le **14 septembre 2015**, les deux interféromètres américains LIGO, construits aux USA pour détecter des **ondes de gravitation** ont reçu un signal.

La relativité générale d’Einstein a permis d’identifier ce signal comme la **fusion de deux trous noirs**, tournant l’un autour de l’autre à plus d’un milliard d’années-lumière. On en reparlera…

Cette détection et celles qui ont suivi ont confirmé avec une grande précision une des prévisions non encore vérifiée directement de la relativité générale: l**’existence des ondes de gravitation**!

L’article qui confirme la découverte sera publié cinq mois plus tard, signé par plus de 100 chercheurs, parmi le **millier** d’entre eux**,** appartenant à des institutions scientifiques de **13 pays** qui sont impliqués dans l’entente LIGO-VIRGO.

Quel contraste avec l’homme qui a conçu presque seul la théorie originelle!

**Diapo 3** Lire diapo

Pendant que l’onde continue son voyage vers les confins de l’univers, je vais vous décrire le voyage que nous allons faire ce soir à la poursuite du rêve d’Einstein: essayer de comprendre la **gravité** ou la **pesanteur**, dont nous ressentons en permanence les effets dans notre corps et autour nous, de façon bien plus directe que la plupart des autres phénomènes physiques…

**Diapo 4** Lire diapo

Pour nous, héritiers des philosophes grecs, cette quête a débuté il y a plus de **2500 ans**. Les G**recs**, dans le cosmos, distinguaient les **Cieux** et la **Terre**.

Les choses lourdes (faites de terre et d’eau) se dirigent «vers le bas du monde», les choses légères (l’air et le feu) sont attirées vers les Cieux (qui sont faits d’une substance parfaite, la **quintessence** et où les astres se déplacent **sans cause** suivant des **lois mathématiques pures**.)

Ceux qui se risquent à prétendre que corps célestes et terrestres obéissent aux mêmes lois risquent l’accusation d’impiété.

Plutarque raconte : «Cléante pensait que les Grecs devaient mettre Aristarque de Samos en accusation pour avoir troublé l’ordre de l’univers en supposant que le soleil est immobile et que la terre tourne autour de lui».

**Galilée** reprendra dans une formule célèbre cette idée des lois mathématiques qui gouvernent les cieux, mais il étend ce principe à tout le cosmos, c’est à dire les cieux et la terre:

«La philosophie est écrite dans cet immense livre de l'Univers, mais on ne peut le comprendre si, d'abord, on ne s'exerce pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. II est écrit dans le langage des mathématiques, sans lesquelles il est impossible d'en saisir le moindre mot. Sans ces moyens, on risque de s'égarer dans un labyrinthe obscur.»

**Diapo 5**

Galilée a commencé à étudier la chute des corps en 1597, à l’âge de 33 ans.

La **légende** raconte qu’il jetait des objets plus ou moins lourds du haut de la tour de Pise afin de comparer leurs mouvements. En réalité, il a eu l’idée de jeter des objets du haut d’une église de Padoue mais, il avait beaucoup de mal à mesurer ou se trouve le corps à un moment précis. Et pour limiter les vitesses, il fera ses expériences sur un plan incliné. Malgré les imprécisions, il a une intuition: c’est la résistance de l’air et donc la forme des objets qui influent sur leur vitesse de chute plutôt que leur masse. Il fait tomber deux boules de poids et de tailles différents (en plomb et en liège). Il en déduit que **la chute des corps ne dépend pas de leur masse**.

Galilée se rend compte aussi qu’**aucune** **expérience de mécanique ne permet de distinguer des référentiels qui se déplacent à vitesse constante l’un par rapport à l’autre**.

En fait, dans le "Banquet de Cendres" (1584), Giordano Bruno avait déjà décrit une **expérience de pensée**: Sur la rive d'un fleuve, un passant lance un caillou vers un bateau entraîné par le courant.

Ce mouvement unique du caillou, Giordano Bruno l’interprète de deux façons, vu de la rive et vu du bateau. Deux mouvements apparemment différents mais qui sont tous les deux naturels.

Rien ne permet au navigateur, en observant le mouvement du caillou, d'en déduire que son bateau est en mouvement.

Sa conclusion est que l'expérience ne nous permet pas de savoir si la Terre est immobile ou en mouvement dans l'espace, contrairement à l'opinion d’Aristote.

Pour lui, notre Terre est un vaisseau dans lequel nous sommes embarqués autour du Soleil, comme l'a suggéré Copernic.

Et le Soleil lui-même doit se mouvoir, étoile parmi les étoiles.

Galilée reprend l’argument du bateau de G Bruno en 1632 (Dialogue sur les principaux systèmes du Monde) mais sans citer sa source. Sage précaution, Bruno a été brûlé vif à Rome sur le ‘Campo de Fiori’ au printemps 1600.

L’expérience réelle est réalisée en 1640 par Pierre Gassendi, un philosophe provençal, sur une galère qui vogue «avec toute la vitesse possibles» sur les eaux du port de Marseille.

Une seule expérience de pensée, la trajectoire d’un caillou, a suffi à Giordano Bruno pour concevoir ce qu’on appellera plus tard la **relativité galiléenne**.

Le mouvement concerne non seulement les objets sur Terre, mais aussi la Terre, le Soleil, les étoiles.

Coup de tonnerre quand paraissent les «**Nouvelles du Ciel» de Galilée** en 1610. Ayant fait fabriquer une lunette astronomique, il a vu:

- des **taches sur le Soleil** qui est donc **imparfait** comme la Terre,

- **quatre petits astres qui accompagnent Jupiter**, comme la Lune nous accompagne,

- un **croissant de Vénus**, semblable à un croissant de Lune,

- des **montagnes sur la Lune**, comme sur la Terre.

Les Cieux sont régis par les mêmes lois que la Terre…

Et Galilée va enfoncer le clou.

**Diapo 6**

Galilée: «**La physique d’Aristote est contradictoire**»
C’est dans la nature des corps lourds de tomber et des corps légers de s’élever, disait Aristote.

Galilée imagine de **lier ensemble un corps léger et un corps lourd** et obtient une contradiction.

Attachés ensemble, le corps léger ralentit le corps lourd : l’ensemble doit tomber **moins vite** que le corps lourd.

Attachés ensemble, ils forment un corps plus lourd : ce nouveau corps doit tomber **plus vite** que le corps lourd.

Mais ne critiquons pas les grecs avec nos connaissances d’aujourd’hui, parce qu’ils ont inventé l’outil même qui a permis à Galilée de critiquer la physique d’Aristote et à ses successeurs de progresser: la **démonstration par le raisonnement logique**…

C’est en utilisant le raisonnement qu’Einstein parviendra lui aussi à reconstruire la physique de son époque.

**Diapo 7**

C’est **Newton** qui va bâtir le pont entre la terre et les cieux, en dévoilant les lois du mouvement des corps.

En 1666, à 24 ans, fuyant la peste qui sévit à Cambridge, il a l’idée que **la gravité qui cause la chute des corps sur terre régit aussi la course des astres dans le ciel**!

La gravité devient **gravitation universelle**!

Il mettra 20 ans à traduire cette idée en langage mathématique (1687).

Sa première loi dit que la **force est proportionnelle à l’accélération**.

Sa deuxième donne l’expression de la **force de gravitation entre deux corps de masses M et m**.

Il retrouve à partir de ces équations la loi de l’inertie galiléenne et les lois empiriques de Kepler sur le mouvement des planètes.

Isaac Newton postule un **espace et un temps absolus, valables partout**.

Puisque le temps est absolu, la **simultanéité est valable pour tous les observateurs**.

Il admet que la force subie à un certain instant par la particule dépend des positions des autres particules au même instant ce qui suppose que **la vitesse de propagation de la gravitation est infinie**.

Mais contrairement à ce qu’on entend parfois, Newton lui-même **ne croyait pas à l’action instantanée à distance**. Il écrivait à un collègue:

«Qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose, est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner, puisse jamais se rendre coupable.»

Newton remarque aussi que **la masse m rouge de la formule qui mesure la résistance au mouvement est égale à la masse m bleue qui détermine l’attraction universelle**.

Il accepte le fait. Il ne propose pas d’explication, comme d’ailleurs il ne donne pas la cause de la gravitation elle-même:

«J'ai voulu expliquer les phénomènes célestes et ceux des marées par la force de la gravitation, mais je n'ai donné nulle part à connaître la **cause de la gravitation**. Cela tient à ce que je n'ai pas encore pu déduire des phénomènes la raison des propriétés de la gravité et que je ne feins aucune hypothèse, car **tout ce qui ne se déduit pas des phénomènes est une hypothèse** et les hypothèses, qu'elles soient métaphysiques, physiques, mécaniques ou occultes, ne sont pas permises en philosophie expérimentale.»

La théorie de Newton, développée par **Hamilton, Lagrange, Laplace** et d’autres pendant les deux siècles suivants, permettra de prévoir les mouvements des corps célestes et terrestres avec une précision étonnante.

Preuve de son succès, la “**précision d’horloge**” de la théorie de Newton sera utilisée par les philosophes de tous les bords, athées comme déistes, à l’appui de leurs thèses opposées…

Il restera bien un **petit écart non expliqué dans l’orbite de Mercure** (43 secondes d’arc par siècle) Une erreur de 43 secondes par siècle, ce n’est pas beaucoup (1 sur 3 millions) et on a déjà réussi à expliquer **90% de l’écart** observée **par des interactions avec les planètes connues.** Il suffirait de découvrir une planète nouvelle pour régler la question!

**Diapo 8** Lire diapo

Mais à la fin XIXème siècle, la physique évolue à pas de géant!

L’étude de l’électricité et du magnétisme se développe rapidement avec **Gauss**, **Faraday et Ampère**, à côté des disciplines traditionnelles (Mécanique et Optique).

Maxwell découvre une incohérence dans les formules de Faraday et propose les équations correctes décrivant le champ électromagnétique. Il réussit du même coup à **unifier l’électricité, le magnétisme et l’optique**. Il faudra 20 ans pour qu’Hertz vérifie expérimentalement que la théorie de Maxwell est aussi exacte qu’elle est élégante!

Sa théorie résout par la négative, dans le cas de l'électromagnétisme, le problème des **actions instantanées** qui troublait tant Newton.

Il faut un certain temps pour qu'un champ électromagnétique se propage de l'endroit où il est créé jusqu’à celui où il est ressenti. De plus, sa théorie, qui décrit la **lumière** comme une onde électromagnétique, lui attribue une **vitesse constante dans le vide**.

On s’aperçoit alors que les lois de Maxwell n’obéissent pas aux formules de la **relativité galiléenne,** en particulier celle de l’addition des vitesses.

Nous voilà en présence de **deux espaces physiques de référence** concurrents, l’espace des équations de **Maxwell** et l’espace absolu des équations de **Newton**!

Deux camps s’affrontent, ceux qui s’appuient sur la précision des lois de la gravitation, qui ont permis à Le Verrier de trouver Uranus à l’endroit calculé, et ceux qui s’appuient sur les succès de la théorie de Maxwell qui a donné naissance à l’électrotechnique dont les applications se développent rapidement.

Pour les tenants de l’électromagnétisme, l'équivalent de l’«espace absolu» de la mécanique est l'**éther** qui supporte la lumière. Ce concept repose sur l‘idée commune à l’époque, que des **ondes ont besoin d’un milieu** pour se propager: le son a besoin de l'air, la lumière a besoin de l’**éther**, que l’on se représente comme un milieu impalpable présent dans tout l’espace.

Comme il n’y a aucune raison pour que cet éther soit lié à la Terre, il devient possible de déterminer le mouvement de la Terre par rapport à l'éther en mesurant la vitesse de la lumière que nous envoient les astres de différentes directions. L'éther définirait ainsi un référentiel remarquable capable de détecter le **mouvement absolu** de la Terre dans l’espace.

Cependant tous les essais de déterminer la vitesse relative de la Terre par rapport à l’éther échouent: La vitesse de la lumière est constante dans toutes les directions, malgré les mouvements de la terre. (**Michelson et Morley**)

Ce résultat conduit **Henrik Lorentz** à partir de 1892 à développer une «électrodynamique» compatible avec un éther absolu et une vitesse constante de la lumière. Dans sa théorie, il est impossible de détecter la vitesse par rapport à l’éther, parce que les corps en mouvement dans l’éther raccourcissent (**contraction des longueurs**), tandis que les processus qui y prennent place ralentissent (**dilatation du temps**).

La transformation de Galilée, valable pour les corps massifs, est remplacée par les transformations de Lorentz, valable pour les **corps chargés électriquement** en mouvement.

Henri **Poincaré** remarque alors qu’à l’intérieur de cette «nouvelle physique», **aucun observateur ne peut dépasser la vitesse de la lumière**. En 1905, il réussit à formaliser mathématiquement la transformation de Lorentz et énonce un principe de relativité, mais sans remettre en cause **l’existence de l’éther** et en distinguant entre longueurs et temps «**vrais**» et «**apparents**» (c'est-à-dire dans le référentiel de l'éther et dans celui du corps mobile).

**Diapo 9**

Un chercheur, qui se pose depuis 16 ans des questions étranges et lit avec passion avec ses amis tout ce qu’il peut trouver sur les nouveautés de la physique, va proposer une **solution radicale**.

**Question ?**

Est-il possible, en courant assez vite tout en tenant un miroir devant soi, que le miroir puisse se dérober devant la lumière de sorte que celle-ci ne puisse pas l'atteindre?

- Si la lumière réémise par mon visage rattrape le miroir quand je cours à la vitesse de la lumière, je suis en contradiction avec l‘électromagnétisme de **Maxwell** qui dit que la vitesse d’une onde ne dépend pas de la vitesse de la source.

- Si la lumière ne rattrape pas le miroir quand je cours à la vitesse de la lumière, mon image disparaît du miroir comme celle d’un vampire et je peux en déduire que je me déplace à la vitesse de la lumière, en contradiction avec le principe de l’impossibilité de détecter un mouvement uniforme (**Galilée et Newton**).

**Diapo 10**

Alors Einstein reconstruit la physique en **inversant les hypothèses de Newton**!

**C’est la vitesse de la lumière qui est absolue! L’espace et le temps sont relatifs!**

Son deuxième postulat est que les **formules de Lorentz**, déduites de la théorie de Maxwell, s’appliquent **à tous les corps**, pas seulement à ceux qui sont chargés d’électricité. Einstein unifie la mécanique et l’électromagnétisme, pour arriver à une formulation identique de **toute la physique connue à son époque** pour tous les observateurs en mouvement uniforme**.**

Plus tôt dans la même année 1905, il a expliqué l’effet photo électrique en décrivant la lumière, à l’échelle atomique, sous forme de **grains de lumière.**

Les photons n’ont pas besoin d’éther! **L’éther n’existe pas!**

Ila aussi compris que le «**réel**» et l’«**apparent**» de **Poincaré** correspondent à **deux points de vue d’observateurs différents** mais qu’elles sont aussi **valides** l’une que l’autre. Aucun n’a raison ou tort lorsqu’il mesure différemment des longueurs ou des durées. Mais tous les observateurs mesurent la **même vitesse de la lumière, qui est la seule quantité invariante**.

Je cite Einstein, répondant à des objections nombreuses faites à son époque:

«La question de savoir si la contraction des longueurs prévue par Lorentz existe ou n’existe pas est mal posée.

Elle n’est pas réelle dans le sens où elle n’existe pas pour un observateur qui se déplace avec la règle…

Elle est réelle dans le sens où elle peut être mesurée physiquement par un observateur qui ne se déplace pas avec la règle…»

Einstein dit qu’il ne faut pas confondre deux notions différentes:

- réel et apparent…

**-** Ce qui est **valable pour tous les observateurs (absolu)** comme la vitesse de la lumière et ce qui est **relatif à chaque observateur,** comme le temps et l’espace pris isolément**.**

Cette question reviendra constamment dans tous les contacts d’Einstein avec le public et même avec des physiciens réfractaires à ce bouleversement des idées… (**100 auteurs contre Einstein,** livre publié en 1931)

Mais pour approfondir ces paradoxes, il nous faut revenir à la **géométrie grecque…**

**Diapo 11 EUCLIDE**

La géométrie des grecs nous a été transmise par les «Eléments» d’Euclide.

Euclide prouvait ses 28 premières propositions à partir de **quatre axiomes**, mais il était obligé d'invoquer un **cinquième axiome** pour sa 29ème proposition.

Ce cinquième postulat d'Euclide, aussi appelé «**postulat des parallèles**», a longtemps intrigué les mathématiciens, qui ont cherché à le déduire des quatre premiers.

En effet, alors que les quatre premiers axiomes ressemblent à des définitions (ou à des postulats d’**existence**) des segments, des droites, des cercles ou des angles droits, le dernier ressemble à une **proposition**.

Ce n'est qu'au 19ème siècle que Gauss, puis, indépendamment Bolyai et Lobachevsky (en 1823) se rendirent compte qu'on pouvait très bien considérer des géométries non-contradictoires dans lequel on n’admet pas le postulat des parallèles. L'aventure des **géométries non-euclidiennes** pouvait commencer!

Dans ces géométries, une «**droite**» est le **plus court chemin** d’un point à un autre et **deux droites sont parallèles si elles sont distinctes et ne se rencontrent jamais**.

**Incidente.**

Puisque nous en sommes à Euclide, je voudrais signaler qu’au Livre 5, il utilise en fait un autre axiome, aujourd’hui appelé **l’axiome d’Archimède** qui peut se traduire par:

«Il est toujours possible de définir une grandeur plus petite ou plus grande que toute grandeur donnée» ou, d’un point de vue géométrique, il existe toujours une infinité de points entre deux points donnés. Autrement dit, l**’espace est continu**!

C’est la remise en cause de ce dernier axiome qui est à la base de la théorie de la **gravitation quantique à boucles** qui envisage un espace ou les longueurs, les surfaces et les volumes ont une taille minimale (des atomes de surface ou de volume!)

**Diapo 12 PYTHAGORE**

A partir des postulats d’Euclide, les grecs ont démontré la formule que tous les élèves du monde apprennent: le **théorème de Pythagore**.

En réalité, les grecs n’ont pas découvert cette formule, les Babyloniens l’utilisaient depuis plus de 1000 ans mais, pour autant que l’on sache, ce sont les grecs qui en ont donné les premières démonstrations.

Quant à la «démonstration» indiquée à droite de la diapo, elle sera plus facilement admise par des physiciens que par des mathématiciens!

**Diapo 13** Lire diapo

**Les droites sont le plus court chemin d’un point à un autre!**

Sur Terre, il existe des «droites»: ce sont les grands cercles qui passent par deux points donnés!

Mais **il n’existe pas de droites parallèles**: toutes les «droites» se coupent et elles se coupent même deux fois. Et certains triangles ont **trois angles droits**!

Mais le théorème de Pythagore reste à très peu près vrai dans la vie pratique

Pour un triangle rectangle tracé à l’échelle de la France (1000km) l’erreur par rapport à Pythagore est d’environ 1 km.

En pratique, on peut utiliser le théorème de Pythagore **localement**, c’est-à-dire au voisinage d’un point terrestre! On retrouvera cette notion de «**local**» plus loin.

Un **univers sphérique** est l’image d’un espace dans lequel le postulat des parallèles d’Euclide ne s’applique pas.

**Diapo 14**

Il existe d’autres univers où il existe plusieurs droites passant par un point extérieur à une droite et qui ne la coupent jamais. Dans ces **univers** «**hyperboliques»**, il y a **une infinité de parallèles à une droite** donnée.

On ne va pas tarder à retrouver ces géométries lorsqu’on se posera, avec Einstein, la question:

**Notre espace est-il aussi plat qu’il en a l’air?**

Comme un écho à la vieille question:

**La Terre est-elle aussi plate qu’elle le paraît?**

Magellan disait : «L’Eglise dit que la Terre est plate mais j'ai vu l’ombre de la Terre sur la Lune, et j’ai plus confiance en l'ombre que je vois sur la Lune qu'en l‘Eglise»

De nombreux dessins d’Escher sont des représentations d’espaces non euclidiens.

**Diapo 15** Mais revenons à Pythagore.

Sa formule permet de calculer la **distance de deux points** à partir de leurs coordonnées dans un repère à axes perpendiculaires.

Et en prime, on peut écrire la formule (on dit l’équation) du cercle!

**Diapo 16** Il est très simple de déformer un cercle…

**Diapo 17**

Pour étudier l’univers d’Einstein, il faut aussi apprendre à créer des dimensions supplémentaires! C’est simple ! Il suffit d’ajouter une lettre et d’appliquer plusieurs fois le théorème de notre cher Pythagore.

**Diapo 18**

**Notre monde a quatre dimensions :**

Avant - Arrière x ou x1

Gauche - Droite y ou x2

Haut - Bas z ou x3

Hier - Demain t ou x₀

L’idée que **le temps est une quatrième dimension** est antérieure à Einstein.

Dans l’article **‘Dimension’** de l’Encyclopédie(1754), **D’Alembert** écrivait :

“J’ai dit plus haut qu’il n’était pas possible de concevoir plus de trois dimensions. Un homme d’esprit de ma connaissance croit qu’on pourrait cependant regarder la durée comme une quatrième dimension, et que le produit du temps par la solidité, serait en quelque manière un produit de quatre dimensions; cette idée peut être contestée, mais elle a, ce me semble, quelque mérite, quand ce ne serait que celui de la nouveauté.”

Mais cette «dimension temps» est **différente** des autres dimensions.

On peut facilement aller en arrière dans l’espace, pas dans le temps. Je peux aller et venir dans cette pièce mais je ne peux pas revenir avant le dernier lapsus de ma présentation. Nous nous rappelons du passé mais pas du futur…

Pour Newton, le temps était **complètement indépendant de l’espace**.

Les réflexions d’Einstein sur l’espace-temps ont rendu indispensable de les combiner étroitement.

Le temps reste différent de l’espace, mais ils sont en partie «**interchangeables**».

**Diapo 19**

Nous avons vu que **la lumière se déplace à une vitesse fixe dans tous les systèmes de repérage.** Il n’est pas étonnant de la retrouver ici, utilisée comme étalon pour convertir des durées en distances.

On parle souvent d’années-lumière pour mesurer les distances astronomiques, c’est-à-dire le temps parcouru par la lumière en un an.

1 année-lumière vaut 10.000 milliards de kilomètres, à peu près…

Il est plus difficile d’expliquer le signe moins.

**Diapo 20**

Dans l’espace de **Minkowski** (qui avait été le professeur de maths d’Einstein à l’Ecole Polytechnique de Zurich) la distance entre deux points qu’on appelle évènements est donnée par le **s²= c²t²- x²-y²-z² = c²t²- l²**

Ce **s² est** **invariant**, c’est-à-dire qu’il ne change pas de valeur si on passe d’un repère à un autre.

Cette invariance fait apparaître le **s²** comme le carré d’une **distance entre deux évènements de l’espace-temps**.

Les formules de Lorentz changent à la fois la mesure d’espace et la mesure du temps faites dans un repère, mais la distance d’espace-temps entre deux évènements ne change pas en passant d’un repère à un autre.

C’est en quelque sorte **le théorème de Pythagore dans l’espace des théories de Maxwell, Lorentz, Poincaré et d’Einstein…**

Ce qu’Einstein ajoute, c’est que **cet espace est celui de toute la physique** de son époque. Il deviendra aussi, avec **Dirac,** celui de la physique quantique, dont l’histoire commence…

Les plus matheux d’entre vous ont sans doute déjà observé que le **ds²** de Minkowski est semblable à celui d’Euclide dans un espace réel à quatre dimensions, si on considère le **temps** comme un **nombre imaginaire**, c’est-à-dire si on prend comme variable temporelle **xₒ= ict** (avec **i²= -1**).

En fait, Einstein utilisait souvent cette notation dans ses articles.

Note :Wick, un mathématicien italien, a démontré qu’on pouvait utiliser un espace euclidien à 4 dimensions pour faire des calculs et, à la fin, retrouver les résultats de la relativité restreinte et l’espace-temps de Minkowski en faisant une «**rotation de Wick**», c’est-à-dire en remplaçant xₒ par ict à la fin du calcul.

**Diapo 21**

**Croisements de trains en Bourgogne…**

Les plus anciens d’entre nous ont eu à résoudre des problèmes de croisement de trains.

C’est un exemple de «mixage» entre l’espace (représenté par la position du train sur la ligne de chemin de fer) et le temps (représenté par l’heure de la journée)

La pente des courbes représente la vitesse des trains. Et les intersections des courbes représentent les croisements ou les dépassements des trains.

Nous allons en découvrir une version moderne, conforme à la théorie d’Einstein, où se croisent le soleil, la terre, des photons lancés à la vitesse de la lumière, des astéroïdes et des fusées…

**Diapo 22**

Le système Soleil + Terre dans l’espace-temps… vu par un observateur solaire!

Le Soleil, considéré comme fixe dans l’espace, décrit une droite verticale et la terre qui tourne autour de lui parcourt une courbe en hélice.

Comme notre esprit a du mal à visualiser plus de trois dimensions, **l’espace à trois dimensions a été ramené à deux dimensions,** c’est-à-dire aplati horizontalement et **le temps** est représenté **verticalement**.

**Diapo 23**

Dans cette représentation, notre espace habituel est passé de trois à deux dimensions, situées dans le plan horizontal et le temps est sur l’axe vertical.

Le soleil est à l’instant t=0

La terre décrit une hélice autour du soleil, comme on vient de le voir.

Les **rayons du Soleil** s’éloignent dans toutes les directions à la **vitesse de la lumière c**. Ils forment ce qu’on appelle le **cône de lumière**, dessiné en grisé.

Un **astéroïde** vient de percuter le soleil. Il provient du passé et sa ligne ou trajectoire d’univers se confond par la suite avec celle du Soleil.

De la terre, nous envoyons une **fusée** au-delà du système solaire.

Elle s’éloigne de la terre moins vite que la lumière, donc en suivant une trajectoire située à l’intérieur de notre cône de lumière.

Le cône de lumière sépare notre univers en trois régions.

- Le **passé**

- Le **futur**

- Et un **ailleurs inaccessible** (pour l’atteindre, il faudrait aller plus vite que la lumière… ce qui est interdit par la relativité!).

Les évènements du cône de lumière restent sur le cône de lumière.

Si nous voulons conserver le principe de **causalité**, c’est-à-dire que **la cause précède toujours l’effe**t, il faut accepter trois lois:

**1**- Nous ne pouvons connaître que les évènements du cône de lumière **passé**.

**2**- Nous ne pouvons influencer que des évènements du cône de lumière **futur**.

**3**- Nous ne pouvons pas échanger des informations avec ce qui est **ailleurs**, c-à-d en dehors de notre cône de lumière.

Ce diagramme indique autre chose: **Le présent est réduit à un point immatériel, il est comme une ombre**… on ne peut pas l’observer directement.

Bien sûr, il existe ailleurs des évènements simultanés à la chute de l’astéroïde ou au départ de la fusée, mais cette simultanéité n’est pas valable pour tous les observateurs.

Et ce que nous voyons «**maintenant**», en réalité est déjà du passé.

Si vous vous regardez dans un miroir vous vous voyez en réalité plus jeune, d’une toute petite fraction de seconde!

Si ce soir, en sortant de cette salle vous regardez le ciel, la Lune sera est la **lune** d’il y a 1,2 secondes et la lumière de **l’étoile polaire** est celle qui brillait à l’époque de Molière… il y a 440 ans.

Ce plan jaune dans lequel se trouvent les évènements simultanés est propre à chaque observateur… Les observateurs n’ont pas la même perception que nous d’évènements que nous jugeons simultanés.

Einstein, à la mort de son ami Michele Basso, écrivait à sa famille:

«Michele a quitté ce monde bizarre avant moi, cela ne signifie rien… Les gens qui comme nous croient en la physique, nous savons que **la distinction entre passé, présent et futur n’est rien d’autre qu’une illusion**.»

**Diapo 24**

Un nouvel objectif pour Einstein: **unifier la relativité restreinte et la gravitation universelle!**Alors que le monde des sciences et de la philosophie essaie de digérer les nouveaux concepts, que fait Einstein?

Va-t-il se reposer sur ses lauriers peu académiques, utiliser ses coups de maître de l’année merveilleuse, pour obtenir un poste universitaire à sa mesure et entrer enfin à l’Académie prussienne des Sciences?

Bien sûr! Mais son véritable objectif reste d’**unifier** **toute la physique**, et, comme on l’a vu, la mécanique céleste de Newton ne s’accorde pas aux principes de la relativité restreinte de 1905.

On ne peut pas dire qu’il est encouragé dans ce sens, même par ses amis!

«C’est en vieil ami que je dois vous avertir parce que, premièrement vous ne pourrez pas réussir et, même si vous réussissiez, personne ne voudra vous croire.» Lettre de **Max Planck** à Albert Einstein, en apprenant son projet de découvrir une nouvelle théorie de la gravitation compatible avec la relativité restreinte et la gravitation universelle de Newton.

Le même Planck, celui de la constante de Planck, écrit tout de même pour Einstein une lettre de recommandation pour qu’il soit enfin élu à l’Académie des sciences de Prusse, mais elle sonne un peu défaitiste:

«Il ne faut pas juger trop sévèrement le professeur Einstein s'il perd parfois de vue son but dans un raisonnement logique […] car même dans les domaines les plus exacts des sciences, il faut prendre des risques pour arriver à un résultat réellement nouveau…»

Planck n’y croit pas vraiment, mais **Einstein va réussir, après dix ans d’efforts**…

**Diapo 25**

Einstein pour le moment est toujours employé de troisième classe au Bureau des Brevets de Berne. Cela lui laisse le temps de réfléchir et de lire le journal…

La **légende** est un peu macabre! Elle raconte que ce jour-là, un entrefilet raconte la chute mortelle d’un couvreur qui a glissé sur un toit de la ville!

Le point de départ de la réflexion d’Einstein est le fait **qu’un observateur en chute libre ne ressent pas la gravité et que tous les corps tombent avec la même accélération, indépendante de leur masse**.

Cette observation implique, comme Newton l’a déjà noté, que la masse gravitationnelle définie à partir de la loi d'attraction ( F = m.**g** , où **g**  représente le champ de **gravitation**) est la même que la masse inertielle définie à partir de la seconde loi du mouvement ( F = mi.**a** où **a** représente l'**accélération**).

Un corps se comporte de la même manière vis-à-vis de l'inertie et vis-à-vis de la gravitation.

Cette identité entre les deux masses, vraie mais mystérieuse pour Newton, a une signification profonde pour Einstein. Il imagine plusieurs expériences de pensée:

Un observateur placé dans une cabine sans hublot ne peut pas distinguer localement les effets de la gravité terrestre et ceux liés à l’accélération de la fusée.

S'il n'est pas informé du mouvement accéléré, l'observateur peut penser que la boîte est au repos et qu'il y règne un champ de gravitation qui fait tomber les objets.

Au contraire, un observateur extérieur interprète la trajectoire du corps par le mouvement accéléré de la cabine, sans faire intervenir de champ de gravitation.

De la même façon un astronaute dans l’espace voit les corps flotter autour de lui comme dans la fusée de Tintin, et ce serait équivalent s’il tombait en chute libre vers la Terre.

**Gravité et accélération sont de même nature puisqu’on ne peut pas les distinguer localement.**

Einstein dit qu’un **champ de gravitation** est «**comme un mouvement accéléré**». C’’est une des nombreuses façons de formuler ce qu’on appelle le **principe d’équivalence** d’Einstein.

Il reste, comme dans le cas de Newton pour la gravitation, à **traduire cette idée en langage mathématique** et à s’assurer que l’ensemble reste cohérent!

Newton avait mis **vingt ans** pour réussir son pari, Einstein le fera en **dix ans**, de 1905 à 1915.

**Diapo 26** Lire la diapo.

Les principes de la **théorie de la gravitation d’Einstein**.

Avec une description mathématique, Einstein modifie alors la manière de concevoir la gravitation, qui n'est plus envisagée comme une force mais comme une **modification de l'espace-temps**.

Un corps qui subit l'influence d'un champ de gravitation, suit ce qui se rapproche le plus d'une ligne droite dans un espace-temps courbe (une **géodésique**).

Et puisque la trajectoire ne dépend que de la structure de l'espace-temps, deux corps de masses différentes auront le même mouvement de chute libre: cette propriété, qui n'était qu'une coïncidence dans la théorie newtonienne, est maintenant une conséquence de la théorie. La notion d'action à distance de Newton, si perturbante pour l'esprit, a disparu.

Elle est remplacée par une propriété de **l'espace-temps**, qui **se courbe sous l'effet de la matière-énergie**.

Un corps n'est pas attiré à distance par un autre corps mais se déplace librement dans un espace-temps courbé par les champs de gravitation.

Si nous voulions faire un clin d'œil à Aristote, nous pourrions dire que, dans la théorie de la relativité générale, tous les mouvements des corps en chute libre sont des mouvements naturels, tels que les concevait Aristote, c'est-à-dire qu'ils existent sans aucune action pour les produire. Un corps ne fait que réagir aux propriétés locales de l'espace-temps dans lequel il se meut.

**Diapo 27**

**La géométrie de l’espace-temps crée une accélération…**

Voici de retour les géométries bizarres du début.

Supposons deux fourmis dans un espace plat. Elles suivent des parallèles si aucune force n’agit sur elles! Elles avancent sans se rencontrer.

Mais si elles habitent un espace non euclidien, sphérique ou hyperbolique, elles se rapprochent même si aucune force n’agit sur elles.

La géométrie engendre une accélération relative entre les fourmis: on dirait qu’elles s’attirent, comme les masses de Newton!

On peut décrire la gravité comme une déformation de l’espace-temps.

C’est de cette façon qu’Einstein expliquait sa théorie à son fils:

«Les fourmis ne savent pas qu’elles habitent une surface courbe… Elles croient que des forces les attirent ou les repoussent. Mais nous, les hommes, nous savons que notre monde est courbe!»

**Diapo 28**

Revenons à **Pythagore**.

Son théorème

Son théorème déformé!

Son théorème dans l’espace-temps de Minkowski!

Son théorème dans un espace-temps courbe!

Dernière manipulation, on applique la formule à des **points voisins** parce que la formule n’est vraie que localement au voisinage de l’observateur.

**Diapo 29**

Et la formule pour la distance de deux évènements est : **ds² =**

Maintenant nous avons le **théorème de Pythagore dans un espace-temps qui intègre la gravitation**.

Mais j’ai employé un mot nouveau : **tenseur**!

**Diapo 30 Scalaires Vecteurs Tenseurs**

Au printemps, il faut surveiller la pelouse derrière la maison, et en particulier à un paramètre: la hauteur de l’herbe.

**1** - Pour un mathématicien la longueur en chaque point de la pelouse du brin d’herbe qui y pousse est un **champ de nombres** ou un «**champ scalaire**».

Exemple météorologique : Les températures à la surface du globe terrestre… Plusieurs toiles de Kandinski représentent des champs scalaires.

**2** - Si je laisse l’herbe pousser et qu’un coup de vent survienne, il faut, pour décrire la nouvelle situation, connaître non seulement la longueur des tiges mais aussi la **direction** dans laquelle elles ont été couchées par le vent. Le champ scalaire est devenu un champ de flèches, on dit un «**champ de vecteurs»**…

Exemple météorologique : Carte des vents dans l’atmosphère terrestre.

**3** - Une pelouse complètement abandonnée à elle-même va donner naissance à une forêt. Les tiges d’herbe rectilignes sont devenues des arbres, avec un tronc, des branches, des feuilles…

Il faut, pour décrire la situation, imaginer des êtres mathématiques plus complexes que les vecteurs, ce sont des «**tableaux»** ou des **«blocs de nombres**» en plusieurs dimensions.

Nous venons de créer un **champ de tenseurs**.

Un tenseur est un objet mathématique qui étend la notion de vecteur.

Dans un système de coordonnées particulier, il se présente comme un bloc de chiffres à plusieurs dimensions, repérées par des indices.

Les tenseurs à deux indices se présentent comme ce que les mathématiciens appellent des matrices.

La théorie de la RG utilise surtout des tenseurs à 2 ou 4 indices…

**Diapo 31**

Quelques tenseurs connus

Les tenseurs décriventent les propriétés de phénomènes physiques ou mathématiques…

Les **tenseurs des contraintes** peuvent décrire les pressions à l’intérieur d’un fluide ou d’un solide…

Les vecteurs électrique et magnétique d’une onde électromagnétique forment le **tenseur électromagnétique**.

Le tenseur d’ordre zéro est un scalaire et a une seule composante, mais il n’est pas suffisant d’avoir une seule composante, il faut que ce nombre soit **indépendant** du système de coordonnées.

Le critère pour qu’un bloc de nombres soit un tenseur est son comportement dans un changement des coordonnées. Les relations entre tenseurs sont **intrinsèques**: une relation entre tenseurs obtenue dans un repère donné est valable dans tous les autres repères.

Les tenseurs avaient été inventés avant Einstein, par **Levi Civita, Cartan, Ricci**, mais vous commencez peut-être à entrevoir pourquoi Einstein s’y est intéressé!

**1**- Une égalité entre tenseurs est valable dans tous les systèmes de coordonnées si elle l’est dans un système particulier.

**2**- Les tenseurs permettent d’utiliser des **systèmes de coordonnées courbes**, avec toutefois quelques subtilités que je passe sous silence…

Einstein a toujours eu des relations compliquées avec les mathématiques, mais son désir de dépasser les notions familières d’espace et de temps et de travailler dans des espaces courbes l’a conduit à s’appuyer sur des mathématiciens : sa première femme **Milena Maric** (dont le rôle réel auprès de lui a fait l’objet de nombreuses discussions) était une bonne mathématicienne et son ami **Michael Grossmann**, qui l’a beaucoup aidé, étudiait en même temps que Milena et Einstein à Zurich…

**Note** : Einstein a inventé un système d’écriture condensé des tenseurs (convention d'Einstein) systématiquement utilisé de nos jours.

Plus tard il a échangé avec David Hilbert, un des grands mathématiciens de l’époque, qui a participé à la mise au point des équations de la relativité générale.

**Diapo 32** Lire diapo

**Diapo33 L’équation d’Einstein**

Après bien des tâtonnements, Einstein a fini par trouver la bonne description de la façon dont la matière-énergie déforme l’espace-temps.

Nous avons dans la partie de **gauche** une **expression géométrique décrivant l’espace-temps** et à **droite** une expression qui décrit le **contenu de matière et d’énergie** du système.

Cette équation est le cœur de la théorie d’Einstein:

La matière et l’énergie courbent l’espace-temps.

Un univers vide de matière, d’énergie et d’ondes gravitationnelles serait «plat» comme celui de Minkowski et de la relativité restreinte.

La courbure de l’espace-temps règle le mouvement de la matière et de la lumière.

Les corps en chute libre suivent les **géodésiques** c’est-à-dire les **«droites»** définies comme le plus court chemin d’un point à un autre dans l’espace-temps.

**La matière et l’énergie dictent à l’espace-temps sa forme et l’espace-temps dit à la matière et à l’énergie comment elles doivent se déplacer (Wheeler).**

Et ça marche!

Mais on ne sait pas vraiment pourquoi l’espace-temps obéit à l’énergie-matière!

**Hypothesis non fingo!** disait Newton: «Je ne fabrique pas (ou je ne fais pas semblant d’avoir) une explication!»

Quant à la **constante d’Einstein**, elle contient la constante de la gravitation de Newton pour que, lorsque la distribution de matière ne produit qu’une gravitation faible, on retrouve les résultats de la **loi de Newton**.

**Et miracle**, **la différence correspond exactement au petit écart de l’orbite de Mercure que la théorie de Newton ne réussissait pas à expliquer**!

Revenons à l’équation d’Einstein.

Elle peut se lire **dans les deux sens** :

Je fixe une géométrie (par le tenseur métrique) et je recherche une distribution de matière et d’énergie (pas toujours réaliste) qui s’harmonise avec cette géométrie (C’est le tour de passe-passe de Synge, Synge’s trick).

Einstein en physicien **réaliste**, préférait supposer une distribution de matière-énergie réelle et essayer d’en déduire les propriétés de l’espace-temps correspondant.

En paroles c’est simple mais:

 - L’équation d’Einstein est une **égalité entre tenseurs**, entre des «tableaux de chiffres» et elle est donc composée de **16 équations**, en réalité **10** si on tient compte des symétries.

 - Ce n’est pas une équation algébrique comme **ax²+bx+c=0** mais une **équation différentielle**, c’est-à-dire une équation qui porte sur des vitesses ou des accélérations. Pour une voiture, cela implique de donner des informations supplémentaires sur la position et la vitesse de la voiture à un moment donné pour savoir où elle est à chaque instant.

Au début, Einstein ne croyait pas qu’on trouverait de **solution exacte** à son équation. Il se contente de la résoudre **par approximations** successives et calcule de cette façon l’écart avec la théorie de Newton pour l’orbite de Mercure.

Mais il se trompait: **Schwarzschild**, un astronome passionné par la théorie d’Einstein, qui est parti à la guerre sur le front russe comme artilleur, réussit en 1916 à résoudre le problème dans le cas d’un système de deux corps célestes dont l’un est beaucoup plus massif que l’autre (par exemple, le soleil et une planète, loin des autres étoiles…).

Cela lui permet de démontrer **mathématiquement** la formule donnée par Einstein pour la correction de l’orbite de Mercure.

On s’apercevra **bien plus tard** que cette solution décrit aussi la trajectoire d’un corps qui se rapproche d’un **trou noir** isolé.

Mais en 1916, la seule chose qui ressemble à un trou noir, c’est la guerre mondiale à laquelle très peu échappent. Schwarzschild meurt quelques mois plus tard sans imaginer son succès posthume et sans savoir que Friedmann, un des fondateurs de la cosmologie relativiste, combat en face de lui sous l’uniforme russe...

Einstein n’avait pas non plus prévu l’avènement des techniques de **simulation** **numérique** par ordinateur qui permettra de développer des calculs sans connaître la solution explicite de l’équation étudiée. On regroupe ces développements sous le nom de **Relativité Numérique**. C’est devenu un domaine de spécialisation très actif pour les physiciens relativistes.

**Diapo 34**

C’est Hilbert qui a aidé Einstein à rectifier son erreur.

**Diapo 35**

Pour Newton, le mouvement de la Terre autour du Soleil est un **mouvement accéléré** par la gravité. Pour Einstein, c’est un **mouvement inertiel dans un espace-temps courbé** par la masse du Soleil.

La Relativité Générale est née du désaccord théorique entre les principes de la relativité restreinte de 1905 et de la théorie de la gravitation de Newton.

La Relativité Générale complète la Relativité Restreinte, dont elle reprend des principes essentiels. Mais elle marque une rupture profonde avec elle, en ce sens qu’elle ne considère plus l’espace-temps comme un cadre dans lequel interagissent les particules.

L’espace-temps n’existe pas en l’absence de matière-énergie.

• La Relativité Générale est une **théorie géométrique**: la gravitation y est décrite comme une déformation de l’espace-temps produite par les masses.

• La Relativité Générale n’impose **aucune limite sur les observateurs**: quelles que soit leurs mouvements, ils sont pris en compte.

La Relativité Générale a une limitation. Elle décrit un espace-temps et des objets **continus**.

Elle n’est pas compatible avec l’autre théorie fondamentale apparue vers la même époque, la Mécanique Quantique.

• Les physiciens sont à l’œuvre depuis longtemps pour trouver une théorie de la gravitation quantique, mais sans succès. Mais aucune des théories candidates n’est pour l’instant passée de la théorie à l’expérience.

**Diapo 36**

Dans le schéma des cônes de lumière, la gravitation incline le cône de lumière vers la masse qui crée la distorsion spatiale.

**Diapo 37**

Le déplacement plus rapide que celui calculé par les astronomes de l’orbite de **Mercure** était connu depuis très longtemps.

La relativité générale a permis à Einstein d’expliquer la déviation égale à 43’’ par siècle. Cet effet «Einstein» est faible (43’’ sur un total de 574’’, le reste étant dû aux interactions avec les autres planètes du système solaire)

Mais il existe des systèmes pour lesquels **l’effet est important**!

**Des** **corps plus lourds que le soleil et/ou se déplaçant plus vite**!

PSR 1913+16 est un système binaire composé d’un **pulsar** et d’une **étoile à neutrons** de masse voisine du soleil tournant autour de leur centre de gravité commun (dans un espace plus petit que le Soleil!)

Dans ce cas l’avance du périhélie est de à 4° par an, 30000 fois plus que pour Mercure! On retrouvera plus tard ce pulsar binaire avec plus de détails.

**Diapo 38**

La lumière se courbe en passant auprès du soleil!

G constante de Newton

M masse du soleil

C vitesse de la lumière

R rayon du soleil

Combinaison de la théorie de Newton et la relativité restreinte : on attribue au photon une masse de E/c² (E= mc²)

**Diapo 39** Expliquer le schéma

Il est difficile d’observer les étoiles situées dans la direction du soleil, sauf pendant les éclipses totales…

En comparant des photos d’étoiles prises de nuit (sans le soleil) et pendant une éclipse (le soleil est dans l’axe de visée) , on peut théoriquement mesurer la **déviation des rayons lumineux** des étoiles **par le soleil**.

Deux expéditions sont organisées, après la fin de la guerre, lors de l’éclipse de 1919 qui est totale au voisinage de l’équateur.

Sur l’Ile de Principe, au large de l’Afrique, deux photos donnant 1,61 (+/- 0,30) secondes.

A Sobral, au nord-est du Brésil, avec quatre photos donnant 1,98 (+/- 0,12) sec.

Les résultats sont plutôt en faveur de la théorie d’Einstein mais ils sont peu nombreux et aux limites des capacités de résolution photo de l’époque.

**La réaction des scientifiques reste réservée, ce qui se comprend… Mais la presse s’empare de ces premiers résultats pour faire d’Einstein une célébrité**.

**Diapo 40**

Heureusement, il y aura d’autres vérifications, en particulier lors de l’éclipse australienne de 1922 (Observatoire de Lick) qui a donné lieu à des mesures précises sur 24 étoiles : Elles confirment la valeur de la relativité générale (1,75 +- 0,09 sec).

Il faut signaler que, lorsque cette proposition de mesure de déviation de la lumière pendant une éclipse avait été faite, Einstein avait été prudent.

Il pensait que cet effet serait **difficile à observer** et proposait plutôt d’étudier des effets **d’intensification lumineuse**, ce qu’on appellera par la suite des **mirages gravitationnels**.

**Diapo 41**

Les deux images du quasar sont séparées par 6 secondes d'arc, et ont une magnitude apparente (luminosité) de 17 et 16,7 pour les composants A et B.

Le temps d'arrivée de la lumière provenant du quasar est différent selon qu'elle prend le chemin qui produit l'image A ou B.

Pour le Quasar Jumeau, il y a **417 jours** de décalage entre les deux images.

La galaxie qui sert de lentille YGKOW G1, est une galaxie elliptique géante se trouvant dans un amas de galaxies qui contribuent également à l'effet Einstein.

Le quasar est presque aussi vieux que l’univers et la galaxie lentille est à 4 milliards d’années-lumière de nous.

C’est le **plus vieux mirage,** optique et temporel à la fois, **jamais observé par l’homme !**

**Diapo 42**

La **croix d'Einstein** est une forme particulière de mirage gravitationnel, correspondant à la multiplication visuelle de l'image d'un quasar lointain due à la présence d'un objet massif en avant-plan (une galaxie).

Croix d'Einstein (QSO 2237+0305).

L’observation de ce quasar situé à 8 milliards d’années-lumière se fait par déflexion à travers une galaxie-lentille à 400 millions d’années-lumière

(Photographie ESA, prise par le télescope américain Hubble).

**Anneau d'Einstein**, créé par la galaxie intermédiaire LRG 3-75.

L’alignement entre les deux galaxies est si bon que l’image de la galaxie d’arrière-plan a la forme d’un cercle presque complet.

**Diapo 43 COSMOLOGIE**

Un petit **rappel historique**: Quand Einstein a écrit son premier article de cosmologie (1917), l’univers des astronomes était limité à notre Voie Lactée et éventuellement quelques galaxies voisines assimilées à des «**nébuleuses**» dont on se demandait si elles appartenaient ou non à la Voie Lactée.

L’univers était considéré comme statique.

Ce sont les grands télescopes américains (2500mm du Mont Wilson inauguré en 1917, 5000mm du Mont Palomar en 1936) qui confirmeront que la Voie Lactée n’est qu’une galaxie parmi 100 milliards d’autres.

Le **premier modèle d’univers** calculé par **Einstein**, bien que peu réaliste (poussière d’étoiles homogène et isotrope, invariable dans le temps) démontre la puissance des équations de la Relativité Générale qui fournit la relation entre le rayon de l’univers et sa densité de matière, liés à la constante cosmologique qu’il a introduite pour obtenir une solution statique.

Mais cette solution, comme on le verra par la suite, est en équilibre **instable**.

Le moindre mouvement détruit son équilibre!

Cette solution rudimentaire prouve la possibilité d’**univers finis mais illimités**…

**De Sitter** trouve une autre solution statique, mais elle est **vide de matière**. A la fin de son article, il remarque que dans son univers, la **fréquence de la lumière varie avec la distance** de l’objet observé.

En conséquence, les raies spectrales des étoiles lointaines sont **décalées vers le** **rouge** (comme l’a déjà remarqué en 1915 l’astronome américain, Vesto Slipher)

En 1922, un jeune savant russe, **Alexander Friedmann**, envoie une lettre à Einstein avec la solution qu’il a découverte: **L’univers est stable parce qu’il est en mouvement!**

Il peut être en **expansion** ou en **contraction** mais pas statique. Avec les quelques données à sa disposition, il a évalué son **âge** à **10 milliards d’années environ**.

Friedmann vient de briser un tabou de la cosmologie, la fixité de l’univers, souvent lié à une idée d’éternité, hérité des Babyloniens et des Grecs.

Dès que l’article de Friedmann paraît, Einstein répond immédiatement: Il croit avoir décelé une erreur dans la communication de Friedmann. Mais il a tort!

Friedmann lui envoie une lettre personnelle où il démontre mathématiquement que la relativité générale **ne permet aucune solution statique autre que celles**, peu réalistes**, d’Einstein et De Sitter**.

Il lui demande de publier à sa place un rectificatif ce qu’Einstein fera… un an plus tard.

Friedmann a impressionné la petite communauté des «relativistes» par la portée de sa théorie et sa démonstration, face à Einstein, de l’impossibilité d’un univers statique. **Ses équations sont toujours utilisées**.

Malheureusement, il ne réussira pas à rencontrer Einstein lors des deux seuls courts séjours qu’il sera autorisé à faire en Europe de l’Ouest.

Il écrit en 1924 un article prémonitoire «**sur la possibilité d’un univers à courbure négative constante**». C’est son chant du cygne! Il meurt subitement l’année suivante de la fièvre typhoïde, comme Schwarzschild.

**Georges Lemaître**, un abbé belge, va reprendre le flambeau de Friedmann sans connaître tous ses travaux (publiés surtout en russe et parfois en allemand).

Il étudie et classifie une grande variété de modèles d’univers. Grâce à sa formation d’astronome, il est au courant des dernières découvertes indiquant un univers en **expansion**.

**Diapo 44**

Comme ce cycliste, l’univers n’est stable que parce qu’il est en mouvement…

**Diapo 45**

La cosmologie est sortie de l’enfance avec Friedman et Lemaître en combinant la relativité générale, les équations de Friedmann et les observations astrophysiques

Lemaître déduit, en prolongeant ses modèles, qu’à sa naissance, l’univers était réduit à un objet quantique de très petit rayon qu’il appelle: **l’atome primitif**!

Œuf cosmique de la cosmologie bouddhiste… ou preuve de la création divine comme le déclare aussitôt l’Académie Pontificale! Monseigneur Lemaître (il a obtenu une promotion!) demande une entrevue à Pie XII et le convaincra de ne pas recommencer une **affaire Galilée**, 300 ans plus tard…

Il déduira aussi des équations de Friedman la **loi de Hubble**, deux ans avant la publication de l’astronome américain.

En 1936, s’appuyant sur ses résultats et sur la physique quantique, Gamow, Alpher et Herman prédisent l'existence d’un **rayonnement cosmologique** résiduel, dont ils estiment la température à **5 K**.

C’est ce qu’on appelle maintenant le **fond diffus cosmologique** (CMB) qui sera observé par hasard par Penzias et Wilson en 1965, à une température de **2.73 °K**.

**Diapo 46 Loi de Hubble-Lemaître**

Chaque point est une galaxie.

Le **carré rouge** représente le domaine étudié par Hubble, dont l’estimation était 7x supérieure à l’estimation actuelle.

La pente de la droite de Hubble est appelée la **constante de Hubble**, qui permet d’estimer grossièrement **l’âge de l’univers**.

 **Fond diffus cosmologique**

Quand l’univers est devenu transparent, 380000 ans après le **big bang**, il a émis ses plus anciennes radiations électromagnétiques et lumineuses.

Cela a permis de vérifier l’**isotropie de l’univers** avec une grande précision.

Ce type d’image était, avant l’observation des **ondes gravitationnelles**, la plus ancienne **image** possible de notre univers.

Les fluctuations de température représentées par des couleurs correspondent à des 1/100000èmes de degrés.

**Diapo 47**

Les galaxies ne s’éloignent pas de nous, c’est **l’espace** qui nous en sépare qui **s’étire**.

La constante qui représente cette vitesse **aujourd’hui** (car la constante est sans doute variable!) est appelée constante de Hubble, et notée **H₀** où l’indice 0 signifie **aujourd’hui**.

La valeur qu’on lui attribue actuellement est de :

**H₀ = 72 km/s/Mpc.** (WMAP 2008)

Le satellite Planck donne une valeur plus faible de **67km/s/Mpc**.

Elle signifie qu’à chaque seconde, l’Univers s’accroît dans toutes les directions de **70 km pour chaque mégaparsec** (3.1 années-lumière) de distance.

Cette vitesse donne le vertige, parce que 70 km par seconde semble énorme!

Mais un million de parsecs est une distance colossale, qui correspond à 3,1millions d’années-lumière.

En unités familières **H₀= 7,2 microns par siècle et par kilomètre**.

(1 km = 1 milliard de microns µm, 1 s = 1/3 155 760 000 siècle et 1 Mpc = 3,1 10^19 km.
Ceci signifie que chaque kilomètre d’Univers s’allonge de 7,2 microns en un siècle! C’est la taille d’une bactérie… tous les cent ans.

Vue sous cet angle, l’expansion de l’univers semble plus raisonnable.

La faiblesse de l’expansion **à notre échelle** aide à comprendre pourquoi elle n’a aucun effet pour les petites distances:

Les autres forces de la Nature sont trop importantes pour que la matière se plie à l’expansion générale. Les objets qui nous entourent, y compris notre corps, sont gouvernés par les forces atomiques ou électromagnétiques qui définissent les distances entre les atomes. Nous sommes insensibles à l’expansion de l’univers!

Même les galaxies liées gravitationnellement à l’intérieur des amas ne subissent pas la dilatation de l’espace. Ce n’est qu’à l’échelle des distances entre les **amas de galaxies** que l’expansion prend son ampleur.

**Diapo 48 La gravité ralentit les horloges** Lire diapo

L’expérience de 1971 a depuis été confirmée avec une très grande précision, la dernière fois en 1916 lors d’une série de la BBC en hommage à Stephen Hawking.

Sur Terre, le ralentissement lié à la gravitation est de l’ordre du milliardième.

Sur le Soleil, du millionième.

Sur une étoile à neutrons, il atteint 20 %!

A la frontière d’un **trou noir**, comme on le verra par la suite, le ralentissement est de 100%, ce qui signifie que «le temps s’arrête».

Cet effet est resté une curiosité de laboratoire jusqu’à l’invention du GPS.

**Diapo 49 GPS**

Pour déterminer sa position, le GPS reçoit les signaux de 4 ou 5 des 24 satellites et mesure le temps de parcours et donc la distance = c ΔT (intervalle entre émission et réception du signal)

Les horloges de l’espace se déplacent à 14 000 Km/h (**4 km/s**). La dilatation du temps qui en résulte implique un **retard** d’environ **7 millionièmes de secondes par jour**.

Ces horloges se trouvent à **20 000 Km de la Terre**. A cette altitude la gravité terrestre est divisée par quatre, qui provoque une **avance de 45 millionièmes de secondes par jour**.

Les horloges terrestres sont donc plus lentes que celles embarquées sur les satellites de la différence, soit 38 microsecondes par jour.

Si on ne corrigeait pas ces deux effets relativistes, les données du GPS accuseraient une **dérive de 10 kilomètres par jour** et le système serait inutilisable.

Pour compenser l’effet les horloges spatiales sont réglées à une fréquence de 10.22999999545 MHz au lieu de 10.23 MHz pour l’horloge terrestre.

**Diapo 50**

Au centre de la Voie Lactée, des étoiles gravitent autour de «rien»

L’étoile la plus intéressante est **S2** parce qu’elle est la plus proche du trou noir.

Comme Mercure dans le cas du système solaire, c’est donc elle qui montrera le plus d’effets relativistes. Mais le vrai rêve des astrophysiciens serait de trouver un pulsar gravitant autour **Sagitarius A\***. Cela permettrait d’observer directement une «horloge» dans un champ de gravitation très intense!

On pourrait vérifier que la solution de Kerr-Newman est correcte (Un théorème dit que c’est la seule possible pour un trou noir dans le cadre de la Relativité Générale)

Dans le cas contraire il faudrait étudier d’autres hypothèses dans le cadre de la relativité générale comme, par exemple, les étoiles à bosons, les étoiles sombres super-massives, les grava-stars proposées par divers théoriciens.

Sinon, il pourrait s’agir un trou noir, mais dans une théorie différente de la relativité générale.

Récemment le VLT ( Très Grand Télescope) de l’ESA au Chili a annoncé la découverte d’une étoile baptisée **S62** qui gravite beaucoup plus près de Sagitarius A\*, à une distance de 750 millions de kilomètres et fait un tour complet en 10 ans.

**Diapo 51**

Un trou noir de Laplace est stable et ne modifie ni l’espace ni le temps.

Un trou noir de la relativité générale déforme l’espace-temps. Il est entièrement décrit par trois paramètres:

-sa masse

-sa charge électrique

-sa rotation

Les propriétés de l’espace-temps autour de ces différents types de trous noirs peuvent être différentes.

Quant à la discussion sur la structure interne des trous noirs, elle reste du domaine d’hypothèses difficiles à vérifier… et peut-être invérifiables!

-**Vide + Singularité**?

-Une «boule floue » (**fuzzy ball**)?

-Ou un «mur de feu» (**firewall**) qui bloque l’entrée… et la sortie!

-Ou un rebond en «**fontaine blanche**» née d’une étoile de Planck!

Mais pour le savoir, il faut entrer dans le trou noir et «vous qui entrez, laissez toute espérance!» de ressortir et de raconter ce que vous avez vu!

 **Mini trous noirs**

On pense que, peu de temps après le Big Bang, l'Univers était suffisamment dense pour certaines parties aient pu être contenues dans leur propre rayon de Schwarzschild, entraînant leur évolution locale en trous noirs de petite taille.

Mais la rapidité de l’expansion a peut-être évité leur effondrement gravitationnel.

Les trous noirs formés de cette façon sont nommés **trous noirs primordiaux**.

A ce stade, d’autres difficultés apparaissent.

Des trous noirs sont des objets de petite taille, ayant une masse, une charge électrique et un moment cinétique. Ils ressemblent à des **particules quantiques**.

Prédits et décrits par la relativité générale, ils entrent dans le champ de la mécanique quantique relativiste et aussi, par le biais des paradoxes sur le devenir de l’information qu’ils «avalent», dans le champ de la thermodynamique statistique et de la théorie de l’information.

Tous ces développements théoriques ont attiré les projecteurs sur des chercheurs comme Hawking, Bekenstein,Thorne, Verlinde, Maldacena, auteurs d’hypothèses et de théories aussi ingénieuses que captivantes.

**Diapo 52** Un trou noir déforme l’espace…

**Diapo 53** Il déforme surtout le temps… L’adieu sans fin d’Interstellar…

**Diapo 54 Sauter, si nécessaire**

Image simulée d’un trou noir stellaire qu'un observateur situé à une dizaine de kilomètres (9 fois le rayon du trou noir) verrait et dont l’image se dessine en direction du Grand Nuage de Magellan.

L’image de celui-ci apparaît dédoublée en deux arcs de cercle (effet de lentille gravitationnelle).

La Voie lactée qui apparaît en haut de l’image est distordue, au point que les constellations sont méconnaissables.

La Croix du Sud, par exemple, près de l’étoile orange lumineuse, Gacrux, en haut à gauche, n’a plus sa forme de croix.

Une étoile relativement peu lumineuse (HD 49359, magnitude apparente de 7,5) est située presque exactement derrière le trou noir. Elle apparaît sous la forme d’une image double, de luminosité apparente amplifiée (x4 500 !!!) atteignant une magnitude apparente de -1,7.

Les images doubles de l'étoile et du Grand Nuage apparaissent sur un cercle, l'anneau d'Einstein, entourant le trou noir.

**Diapo 55**

Un **trou noir de Kerr** est complètement décrit par trois propriétés:

- Masse

- Charge électrique

- Moment angulaire.

Il possède une ergo-région où l’espace-temps est entraîné par la rotation du trou noir.

Sa structure comprend deux horizons et une structure interne hypothétique. C’est ce genre de trou noir qui est décrit dans le film Interstellar, de façon correcte grâce à la patte du prix Nobel Kip Thorne.

**Diapo 56** Lire

**Diapo 57**

**PSR B1913+16** est un pulsar binaire, c'est-à-dire un système binaire dont l'une des deux composantes est un **pulsar**.

L'autre composante de ce système est invisible avec les instruments actuels, et sa masse suggère qu'il s'agit d'une **étoile à neutrons**.

Cette étoile à neutrons pourrait éventuellement être un pulsar elle aussi, mais dans ce cas, le faisceau d'émission éventuel ne balaie pas le Système solaire.

L'orbite a évolué depuis la découverte de ce système en accord avec les prédictions faites par la relativité générale.

Le demi-grand axe de 1,95 million de km diminue de ~3 mm à chaque orbite parcourue (toutes les 7,75 heures), soit de ~3,5 m par an.

La puissance émise sous forme d'ondes gravitationnelles, donc l'énergie perdue chaque seconde par ce système en voie de fusion (la collision est prévue dans environ 300 millions d'années) est de l'ordre de 7,35.10^24 W, soit **1,9% de l'énergie lumineuse émise par le Soleil**.

En comparaison, la Terre, du fait de sa rotation autour du Soleil, émet aussi des ondes gravitationnelles dont la puissance est seulement de **200 W** (soit 10²² fois moins que celle du pulsar binaire), émission qui la fait se rapprocher du Soleil à la vitesse de 1 femto-mètre (10^-15 m) par jour (c'est là le diamètre d'une particule nucléaire). En un milliard d'années, la "chute" de la Terre vers le Soleil due à ce seul effet (mais il y en a bien d'autres) serait de ~0,4 millimètre.

L'ensemble du Système solaire émet aussi des ondes gravitationnelles, avec une puissance de l'ordre de **5 kW**.

**Diapo 58**

Les **ondes gravitationnelles** sont des vibrations de l’espace‐temps.

• Quand une masse est accélérée ou change sa configuration, son champ gravitationnel change et l’information se propage vers l’extérieur à la vitesse de la lumière.

• Pour pouvoir être observées, elles doivent être produites dans des champs gravitationnels très intenses (**étoiles à neutrons, trous noirs**)

• Elles ne sont ni arrêtées, ni déviées par la matière.

• Elles apportent des informations complémentaires aux ondes électromagnétiques.

**Diapo 60**

Des ondes gravitationnelles?

**Lire la diapo**

**Diapo 61 :** **VIRGO**

Il existe pour l’instant trois interféromètres de grande taille capables d’observer des modifications de longueurs de un milliardième de milliardième de millimètre qui correspondent au passage d’une onde gravitationnelle.

Deux aux USA, **LIGO (Hanford et Livingston)** et un en EUROPE, **VIRGO (Pise).**

Deux antennes tubulaires sous vide de 3 ou 4 km sont parcourues par des faisceaux lasers de 60 watts réfléchis par six miroirs monocristallins de silice suspendus par des fils de silice amorphe équipés de plusieurs étages d’atténuateurs destinés à isoler les miroirs de la plupart des vibrations parasites (sismiques, circulation routière, trains, marées, pompes à vide, avions…) Grace aux miroirs la distance parcourue par le faisceau lumineux mesuré atteint un millier de kilomètres.

La surface des miroirs (faits d’oxyde de tantale et de silice) et leur forme presque parfaite permettent de réfléchir 99,999% de la lumière reçue…

Des ordinateurs identifient les signaux à analyser.

**Diapo 62**

Laboratoire VIRGO, Cascina , près de Pise en Italie, 14 Septembre 2015..

- Salut Marco, j’ai reçu plusieurs alertes de détection. Ils sont tous dans la même seconde. Je ne réussis pas à ouvrir la page du site.

- Ça y est!

- Wow!

- Une onde gravitationnelle!

- Il faut tout de suite envoyer l’info au groupe. Ecris vite!

- Voilà! C’est fait!

- C’est vraiment un signal important, rapport signal sur bruit de 23!

- On a vu ensemble pour la première fois une onde gravitationnelle!

**Diapo 63**

Le passage d’une onde gravitationnelle modifie la géométrie de l’espace-temps. Mais cette déformation est très faible.

**Diapo 64**

Les ordinateurs de LIGO et VIRGO sélectionnent les évènements qui sont détectés par plusieurs antennes et correspondent à la description fournie par la relativité générale.

C’est pour cette raison que la **collaboration entre Ligo et Virgo** a commencé dès l’origine et sera probablement étendue aux autres projets (Japon, Inde…)

1 - Dans la première phase, les trous noirs se rapprochent et le calcul des trajectoires peut être fait par la théorie de Newton dans laquelle on introduit les corrections de la relativité générale. Les physiciens français Luc **Blanchet** et Thibault **Damour** ont contribué à ces calculs.

2 - Dans la deuxième phase, qui correspond à la fusion, on résout par simulation numérique les équations de la relativité générale, par approximations successives.

3 - Après la fusion, on utilise les équations de **Kerr** (dont nous avons parlé dans la partie consacrée aux trous noirs) modifiées en introduisant les caractéristiques des deux trous noirs.

On procède de façon semblable dans le cas de deux étoiles à neutrons ou dans le cas d’un trou noir et d’une étoile à neutrons.

Par contre il reste encore des incertitudes dans le calcul des ondes gravitationnelles émises par l’effondrement d’une supernova.

**Diapo 65**

Pour arriver au signal montré dans la diapositive, les signaux reçus par les deux interféromètres LIGO ont été décalés (de la différence de temps de parcours, environ **7 millisecondes**) et l’un d’eux a été **retourné** pour tenir compte de l’orientation différente des antennes.

Après ces opérations, les deux signaux sont pratiquement identiques et leur combinaison a permis de retrouver les caractéristiques principales des deux trous noirs et de leurs orbites.

Lorsque les deux trous noirs ont été détectés, c'est-à-dire lorsque la fréquence du signal gravitationnel est entrée dans la bande de fréquence des détecteurs (environ 35 Hz), ils étaient distants l’un de l’autre d'environ 1000 km.

**Diapo 66**

La détection de **coalescences d’étoiles à neutrons** peut permettre en plus de mesurer la vitesse des ondes de gravitation et de comparer leur temps de parcours à celle des **rayonnements** électromagnétiques (gamma, lumière visible, infrarouge, ultraviolet, rayons X, radio) produits par la fusion.

Elle aura une incidence considérable en astrophysique et en cosmologie.

**- Tester la Relativité Générale** et ses variantes…

**- Comprendre la structure interne des étoiles à neutrons** (effets de marée)

**- Déterminer la distribution de masse des étoiles à neutrons** et leur évolution.

L’étude des ondes de gravitation permettra théoriquement d’obtenir des informations sur les débuts de l’Univers, parce qu’à la différence de la lumière, **on peut les observer depuis les premières secondes de notre univers**, alors que l’univers était opaque pendant les premiers **380.000 ans** de son existence.

**Diapo 67**

Un réseau mondial (avant le réseau spatial LISA) permettra de confirmer et de préciser les observations et de positionner clairement l’emplacement des évènements observés.

**Diapo 68**

Le spectre des ondes gravitationnelles est très large et les interféromètres terrestres (**LIGO Hanford et Livingston, VIRGO, GEO, KAGRA et plus tard LIGO India**) seront épaulés par **ELISA**, un réseau de 3 satellites coordonnés placés en orbite solaire)

**Diapo 69**

L’astronomie devient multi-media. On espère ainsi pouvoir étudier:

Validité de la Relativité Générale dans des champs de gravitation forts.

Distribution de masse des trous noirs et leur évolution.

Contraintes sur les modèles d’univers.

Observer les premières secondes de notre univers

Structure interne des étoiles à neutrons

Dynamique des premières structures de l’Univers...

Comment explosent les supernovas?

**Diapo 70**

La vision populaire du physicien, c’est celle d’une personne qui «est certain de ses théories» mais en réalité les physiciens doutent de tout:

Pour l’instant, ils désespèrent de trouver une faille soit dans la Relativité Générale, soit dans la Théorie Quantique des Champs, soit dans les deux.

Des phénomènes comme le «big bang», les trous noirs, les étoiles à neutrons, les ondes gravitationnelles, le vide, l’antimatière… relèvent des deux théories.

Alors ils «bricolent» souvent génialement, comme Stephen Hawking, en mélangeant Relativité, Quantique et Thermodynamique.

Contrairement à ce qui est souvent raconté, à cause de ses opinions sur l’incomplétude de la mécanique quantique, Einstein était très conscient des limites de la relativité générale à l’échelle atomique.

Dans un article de **1906** dans le journal de l’Académie de Prusse, il écrivait:

“Pendant les mouvements internes à l’atome des électrons, les atomes devraient rayonner non seulement de l’énergie électromagnétique mais aussi de l’énergie gravitationnelle, même si c’est en quantité très faible. Comme on n’observe pas cela dans la Nature, la théorie quantique devra modifier non seulement la théorie de Maxwell [Feynmann!] mais aussi la nouvelle théorie de la gravitation.”

A l'heure actuelle, toutes les particules élémentaires et leurs interactions (électromagnétique, faible et forte) sont décrites par la Théorie Quantique des Champs qui fusionne la mécanique quantique classique et la relativité restreinte.

Seule, l'interaction gravitationnelle ne peut pas, à l'heure actuelle, être décrite comme un "champ d'espace-temps quantique". Il semble probable que l'unification entre la relativité générale et la théorie quantique ne pourra se réaliser que dans le cadre d'une théorie plus fondamentale.

Il existe beaucoup de recherches en ce sens. Dans le monde, une centaine d’équipes de physiciens travaillent sur les théories des cordes et une vingtaine sur la théorie des boucles.

La théorie des cordes remet en cause la notion de **particules ponctuelles** (qui deviennent des cordes vibrantes, fermées ou ouvertes).

La théorie des boucles reconstruit un espace-temps composé d’«**atomes**» de surface ou de volume.

Ce sont actuellement les théories les plus avancées sur la voie de la gravitation quantique, mais ce ne sont pas les seules.

Mais pour l’instant, aucune de ces deux théories n’a produit de résultat contredisant la relativité générale ou la théorie quantique des champs…

Les deux grandes aventures intellectuelles de la physique, l’écriture d’une histoire de l’univers et celle de l’inventaire des particules et des interactions élémentaires, s’enrichissent continuellement l’une l’autre.

Inflation, matière noire, énergie noire sont autant d’ingrédients mal identifiés de la recette cosmique. De quelque côté que viennent les premiers éléments de réponse, ils contribueront à éclairer et changer notre vision.

Après les révolutions conceptuelles de la relativité restreinte (1905), de la relativité générale (1915), de la théorie quantique (1920) il est probable que le 21ième siècle apportera de nouveaux bouleversements dans notre compréhension du cosmos.

Et cependant la plupart de nos contemporains pensent et vivent le monde selon les schémas élaborés entre le17ème et le 19ème siècle.

Le fait que que «la séparation entre passé, présent et avenir, ne soit qu’une illusion, si tenace soit elle, le fait qu’il n’existe ni temps absolu, ni espace absolu reste ignoré de la plupart de nos compagnons de voyage terriens.

**Diapo 71 Et l’antimatière?**

La majorité des physiciens, mais pas tous, pense que les atomes d’anti-hydrogène «tombent comme ceux d’hydrogène» mais patience… on devrait bientôt en savoir davantage.

Le CERN essaie de faire tomber des atomes d’anti-hydrogène lents, très difficiles à produire…

**Diapo 72**

La relativité générale et la théorie des champs quantiques décrivent, à travers le modèle standard de la cosmologie, une histoire plausible de notre univers.

**Diapo 73**

100 ans après, la relativité générale a passé tous les tests avec succès.

La relativité générale a fait des prédictions de phénomènes nouveaux:

- **Les** **trous noirs**

- **Caractère dynamique de l'Univers**

- **Le rayonnement gravitationnel**

Elle a permis de décrire la première ébauche de l’histoire de notre histoire d’univers, résumée dans le modèle standard cosmologique.

Dit plus précisément, elle a permis de découvrir non pas que notre univers a une histoire mais **qu’il est une histoire, dont le début coïncide avec la naissance commune de l’énergie-matière, de l’espace-temps et qui est en évolution**.

**Diapo 74**

Plus on regarde des objets lointains, plus on les voit dans le passé.

L’univers que nous observons diffère de plus en plus de l’univers qui nous entoure.

Le passé fini et la vitesse finie de la lumière imposent un horizon à nos **observations** alors que l’univers réel n’en a peut-être pas.

Il y a environ 10²² soleils dans notre horizon **observable** (une boule de 40 milliards d’années-lumière) Dans la plupart des directions, il n’y a pas, ou pas encore, ou il n’y a déjà plus d’astre entre nous et l’horizon!

C’est l’explication… de la nuit!

**Diapo 75 Machado**

Voyageur, il n’y a pas de chemin

C’est en marchant qu’on fait le chemin…

Voyageur il n’y a pas de chemin

Et pourtant il faut aller voir les étoiles se coucher dans la mer!

**Diapo 76 COMPLEMENTS**

Matière noire

Energie noire

Trous noirs

Distances et univers observable

Gravitons et Relativité Générale

**Diapo 77**

Zwicky et la matière noire

**Diapo 78**

Les galaxies tournent trop vite!

Les étoiles périphériques des galaxies tournent plus vite que ne l’indique la quantité de matière observée.

Les galaxies contiennent beaucoup de matière non observée!

**Diapo 79**

Il faut de la matière noire!

**Diapo 80** **RESUME Matière noire**

**Diapo 81**

Energie noire et matière noire

**Diapo 82**

L’énergie noire

Simplement la constante cosmologique?

L’énergie de l’espace-temps vide ou une nouvelle forme d’énergie?

**Diapo 83**

Alors, qu’en pensez-vous?

**Diapo 84**

Histoire des trous noirs

**Diapo 85**

Formation d’un trou noir stellaire

**Diapo 86**

Interstellar

**Diapo 87 TROUS DE VER**

Un trou de ver est une structure de l’espace-temps, qui relie deux régions distinctes, constituant ainsi un “raccourci”.

Bien qu’hypothétique, il s’agit d’une solution possible des équations de la relativité générale.

Un trou de ver se distingue d’un trou noir par l’absence d’horizon : on peut en sortir en faisant demi-tour.

Objections:

**Sa stabilité exige une forme inconnue de matière-énergie** (à densité négative) sur les parois du trou de ver.

On n’a pas réussi à imaginer encore de **processus astrophysique pour sa formation**.

**Diapo 88** Orbites autour d’un trou noir

**Diapo 89** Que se passe-t-il à la «surface» d’un trou noir?

**Diapo 90** Estimer les distances cosmiques…

**Diapo 91** Distances

**Diapo 92** Quelle est la taille de l’Univers observable aujourd’hui ?

**Diapo 93** Giordano Bruno

Repères galiléens

**Diapo 94 Force ou échange de particule?**

Ce n’est qu’une analogie, comme celle que nous avons vue avec les géométries non euclidiennes qui rapprochent ou éloignent les corps…

GRAVITON ET RELATIVITE

La gravitation est fondamentalement différente des autres interactions fondamentales, dont la description fait appel à des champs et des particules.

Les forces électromagnétiques, faibles et fortes sont décrites par la physique des particules sont toutes décrites par l’échange de particules de spin 1.

Le graviton de la relativité générale, s’il existe, serait une particule de spin 2 qui offre moins de liberté et rend la théorie essentiellement unique et sans autre paramètre à ajuster que la constante universelle de gravitation.

Actuellement,, on ne sait pas construire de théorie quantique avec plusieurs particules de spin 2.

Mais la différence est aussi quantitative : ainsi, l’attraction gravitationnelle entre deux protons est de 42 ordres de grandeur plus faible que leur répulsion électrique. On serait donc naturellement amenés à conclure que des mesures précises au quarantième chiffre après la virgule vont être nécessaires pour nous renseigner sur la nature profonde de la gravité.

Cette conclusion repose sur une hypothèse forte, à savoir que les lois de la gravitation telles que nous les connaissons depuis Einstein s’appliqueraient inchangées aussi bien aux superamas de galaxies distants de plusieurs mégaparsecs, soit quelque 10^23 m, qu’aux quarks distants, eux, de seulement 10-18 m.

En fait, notre connaissance empirique de la gravité se cantonne à des distances comprises entre 10^13 m (la taille du système solaire) et 10-4 m.

Cette constatation a conduit certains théoriciens à postuler qu’il pourrait exister des dimensions supplémentaires d’espace dans lesquelles seuls les gravitons seraient libres de se propager.

Le comportement des interactions gravitationnelles à petite distance s’en trouverait alors profondément modifié et pourrait même devenir quantique à des distances de l’ordre de 10-19 m, domaine accessible au LHC du CERN.

**Diapo 95**

Si les gravitons m’étaient contés (ou comptés…)

**Diapo 96 Le miracle relativiste**

La mécanique quantique classique se base sur la version de Hamilton de la mécanique classique,

Elle a permis d’interpréter les niveaux d’énergie des électrons dans les atomes et, dans les cas les plus simples de les calculer avec une bonne précision.

Des écarts observés à la théorie ont conduit Pauli à introduire un nombre quantique supplémentaire, le **spin,** qui joue un rôle fondamental dans le comportement des particules.

En 1928, après plusieurs tentatives infructueuses (Klein, Gordon), Dirac, un jeune mathématicien et physicien prouve que la théorie du spin de Pauli n’est qu’une conséquence de l’intégration de la **relativité restreinte** dans les équations de la **mécanique quantique**.

Ses équations, non seulement donnent les valeurs exactes du **spin de l’électron** mais annoncent **l’existence de l’antimatière**, avec plusieurs années d’avance sur sa découverte en 1936.

C’est la théorie de Dirac qui est à la source de notre meilleure théorie actuelle de la matière, la Théorie des Champs Quantiques, synthétisée dans le Modèle Standard de la Physique des particules.

**Diapo 97**

La mécanique quantique a permis de reconstituer la naissance des éléments chimiques et leur abondance relative avec une bonne précision.

Les derniers éléments dont la formation n’était pas comprise peuvent apparaitre lors de la fusion d’étoiles à neutrons, comme celle observée récemmment…