

CLUB D'ASTRONOMIE QUASAR 95

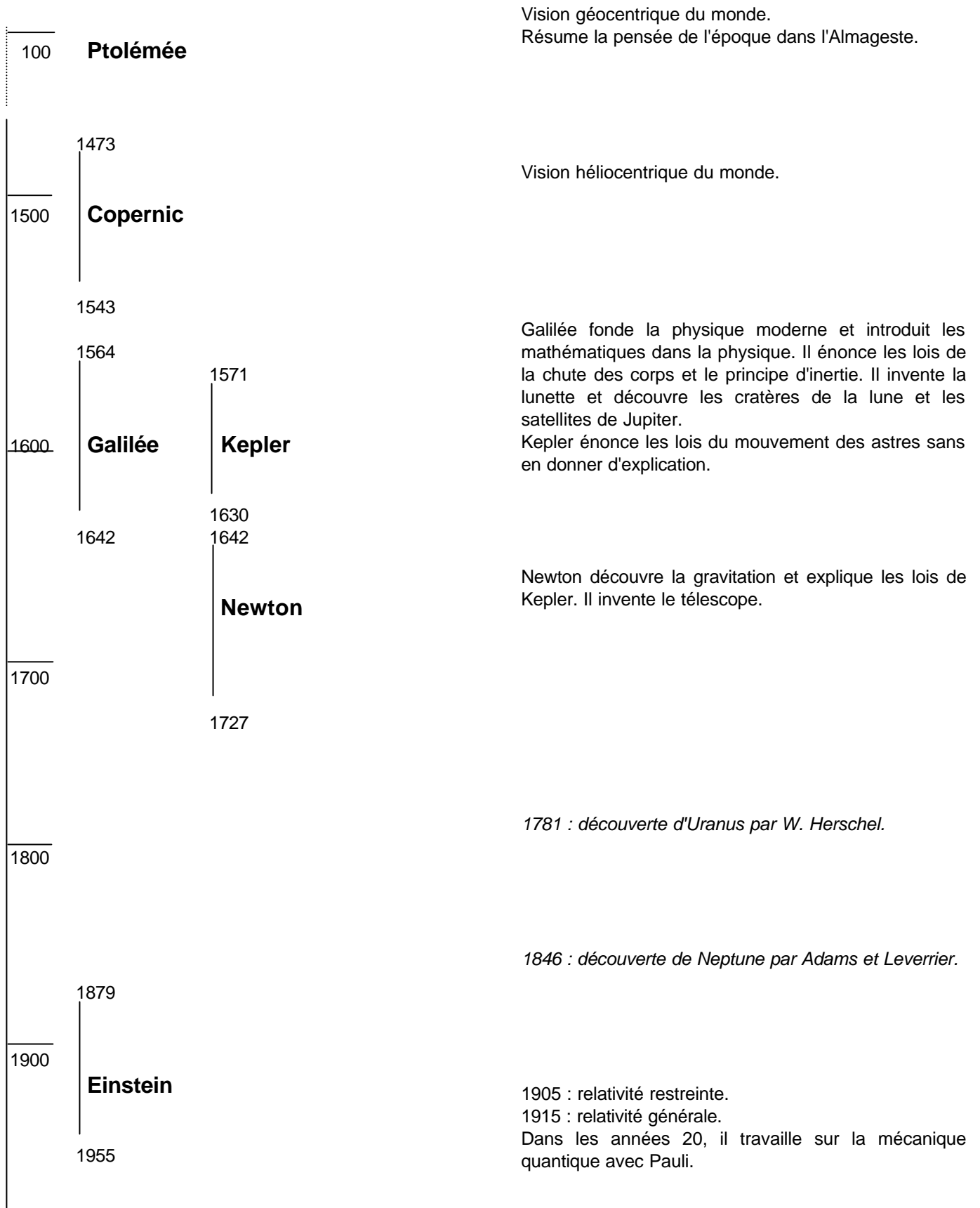
EINSTEIN ET LA RELATIVITE

Sommaire

1	Contexte historique	3
1 - 1	Albert Einstein	4
1 - 2	Connaissance de l'univers avant Einstein	4
1 - 3	Les coups de génie d'Einstein	4
2	Le relativité restreinte	5
2 - 1	La géométrie Euclidienne	5
2 - 2	L'espace et le temps dans la mécanique classique.....	5
2 - 3	Le principe de relativité.....	5
2 - 4	Le théorème d'addition des vitesses selon la mécanique classique	5
2 - 5	La loi de propagation de la lumière	6
2 - 6	La notion de simultanéité	6
2 - 7	La notion de distance spatiale	6
2 - 8	En résumé.....	6
2 - 9	La transformation de Lorentz	7
2 - 10	Le comportement des règles et des horloges	7
2 - 11	Le théorème d'addition des vitesses selon la relativité restreinte.....	8
2 - 12	$E = m c^2$	8
2 - 13	Le paradoxe des jumeaux	8
3	La relativité générale.....	9
3 - 1	Le champ de gravitation	9
3 - 2	L'équivalence accélération-gravité.....	9
3 - 3	Le comportement des règles et des horloges sur un corps en rotation.....	9
3 - 4	Le mouvement des astres vus par la relativité générale.....	10
3 - 5	Réflexions sur l'univers	11
3 - 6	La constante cosmologique.....	11
3 - 7	Les destins de l'univers	11
3 - 8	Retour à la case départ.....	11
4	Les prédictions réussies de la relativité	12
4 - 1	La déviation de la lumière	12
4 - 2	L'avance du périhélie de Mercure.....	12
4 - 3	Le déplacement des raies spectrales	12
4 - 4	Le ralentissement des horloges	12
4 - 5	Les mirages gravitationnels	12
4 - 6	Les trous noirs	12

EINSTEIN ET LA RELATIVITE

1 - CONTEXTE HISTORIQUE



1 - 1 Albert Einstein (1879 - 1955)

Dates marquantes :

1905	Publication de 3 théories :	<ol style="list-style-type: none">1 Mouvement brownien des molécules et atomes.2 Effet photo-électrique et nouvelles hypothèses sur la nature de la lumière.3 Relativité restreinte.
1915	Relativité générale.	
1919	Première validation de sa théorie : courbure de la lumière.	
1921	Prix Nobel de physique pour ses études sur l'effet photo-électrique.	
1920-1925	Participation modeste à l'élaboration de la mécanique quantique.	

1 - 2 Connaissance de l'univers avant Einstein

Connaissance limitée du monde macroscopique (infiniment grand et échelle humaine) → lois de Newton.

Connaissance rudimentaire de l'infiniment petit.

La théorie de Newton semble expliquer toutes les lois de l'univers mais laisse dans l'ombre quelques faits inexplicables.

1 - 3 Les coups de génie d'Einstein

- 1 Reconnaissance de la constance de la vitesse de la lumière dans le vide comme vitesse maximale autorisée dans l'univers.
- 2 Equivalence Espace et temps.
- 3 Equivalence Matière et Energie.
- 4 Equivalence Accélération et gravité.

2 - LA RELATIVITE RESTREINTE

2 - 1 La géométrie Euclidienne

Elle est basée sur des notions fondamentales telles que la droite, le plan, à partir d'axiomes. Par exemple : par 2 points passe une droite et une seule. Un axiome n'est pas démontré. La géométrie Euclidienne traite des droites comme étant définies par 2 points. La vérité de ce principe n'est valable que dans le cadre de cette géométrie. Cette représentation est si profondément inscrite dans notre esprit que nous la considérons vraie.

On parle ainsi de distance comme étant la longueur qui sépare deux points sur cette droite (sur un corps rigide).

La mesure de cette distance est le nombre de fois que l'on doit reporter une autre droite unité pour atteindre la distance à mesurer.

Le repérage d'un point dans l'espace se fait en mesurant les distances rapportées à 3 axes perpendiculaires. On a affaire à un système de coordonnées Cartésien composé de 3 plans perpendiculaires.

2 - 2 L'espace et le temps dans la mécanique classique

"La mécanique décrit comment les corps changent de lieu avec le temps"

Nous allons prendre un abonnement dans un train qui nous servira à de multiples expériences. Ce train roule à une vitesse constante et en ligne droite (mouvement de translation uniforme).

Laissons tomber une pierre tenue dans notre main, sur le sol du wagon. Elle tombe en ligne droite. Mais un observateur situé sur le talus verra la pierre tomber en décrivant une parabole.

La trajectoire que la pierre décrit réellement est-elle une droite ou une parabole ?

La question n'a de sens que si l'on décrit le système de coordonnées de référence. Si celui-ci est le train, la trajectoire est une droite. Si la référence est le talus, c'est une parabole. Il n'y a pas de trajectoire en soi mais par rapport à un corps de référence déterminé.

2 - 3 Le principe de relativité (au sens restreint)

Supposons un oiseau volant avec un mouvement rectiligne et uniforme dans le sens de la marche du train, le long de la voie. Pour l'observateur du talus, la vitesse et la direction de l'oiseau seront différentes de celles notées par le voyageur, mais il restera rectiligne et uniforme.

Le principe de relativité affirme que les phénomènes de la nature se déroulent selon les mêmes lois quel que soit le système de référence envisagé. Seule la façon de les décrire peut varier.

2 - 4 Le théorème d'addition des vitesses selon la mécanique classique

Supposons que le train roule à une vitesse $v = 100$ km/h et qu'un homme se déplace dans le wagon, dans le sens de la marche à la vitesse $w = 4$ km/h.

Quelle est sa vitesse W par rapport au talus ?

$$W = w + v \quad \text{soit } 100 + 4 = 104 \text{ km/h}$$

Nous verrons par la suite que cette loi d'addition des vitesses n'est pas tout à fait exacte.

2 - 5 La loi de la propagation de la lumière

Chacun sait, ou croit savoir, que la lumière se propage dans le vide en ligne droite à la vitesse c de 300 000 km/s. Ce phénomène doit, comme tout autre, être rapporté à une référence. Prenons notre talus comme système de référence rigide.

Supposons un rayon lumineux envoyé le long du talus, depuis celui-ci en direction de la marche du train. Le rayon se propage à la vitesse c par rapport à l'observateur du talus.

Quelle est la vitesse W du rayon lumineux par rapport à l'observateur du wagon roulant à 100 km/h ?

Réponse selon la mécanique classique : $W = c - v$

De même, un rayon lumineux projeté de l'intérieur du train dans le sens de la marche aurait une vitesse $W = c + v$, vue par l'observateur du talus.

Ceci contredit le principe de relativité qui précise, dans ce cas, que la vitesse de la lumière est constante quelle que soit la référence choisie. Doit-on rejeter le principe de relativité ou la loi de propagation de la lumière ? La "théorie de la relativité restreinte" permet de conserver les deux principes.

2 - 6 La notion de simultanéité

Supposons un orage au-dessus de notre voie ferrée, sans train. Deux éclairs tombent au même moment sur deux points de la voie A et B situés à égale distance de l'observateur du talus situé en M. Celui-ci observera la lumière des deux éclairs simultanément.

Considérons maintenant la position de l'observateur dans le train roulant dans le sens de A vers B. Au moment de l'impact des éclairs, il se situe au point M' qui coïncide avec le point M du talus. Pendant le temps mis par la lumière des éclairs pour arriver des points d'impact A et B au point M', le train a parcouru une certaine distance. Le point M' s'est décalé vers B. L'observateur du train verra l'impact B avant l'impact A. Il n'y a plus simultanéité.

La simultanéité n'a de sens que si l'on décrit le système de référence.

Chaque système a donc son temps propre, contrairement à ce qu'affirme la physique classique.

2 - 7 La notion de distance spatiale

Prenons 2 points sur le train : le milieu du premier wagon (Point A) et celui du dernier (Point B). Faisons mesurer cette distance par l'occupant du train en reportant x fois la règle unité. Essayons maintenant par rapport au talus en reportant à un instant donné les points A et B par leur équivalent sur le talus.

Rien ne prouve que cette nouvelle mesure corresponde à la première car la simultanéité du report des points A et B sur le talus n'est pas évidente. Le signal donné en A pour ce report mettra un certain temps pour arriver en B, temps pendant lequel le train aura avancé !

2 - 8 En résumé

Nous savons maintenant que chaque système de référence a son temps propre (2 - 6) et sa mesure des distances propre (2 - 7).

Les lois de la mécanique classique :

- La mesure du temps est indépendante de l'état de mouvement du système de référence.
- La mesure des distances est indépendante de l'état de mouvement du système de référence.

sont donc fausses. La nouvelle théorie lève les ambiguïtés rencontrées précédemment.

Il faut trouver un moyen de passer d'un système à l'autre en conservant intactes les lois de la nature. Ce passage s'appelle la "Transformation de Lorentz"

2 - 9 La transformation de Lorentz

Considérons nos deux systèmes de référence. Au talus correspond le système de coordonnées K et au train en mouvement, le système K'. Tout événement est déterminé :

dans K par les coordonnées x, y, z, t
 dans K' par les coordonnées x', y', z', t'

Généralisons le système talus-train à 2 dimensions, à l'espace à 3 dimensions + une dimension temps (t et t').

Dans le cas du train, on passe de K à K' par les équations :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ou } v \text{ est la vitesse du train et } c \text{ celle de la lumière.}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En mécanique classique, on a :

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

2 - 10 Le comportement des règles et des horloges

Plaçons une règle de 1 m sur la voie (K). L'origine de la règle est à x = 0 et la fin à x = 1 m.

Quelle est sa longueur vue par l'observateur du train en mouvement (K'). La transformation de Lorentz donne pour l'origine $x = 0 \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ et pour la fin $x = 1 \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. La règle mesure donc

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

La règle en mouvement est donc plus courte que la règle au repos et d'autant plus courte que le mouvement est rapide. **Les distances raccourcissent**. Si v = c, alors la mesure donne zéro ! Cette longueur est imaginaire (au sens mathématique comme au sens propre) si v > c, ce qui est impossible dans l'état actuel de nos connaissances.

De même, pour une horloge battant la seconde embarquée dans le train (K'), l'espace de temps entre 2 battements, par rapport au talus n'est pas d'une seconde mais de $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ seconde, c'est-à-dire

un peu plus qu'une seconde.

Par suite de son mouvement, l'horloge marche plus lentement que si elle est au repos, et d'autant plus lentement que son mouvement est rapide. **Le temps s'allonge.**

Dans la pratique, il est difficile de communiquer aux règles et aux horloges des vitesses telles que les écarts de distance et de temps entre les deux systèmes de coordonnées soient mesurables.

2 - 11 **Le théorème de l'addition des vitesses** selon la théorie de la relativité restreinte

En appliquant les transformations de Lorentz au théorème de l'addition des vitesses, on obtient la relation suivante :

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}} \quad \text{au lieu de } W = v + w$$

Pour le marcheur dans le train, on trouve dans le premier cas 104 km/h à 10^{-16} près.

Pour le rayon lumineux tiré du train dans le sens de celui-ci et vu du talus, si $v = c$ et $w = 300$ km/s

soit $\frac{c}{1000}$ (Super TGV !) :

$$W = \frac{c + \frac{c}{1000}}{1 + \frac{c \times \frac{c}{1000}}{c^2}} = \frac{c \left(1 + \frac{1}{1000}\right)}{1 + \frac{1}{1000}} = c \quad \text{au lieu de } W = c + \frac{c}{1000}$$

Avec la théorie de la relativité restreinte, la vitesse de la lumière est bien une constante, quel que soit le système de référence envisagé.

2 - 12 **E = m c²**

Cette équation connue de tous est issue de considérations mathématiques de la notion d'énergie cinétique et a été mise en évidence par Einstein.

Elle fait apparaître l'équivalence entre l'énergie E et la masse m (c étant la vitesse de la lumière). Elle démontre que l'énergie, c'est de la masse, donc de la matière et inversement. On peut créer de la matière à partir d'énergie et de l'énergie à partir de la matière.

Cette notion importante d'équivalence masse-énergie est à l'origine de l'industrie nucléaire dans laquelle une quantité infime de matière est transformée en une quantité énorme d'énergie.

Elle est également la source d'énergie des étoiles.

2 - 13 **Le paradoxe des jumeaux** ou paradoxe de Langevin

Prenons deux jumeaux âgés de 20 ans, Rémi et Eloi. Rémi embarque à bord d'une fusée pour un voyage en ligne droite à vitesse constante le menant jusqu'à une planète située à 7 années-lumière de la Terre. L'engin le propulse à 99% de la vitesse de la lumière, soit à 296 794 km/s. Une fois arrivé à destination, il effectue un demi-tour instantané et s'en retourne en sens inverse à la même vitesse.

Eloi, resté sur Terre, constate à son retour que Rémi a 12 ans de moins que lui. Eloi a 34 ans (le voyage a duré 2 fois 7 ans) et Rémi en a 22 (pour lui, le voyage a duré 2 ans). Les frères ne sont plus jumeaux.

Mais le paradoxe n'est pas là.

Si l'on en croit le principe de relativité, le point de vue sur lequel on se place ne modifie pas un phénomène physique. Les deux frères sont en mouvement relatif et l'on peut dire que c'est Eloi, sur

Terre, qui s'éloigne de la fusée de son frère et c'est donc Eloi qui voyage, et Rémi qui reste immobile dans son référentiel. Au bout du voyage, on peut aussi dire, de ce point de vue, qu'Eloi a 22 ans et Rémi 34 !

Le paradoxe s'explique par le fait que la fusée, pour atteindre 99% de la vitesse de la lumière, a besoin d'être accéléré (positivement ou négativement) au départ, au demi-tour et à l'arrivée. Ces accélérations, seule la fusée la ressent, pas la Terre. La situation n'est donc pas symétrique.

3 - LA RELATIVITE GENERALE

La théorie précédemment décrite est dite restreinte car elle s'applique à des systèmes de coordonnées en mouvement rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. La théorie de la relativité générale introduit les mouvements de rotation et les variations de vitesse dans les mouvements considérés, donc envisage les mouvements quelconques.

Dans le cas de notre train se déplaçant de façon uniforme et rectiligne, on peut dire que le talus est en mouvement et le train est au repos. La sensation de repos est réelle pour le voyageur, il ne ressent pas le mouvement. Il n'en est pas de même si le train aborde une courbe ou s'il freine.

3 - 1 Le champ de gravitation

Laissons tomber au sol une pierre tenue dans notre main. L'action de la Terre sur la pierre, selon Newton est indirecte. La Terre engendre dans son voisinage un champ de gravitation qui lui-même agit sur la pierre et provoque sa chute. Cette action est d'autant plus faible que l'objet est éloigné de la Terre.

La loi qui régit la chute d'un corps est indépendante de la nature de celui-ci. L'accélération, qui décrit la variation de la vitesse, est la même pour un morceau de plomb et pour un morceau de bois.

3 - 2 L'équivalence accélération-gravité

Imaginons une boîte de la dimension d'une chambre et située dans l'espace, loin de toute influence gravitationnelle. Plaçons-y un observateur. Pour lui, la pesanteur n'existe pas.

Fixons sur le toit de la boîte un crochet auquel est attachée une corde. Un être extraterrestre tire sur cette corde avec une force constante. La boîte et l'observateur s'envolent d'un mouvement uniformément accéléré vers le "haut".

Comment l'observateur juge-t-il l'événement ?

Il est projeté contre le plancher et doit absorber la pression avec ses jambes. Il se retrouve donc debout, tout comme sur Terre. S'il lâche un objet de sa main, l'accélération de la boîte n'est plus transmise à l'objet qui se rapprochera du plancher avec un mouvement relatif accéléré.

L'homme arrivera donc à la conclusion qu'il se trouve dans un champ de gravitation constant et qu'une planète ou une étoile n'est pas loin. Il pourra s'étonner de ne pas tomber dessus, mais en apercevant le crochet, il conclut qu'il est suspendu avec lui et reste immobile dans le champ de gravitation.

Il y a donc analogie entre accélération et gravité. Les deux phénomènes sont ressentis de la même manière.

Le principe de relativité est ainsi étendu aux mouvements non uniformes. En d'autres termes, la relativité générale intègre la gravitation.

3 - 3 Le comportement des règles et des horloges sur un corps en rotation

Considérons un observateur situé loin de toute influence, quelque part dans l'univers. C'est notre système de référence au repos (K). Soit un second système (K') représenté par une roue en rotation uniforme.

Un observateur assis en périphérie de la roue est soumis à la force centrifuge qui tend à l'éloigner du centre. Mais il peut se considérer au repos, debout sur la face interne de la roue, la tête dirigée vers le centre. Il peut interpréter la force qui agit sur lui comme l'effet d'un champ de gravité.

Cet observateur sur sa roue essaie de mesurer le temps. Il possède deux horloges identiques battant la seconde. Il place la première au centre et la deuxième en périphérie de la roue. Les deux horloges sont au repos par rapport à la roue.

Vues de l'extérieur, les deux horloges ont-elles la même vitesse ?

Non, car celle placée au centre a une vitesse nulle et celle de la périphérie est en mouvement de rotation uniforme, toujours vue de l'extérieur (K). Cette dernière marche donc plus lentement. L'homme de la roue, placé en son centre, observe le même phénomène.

Sur la roue, et plus généralement dans un champ de gravitation, une horloge marchera plus vite ou plus lentement selon la position qu'elle occupe au repos. On ne peut donc pas donner ici de définition précise du temps.

De même si l'on tente une mesure de la longueur de la circonférence de la roue, l'observateur extérieur verra cette longueur plus petite que l'observateur de la roue.

3 - 4 Les mouvements des astres vus par la relativité générale

Un corps pesant comme une étoile a un effet direct sur son environnement spatial et temporel (on dit spatio-temporel). Les corps passant à son voisinage sont accélérés et déviés.

L'interprétation du mouvement d'une planète autour de son étoile par exemple, vue par la relativité générale est la suivante :

L'univers est constitué par un maillage plat - l'espace-temps - (en 4 dimensions !) déformé par la masse des objets qui s'y trouve. Plus la masse de l'objet est grande, plus le maillage est déformé. Le champ de gravité déforme l'espace-temps à la manière simpliste (en 2 dimensions) d'une toile tendue sur laquelle sont posées des billes plus ou moins lourdes en guise d'étoiles. La toile se déforme autour de la bille qui plonge dans son trou. La toile est courbe au voisinage de la bille. Elle perd sa courbure à grande distance et devient plate.

Une géodésique est la ligne la plus courte joignant deux points d'une surface courbe. (Voir schéma) Une planète suit les géodésiques créées par son étoile. On peut dire que son mouvement est le plus court possible, si l'on considère la géométrie courbe dans laquelle elle évolue.

A grande distance, les théories de Newton et d'Einstein se rejoignent et les lois de Kepler décrivent admirablement bien le mouvement des planètes du système solaire (sauf pour Mercure). Il faut pour cela que le champ de gravitation de l'étoile soit relativement faible et que les vitesses soient loin de celle de la lumière (non relativistes).

Lorsque l'espace-temps est très déformé, au voisinage d'un pulsar ou d'un trou noir, les équations de Kepler sont insuffisantes pour décrire la réalité observée.

Pour Newton, les objets s'attirent du fait de leur masse. La lumière n'en possédant pas n'est pas déviée en passant auprès d'une étoile. Pour Einstein, la lumière suit les géodésiques de l'espace-temps courbe et est déviée. L'observation lui donnera raison dès 1919.

3 - 5 Réflexions sur l'univers

Si l'on en croit la théorie de Newton où toutes les masses s'attirent mutuellement, l'univers aurait une sorte de centre où la densité d'étoiles est maximale, cette densité diminuant à mesure que l'on avance du centre vers l'extérieur pour faire place, au loin, au vide infini. Le monde des étoiles constituerait une île finie plongée dans l'océan infini de l'espace. Ce n'est pas conforme à l'observation.

Einstein propose un monde fini et cependant non limité, à l'instar de la surface d'une sphère (finie) sur laquelle on peut marcher indéfiniment sans rencontrer de bord ni de limite. (Géométrie non euclidienne, courbe).

Cette idée repose sur la courbure de l'espace-temps refermé sur lui-même, engendré par la masse de l'univers.

Le calcul montre que si la matière est uniformément répartie, à grande échelle, l'univers est forcément sphérique. Il existe d'ailleurs une relation simple entre son rayon et sa masse.

Comme dans le détail, la matière n'est pas uniformément répartie, il sera localement déformé par rapport à la sphère et se présentera comme une orange globalement sphérique mais à la peau localement bosselée.

3 - 6 La Constante Cosmologique

Einstein croyait, jusque dans les années 20, que l'univers était en moyenne identique en tout point (à grande échelle), homogène et éternel.

Mais les équations de sa propre théorie refusent de lui donner raison. Elles donnent comme résultat un univers en expansion, donc avec une histoire. Tout de même persuadé d'avoir raison, il introduit dans ses équations un facteur qui compense cet effet d'expansion. Ce facteur s'appelle la Constante Cosmologique qu'il nomme lui-même "constante universelle pour l'instant inconnue".

Il aboutit ainsi à son univers parfait, statique et en équilibre.

Après les travaux de Humble qui démontra, avec d'autres, l'expansion de l'univers par l'éloignement des galaxies, il répudiera sa propre constante en admettant que ce terme constituait une complication inutile.

Aujourd'hui, aucune certitude n'apparaît sur la validité ou la valeur de cette constante qui resurgit néanmoins de ses cendres actuellement en expliquant un certain nombre d'anomalies de la théorie du Big-Bang, en particuliers l'âge de l'univers.

3 - 7 Les destins de l'univers

La courbure de l'univers prévoit 3 scénarios pour son futur. Ces scénarios dépendent uniquement de sa densité ρ_0 .

Si $\rho_0 > 3 \text{ protons} / \text{m}^3$ l'univers sera fermé et courbe. Après la période actuelle d'expansion, l'univers se contractera jusqu'au Big-Crunch.

Si $\rho_0 < 3 \text{ protons} / \text{m}^3$ l'univers est ouvert, éternel et courbe.

Si $\rho_0 = 3 \text{ protons} / \text{m}^3$ l'univers est en dilatation éternelle et tendra à devenir plat.

Le problème est que l'on ne connaît pas actuellement la densité de l'univers. On pense que les étoiles visibles ne représentent que le centième de la masse de l'univers.

3 - 8 Retour à la case départ

En alliant la relativité générale avec la théorie du Big-Bang et de l'expansion de l'univers, il apparaît que chaque galaxie s'éloigne de ses voisines des autres amas de façon homogène et symétrique.

Chacun de ces groupements de matière possède son temps propre, mais par le fait même de la symétrie de l'expansion, ces temps propres sont les mêmes pour tous. En admettant localement des

variations du temps, la relativité générale autorise la définition d'un temps commun appelé temps cosmique à l'échelle de l'univers tout entier.

Un temps qui ressemble au temps de ... Newton, fixe et immuable !

4 - LES PREDICTIONS REUSSIES DE LA RELATIVITE

4 - 1 La déviation de la lumière

Il a été dit que la lumière, comme tout corps, est déviée en passant à proximité d'un champ gravitationnel, en suivant les géodésiques.

Cette prédiction d'Einstein fut confirmée en 1919. Lors de l'éclipse du 28 mai, Sir Arthur Eddington observa au Brésil la déviation de la position des étoiles situées au bord du disque solaire. Les plaques photographiques montrèrent un décalage de 1,75 seconde d'arc, exactement le chiffre avancé par Einstein avant l'expérience.

4 - 2 L'avance du périhélie de Mercure

La théorie de Newton et les équations de Kepler n'expliquaient pas le décalage faible mais régulier du point où Mercure passe au plus près du soleil, son périhélie.

Le calcul de la trajectoire de la planète avec les équations de la relativité générale donna le résultat de 43 secondes d'arc par siècle, résultat connu depuis longtemps.

A noter que toute planète subit ce phénomène, d'autant plus fortement qu'elle est proche du soleil.

4 - 3 Le déplacement des raies spectrales

Le temps se ralentissant à proximité des champs gravitationnels, la longueur d'onde du rayonnement émis nous semble augmenter. Les raies des spectres des étoiles massives et denses sont donc décalées vers le rouge et ce d'autant plus que le champ gravitationnel est grand.

L'effet n'est pas mesurable pour le soleil (2 millièmes de la longueur d'onde !) mais a été mis en évidence pour le compagnon de Sirius.

S'il est faible, même pour les naines blanches, le décalage pourrait jouer un rôle important dans le cas des quasars.

4 - 4 Le ralentissement des horloges

Des horloges ultra-précises ont été embarquées dans deux avions tournant autour de la Terre en sens inverse. L'un additionnait sa vitesse à celle de la rotation de la planète, l'autre la soustrayait. La différence de marche des horloges prévue par la théorie fut confirmée par l'expérience.

4 - 5 Les mirages gravitationnels

Les lentilles gravitationnelles (ou mirages gravitationnels) sont une autre conséquence de la courbure de la lumière dans un champ de gravité.

Dans une lentille conventionnelle, la lumière est déviée et permet de grossir les objets situés derrière elle. De même, un amas important de matière (des galaxies) permet de grossir l'image d'un astre placé derrière, dans la ligne de visée. On obtient soit des arcs, soit des images multiples du même objet, soit les deux.

4 - 6 Les trous noirs

Les trous noirs sont des objets encore hypothétiques mais prévus par la théorie, dont la densité est telle que le champ de gravitation engendré courbe l'espace-temps jusqu'à une discontinuité. Il trouble l'espace-temps de sorte qu'aucun objet ne peut s'en échapper, pas même la lumière.

Imaginons un voyageur imprudent voulant pénétrer dans le trou noir, observé par un collègue moins téméraire resté loin du danger. Ce dernier aura l'impression que son compagnon progresse de plus en plus lentement. En fait, le temps se ralentira jusqu'à ne plus exister au niveau de la limite du trou noir. Il ne le verra jamais pénétrer.

Si le voyageur pouvait observer une horloge restée à l'extérieur, il verrait, en se rapprochant du trou noir, le mouvement des aiguilles s'accélérer de plus en plus. La théorie prévoit ensuite un changement de sens du mouvement des aiguilles en passant la limite du trou noir. Il remonterait alors le temps !