

The background of the slide is Salvador Dalí's famous 1931 painting, 'The Persistence of Memory'. It depicts a desolate, brown, hilly landscape under a pale, hazy sky. In the foreground, a wooden table holds a plate of orange jam and a small, round, golden clock. To the left, a large, gnarled, leafless tree stands. In the center, a pocket watch is draped over a branch, its face distorted and melting. To the right, a pocket watch is draped over a large, melting, human-like form. The painting is a masterpiece of Surrealism, exploring the fluidity of time and the subconscious.

Le Temps existe-t-il ?

Rappel sur les concepts d'espace, de temps et de mouvement



- ▶ La nature de ces concepts a été l'objet de nombreux débats depuis l'antiquité, en particulier les notions d'espace et de temps étant considérées comme indépendantes, et en général posées comme des concepts à priori de l'entendement.
- ▶ Pour le mouvement, conçu comme résultant d'une combinaison des deux, Aristote distinguait les mouvements « naturels » et les mouvements « violents ». Le mouvement naturel étant « en gros » associé à ce qu'on pourrait appeler le mouvement inertiel.
- ▶ Concernant l'espace, le concept de « lieu » distinguait localement l'horizontal, le « haut » et le « bas » (l'espace n'était ni isotrope ni homogène).

Rappel sur les concepts d'espace, de temps et de mouvement



- ▶ Nous avons trois concepts: Temps, espace, mouvement qui ne sont pas indépendants.
- ▶ Quels sont les concepts « premiers » parmi ces trois. En général le mouvement est considéré une composition de temps et d'espace, concepts intuitivement premiers à notre esprit.
- ▶ Et si c'était le mouvement, combinaison de temps et d'espace en mécanique classique, qui était « premier »?
- ▶ Physiquement c 'est la vitesse de la lumière, constante physique universelle, qui est prise comme référence pour définir le temps et l'espace (à partir d'une raie spectrale). Temps et espace sont des caractères différents dérivés , vus par des observateurs.

Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité

- ▶ La relativité restreinte s'appuie sur une hypothèse fondamentale: Les référentiels inertiels (galiléens), ceux où on ne ressent aucune contrainte (on flotte) sont tous équivalents (indiscernables) du point de vue de la physique (Les expériences de physique donneront le même résultat). On ne peut définir qu'un mouvement relatif. Pas de référentiel « absolu » comme en mécanique classique (L'éther).
- ▶ L'étude des contraintes associées à cette hypothèses détermine la forme des transformations (trouvées empiriquement par Lorentz) et fait apparaître un invariant de vitesse. Si cet invariant est infini, on peut séparer temps et espace et le temps a une existence propre. S'il n'est pas infini, c'est le cas en relativité, (la vitesse de la lumière est finie) alors cette séparation ne peut être qu'arbitraire et est non structurelle!

Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité

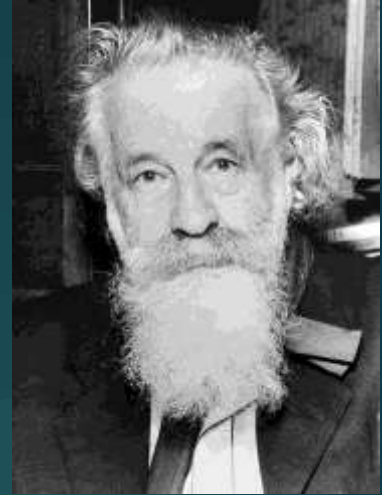


- ▶ On voit que la relativité bouscule la conception classique du temps en unifiant temps et espace dans un seul concept « l'espace-temps ». Le temps et l'espace ne sont plus des concepts indépendants mais des « apparences » résultant d'une situation.
- ▶ Minkowski, conscient du bouleversement apporté par son formalisme déclara en 1908: « L'espace et le temps, en tant que tels, sont condamnés à se réduire à de simples ombres et seule une sorte d'union des deux préservera une réalité indépendante ».

Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité

- ▶ On voit que c'est l'existence d'une vitesse limite qui est à l'origine du bouleversement du concept de temps.
- ▶ Cette limite de vitesse, qui paraît accessoire dans l'approche classique, est en fait la manifestation d'une propriété fondamentale dont les implications structurent notre univers.
- ▶ Elle se traduit par le fait que ce n'est ni le temps, ni l'espace qui sont des concepts premiers, mais quelque chose de plus complexe: L'espace-temps qui, comme la vitesse inclut de l'espace et du temps.
- ▶ Le fait que ce soit une vitesse (celle de la lumière- en fait des ondes électromagnétiques) qui soit pris comme référence pour définir le mètre et la seconde en est une illustration.

La pensée scientifique: Bachelard, “Le nouvel esprit scientifique”



- ▶ Quel crédit apporter à ces hypothèses contre-intuitives?
- ▶ Dans la proportion où une hypothèse a été reliée à l'expérience, elle doit être tenue pour aussi réelle que l'expérience. Pour interdire radicalement les conclusions d'une théorie, il faut que l'expérience nous expose les raisons de son opposition.
- ▶ Ainsi, dès qu'on médite l'action scientifique, on s'aperçoit que le réalisme et le rationalisme échangent sans fin leurs conseils.
- ▶ La véritable pensée scientifique est métaphysiquement inductive : Elle lit le complexe dans le simple, elle dit la loi à propos du fait, la règle à propos de l'exemple.

La pensée scientifique: Bachelard, “Le nouvel esprit scientifique”

- ▶ Mais le passage de la mécanique newtonienne à la mécanique relativiste montre qu'on a suivi une induction transcendante et non pas amplifiante car rien dans la mécanique classique ne préfigurait la mécanique relativiste, et la convergence en résultat pour les approximations en champ faible, statique n'est possible qu'au prix de mutilations et d'abandon de la physique relativiste.
- ▶ La nécessité de faire comprendre ces concepts déroutants car :
- ▶ La science ne vise pas seulement à « l'assimilation des choses entre elles », mais aussi, et avant tout, à l'assimilation des esprits entre eux.

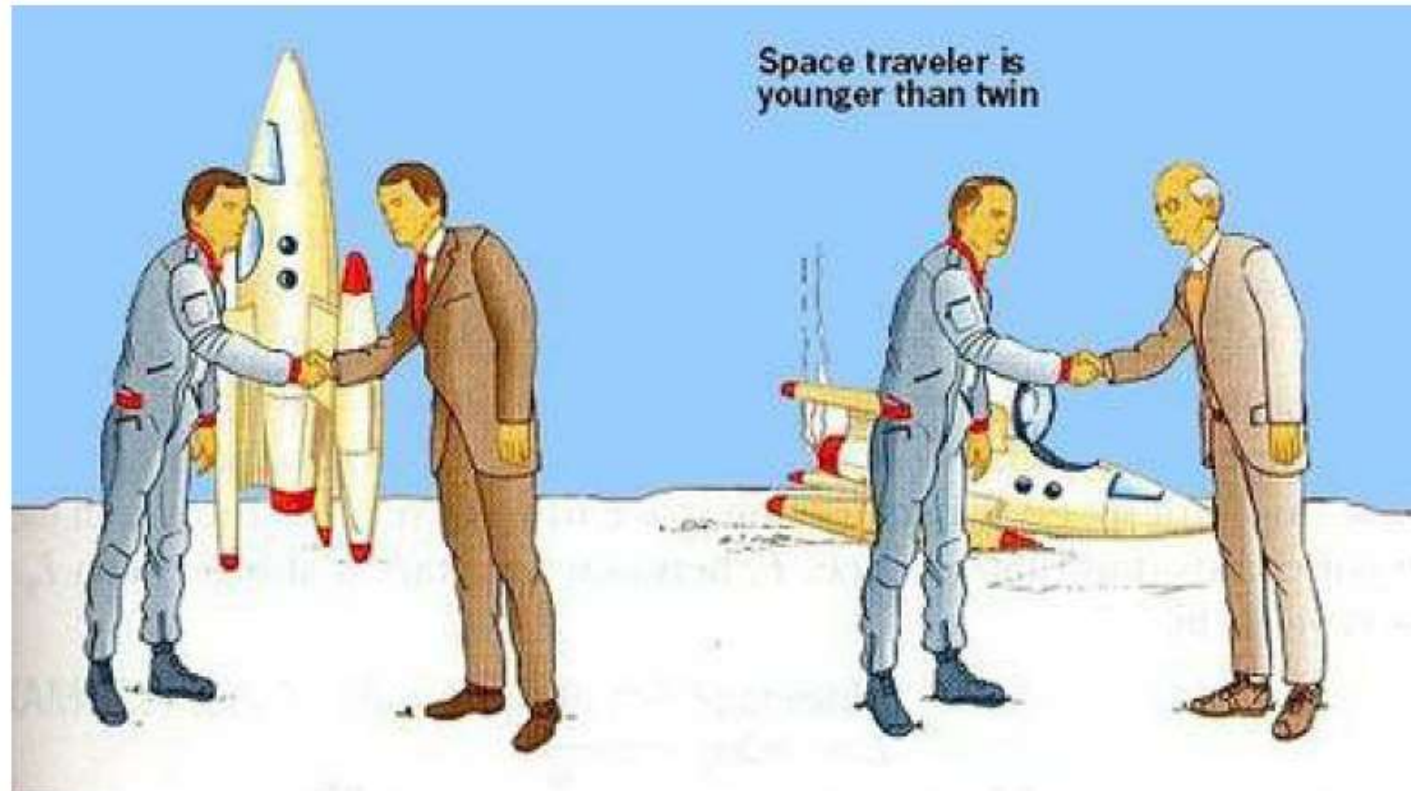
La fin du temps universel: Pourquoi cet effet ne se manifeste-t-il pas?

Paul Langevin, « L'évolution de l'espace et du temps », *Scientia*, n° 10, 1911, p. 31-54



- ▶ Langevin a énoncé un paradoxe, appelé, paradoxe des jumeaux, car pour le rendre plus spectaculaire on utilise des jumeaux.
- ▶ Bien entendu, cela marche aussi avec des faux jumeaux, des jumelles et même n'importe qui.
- ▶ Si cet effet ne semble pas se manifester, dans la vie courante, c'est qu'il est extrêmement faible. Il dépend de la vitesse (relative). Ainsi pour une vitesse de 100km/h il vaut 4.10^{-15} , soit une différence d'âge d'une seconde au bout de 10 millions d'années. A 60000 km/h, vitesse la plus élevée atteinte par un objet fabriqué par les humains (Voyager 1) c'est au bout de 20 ans. Il faut atteindre des vitesses proches de la vitesse de la lumière pour que cet effet soit sensible.

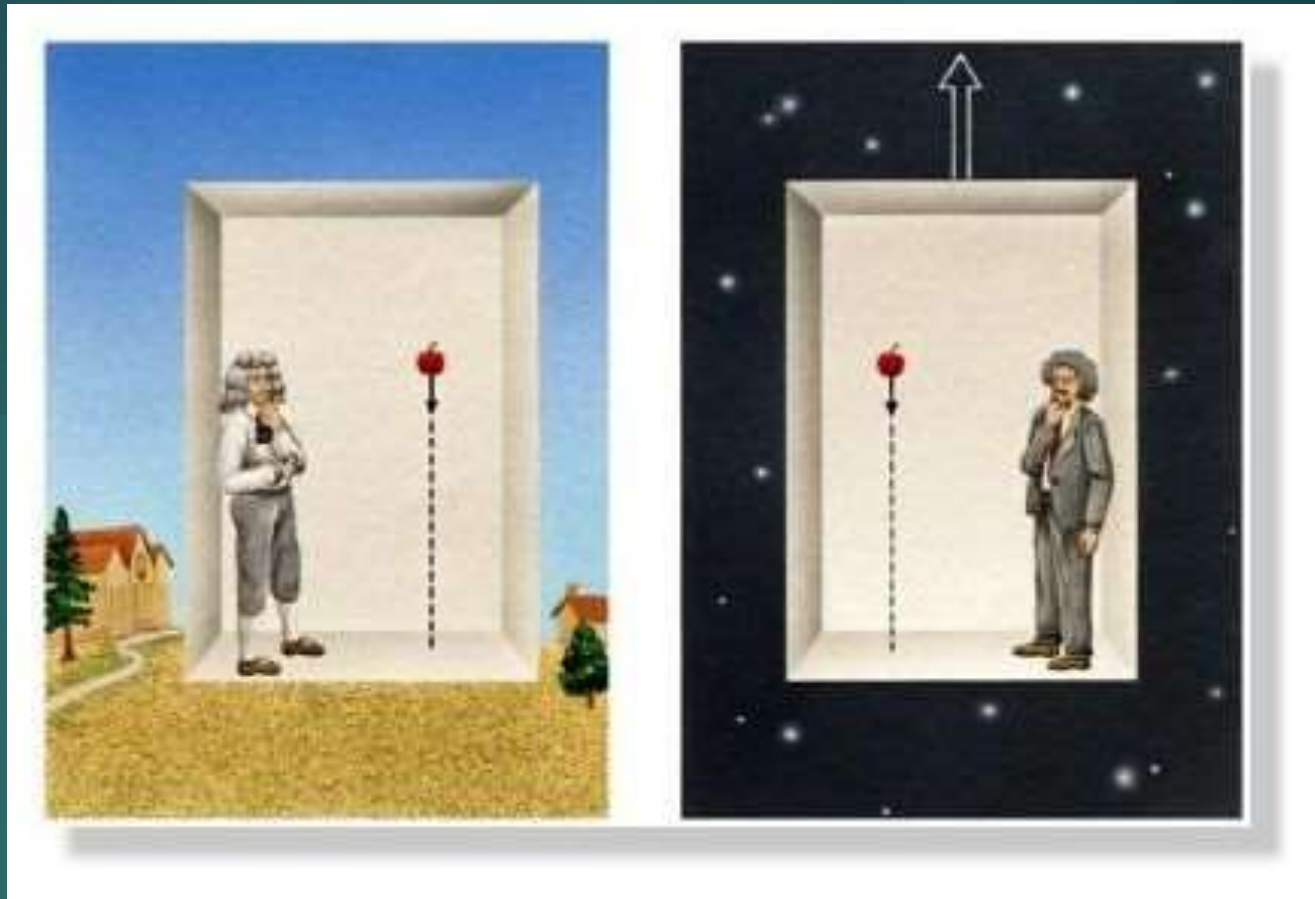
Le début de la fin du temps universel



Le paradoxe des jumeaux. © DR

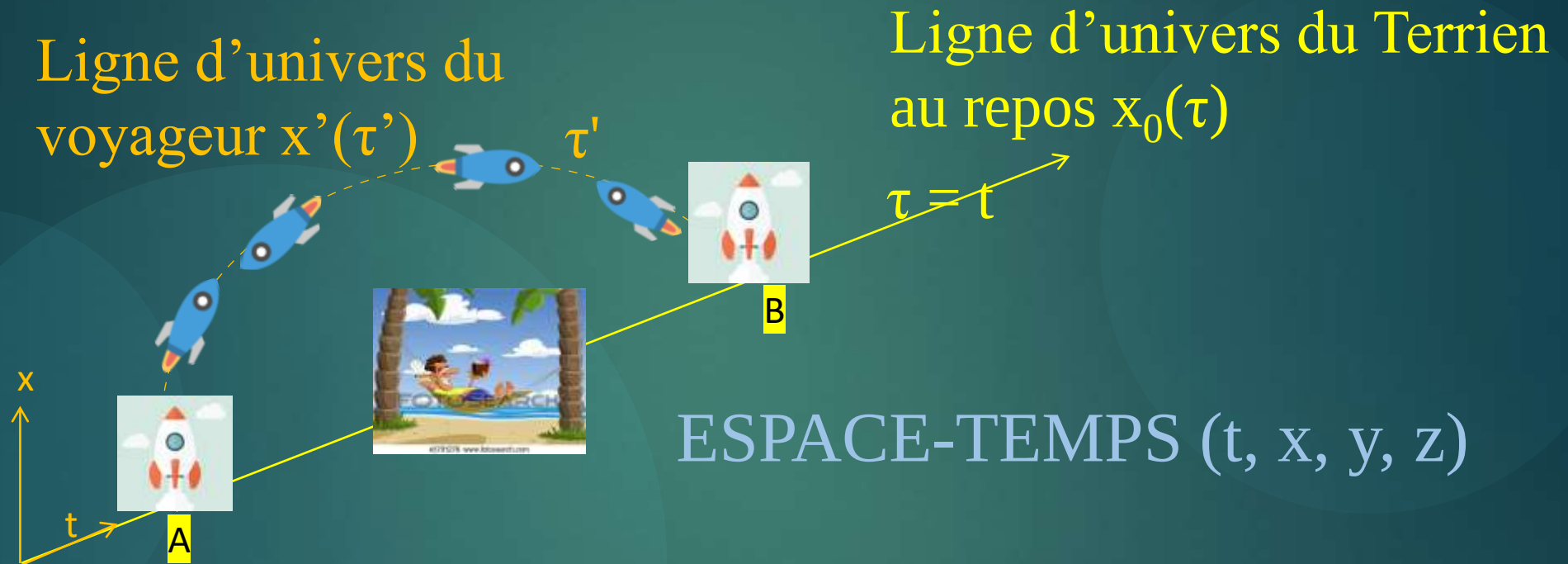
- La relativité signe la fin du temps universel et l'émergence de temps propres indépendants pour chaque ligne d'univers. Ceci est illustré ici par le célèbre paradoxe des « jumeaux » de Langevin où celui qui a voyagé a moins vieilli que celui resté sur Terre.

Le principe d'équivalence



Dans une fusée sans hublot, on ne peut pas savoir, par des expériences locales de physique, si la pomme tombe sous l'effet de l'attraction gravitationnelle d'une masse (figure de gauche) ou si c'est l'effet d'une accélération constante de même ampleur (figure de droite).

Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité



La métrique de la relativité restreinte $c^2 d\tau^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$ est hyperbolique à cause des signes « - ». La géométrie n'est pas euclidienne mais Lorentzienne. En représentation sur un support euclidien, les lignes les plus courtes sont les plus longues. Les lignes d'univers du Terrien et du voyageur, qui se séparent et se rejoignent sont balisées par leurs temps propres, τ et τ' , différents entre A et B.

Exemple concret du paradoxe de Langevin

- ▶ Supposons que la fusée du voyageur ait une accélération propre constante **$a = 1g$** ($9,81 \text{ m/sec}^2 = 32,7 \cdot 10^{-9}$ avec $c = 1$). D'après le principe d'équivalence c'est égal à la pesanteur sur Terre.
- ▶ Il part et accélère en s'éloignant pendant 10 ans de son temps propre, il atteint sa vitesse maximum d'éloignement (par rapport à la Terre) puis il retourne sa fusée et décélère pendant 10 ans, il atteint l'éloignement maximum de la Terre et commence à revenir.
- ▶ Au bout de 10 ans de ce trajet retour, il atteint sa vitesse maximum de rapprochement de la Terre, il retourne sa fusée (pour ralentir) ce qu'il fait pendant 10 ans pour arriver sur Terre à vitesse nulle.

Exemple du paradoxe de Langevin

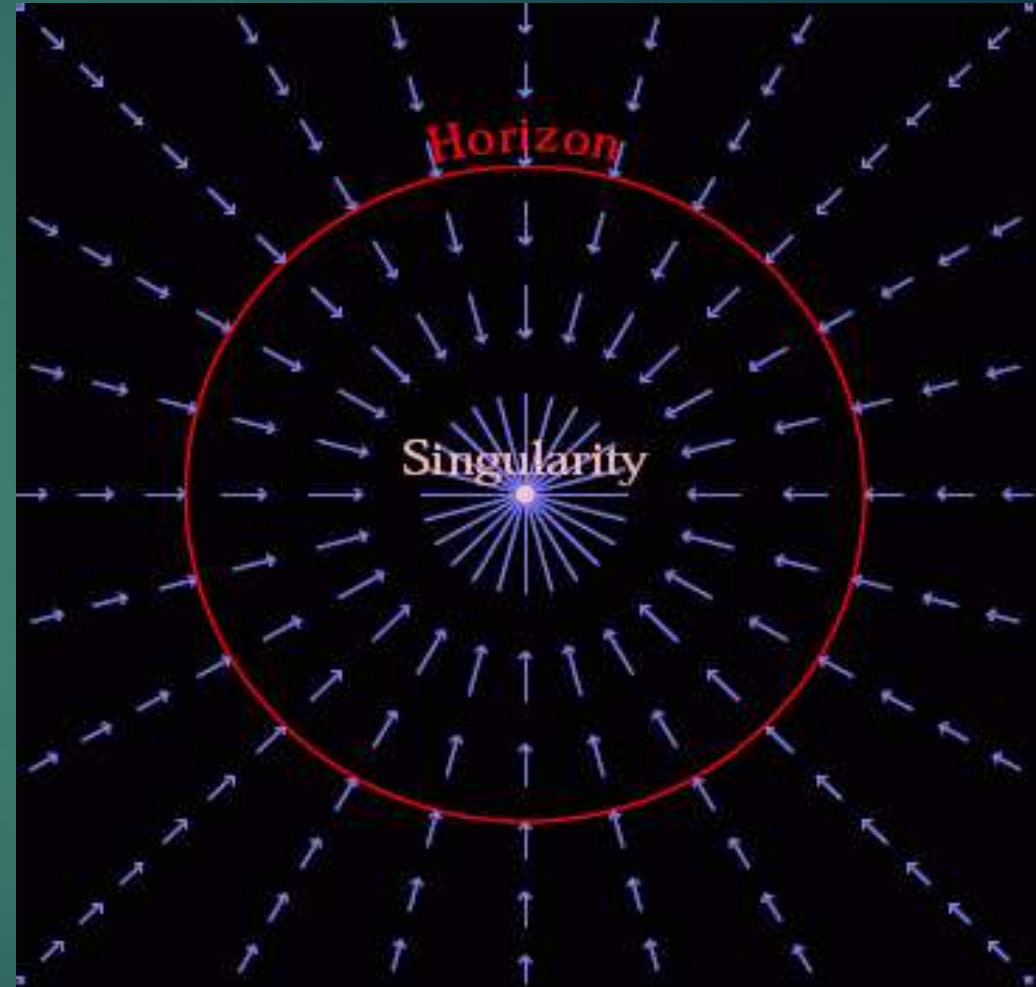
- ▶ Le calcul, $t(\tau) = \text{Sinh}(a.\tau)/a$ montre que pendant ces 40 ans de vie dans la fusée, sur Terre il s'est écoulé environ: 30 000 ans !!
- ▶ Si on calcule la distance maximum d'éloignement de la Terre de la fusée, au bout de 20 ans, donné par la formule , $x(\tau) = \text{Cosh}(a.\tau)/a$ on trouve environ: 15 000 années-lumière.
- ▶ Si le voyageur n'avait pas ralenti, au bout de 40 ans, s'il envoie un message à la Terre celui-ci sera reçu au bout de: $2 \cdot 10^{17}$ ans (millions de milliards d'années!) À une distance d'environ $2 \cdot 10^{17}$ années-lumière, bien au-delà de l'univers visible.
- ▶ Mais cela a un prix, l'énergie qu'il faut dépenser pour réaliser ce projet: Une quantité de carburant bien supérieure à la masse de l'univers, avec les moyens actuels et environ 10% de la masse de la Terre pour le moyen meilleur possible (gaz à vitesse lumière)

Le cas bien étrange du trou noir

Sous cet horizon, l'espace et le temps montrent des propriétés étranges.

- Le temps physique ne peut exister que par le mouvement ce qui montre que le temps et l'espace ne sont pas indépendants

- La singularité centrale correspond à une fin du temps (propre) pour un observateur qui l'atteindrait!



Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité



- ▶ Le mouvement (naturel), en relativité, est représenté de façon géométrique par les géodésiques de l'espace-temps.
- ▶ Si on considère en général la géodésique comme une ligne spatiale balisée par du temps, en relativité, ce qui est fondamental c'est la 4-vitesse de composantes U^μ , de module constant, ($U^\mu U_\mu = -1$), homogénéisation relativiste de la vitesse, 4-vecteur tangent à la ligne d'univers dont temps et espace sont les 4 degrés de liberté.
- ▶ Le mouvement « violent » résulte de l'action supplémentaire d'une cause autre que la gravitation.

La métrique en relativité restreinte

Métrique de la RR:

$$-c^2 d\tau^2 = ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

Qui sur des géodésiques en RR s'intègre en:

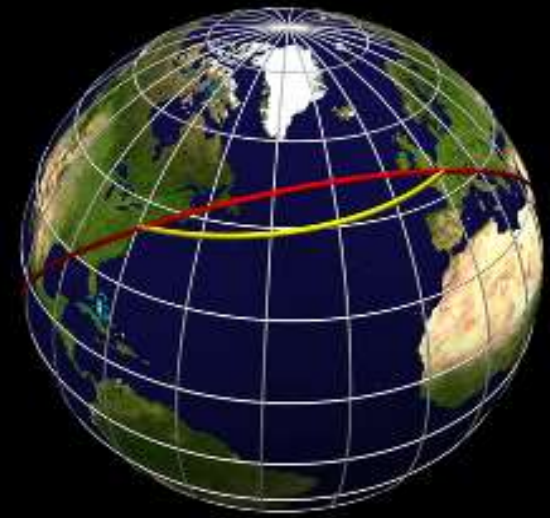
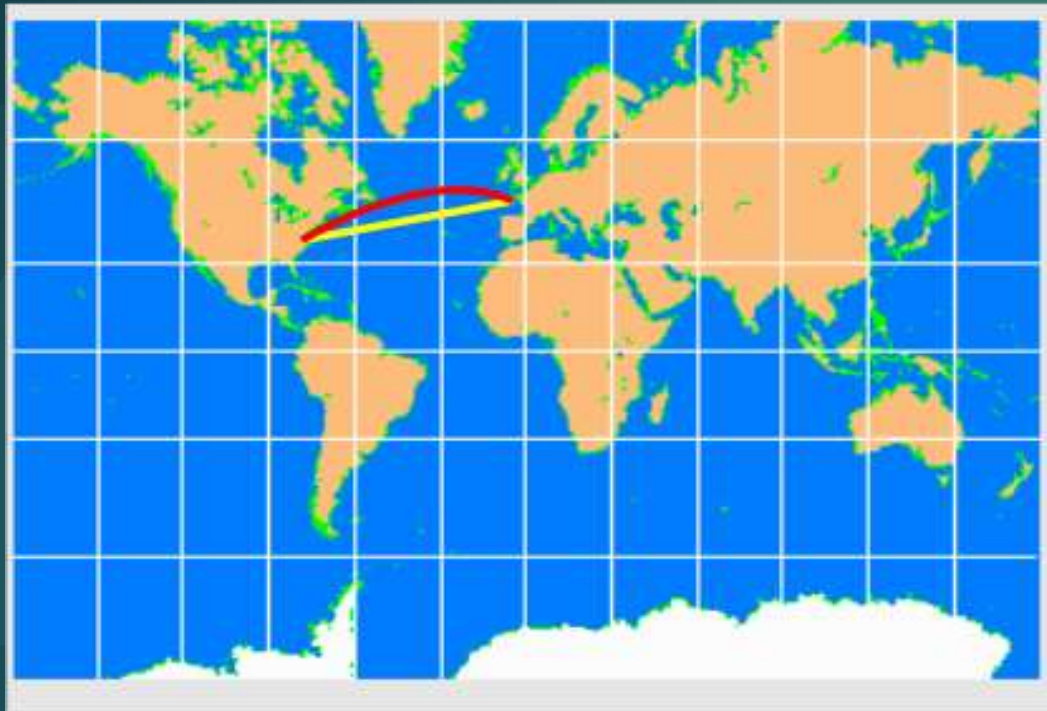
$$-c^2 \tau^2 = s^2 = -c^2 t^2 + x^2 + y^2 + z^2$$

C'est une métrique hyperbolique à cause du signe « - » sur la coordonnée temps. La géométrie n'est pas Euclidienne mais Lorentzienne. Sa représentation sur un support Euclidien est fausse, en particulier ce sont les lignes les plus longues de la représentation sur un diagramme Euclidien qui sont les plus courtes et vice-versa. Mais quand on le sait, on peut exploiter ces diagrammes (dits de Minkowski). C'est un problème général pour les géométries non euclidiennes.



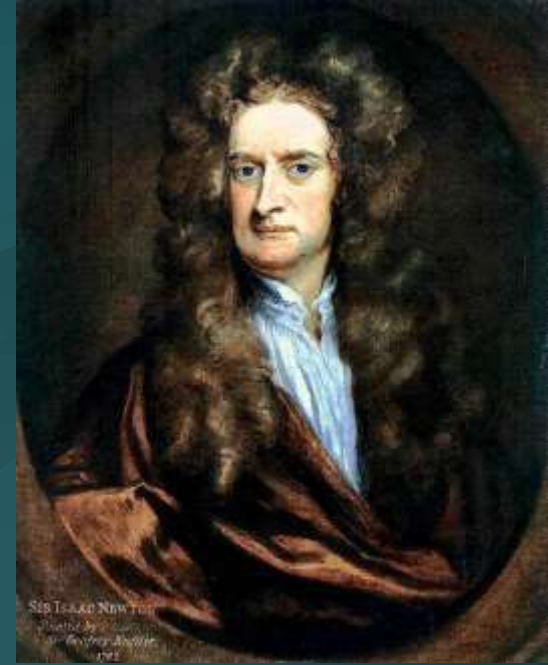
Qu'est ce que le ds^2

C'est l'équivalent du théorème de Pythagore pour calculer l'élément de longueur, mais dans un espace courbe : Sur Terre par exemple !



Avec l = latitude et L = longitude et r = rayon de la Terre: $ds^2 = r^2[dl^2 + \cos^2 l.dL^2]$

Différences avec la mécanique newtonienne



En mécanique newtonienne, compte-tenu de l'existence d'un espace absolu et d'un Temps* absolu, la simultanéité est universelle:

Deux évènements simultanés pour un observateur le sont pour tous.

Le présent, le passé et le futur sont objectivement définis dans cet univers.

**Temps avec une majuscule pour désigner le temps newtonien*

Différences avec la mécanique newtonienne

L'état futur est déterminé par l'état présent (description de la position de toutes les masses ainsi que de leurs vecteurs vitesse à un instant donné $t = t_k$), les lois de la gravitation régissant son évolution.

Ainsi par intégration on peut déterminer la dynamique du système univers.

Pour le passé, c'est le même principe mais « inversé ».

.

Différences entre relativité et mécanique newtonienne

La contemplation d'une nuit étoilée suggère qu'il s'agit d'une vue instantanée (une section spatiale à temps cosmologique constant) de l'univers proche.

Mais, si cette contemplation s'effectue dans notre présent, la lumière émise par les objets observés (lune, planètes, étoiles,...) a été émise dans notre passé à des instants différents du fait de la vitesse limitée de la lumière.

Différences entre relativité et mécanique newtonienne

Ainsi, même si cette notion de simultanéité universelle en mécanique classique est bien définie, elle ne correspond pas à ce qu'on observe directement, qui serait d'ailleurs différent de ce qui serait observé par d'autres observateurs.

La relativité va prendre en compte cette propriété, ce qui va conduire à remettre en cause les concepts d'espace et de Temps.

Le Temps, paramètre dynamique des systèmes en mécanique classique

Physiologiquement et philosophiquement le Temps est perçu comme une entité indépendante de toute chose régissant inexorablement le cours de tous les événements.

Objectiver le concept en physique en balisant (mesurant) l'évolution d'un système par un autre système « référent » qui va fournir un paramètre dynamique (une horloge, par exemple, à laquelle on prête certaines propriétés qu'on attribue au Temps comme la « périodicité d'un phénomène ») ne traduit qu'une comparaison entre deux systèmes .

Le Temps, paramètre dynamique des systèmes en mécanique classique

Cela ne nous renseigne pas sur sa nature ontologique.

Nous pouvons, par contre, énumérer les caractères et propriétés que nous lui prêtons.

Dans son livre « Voyager dans le temps », Marc Lachièze Rey lui prête les propriétés suivantes:

Les diapos qui suivent avec un titre en jaune sont inspirées de ce livre.



Propriétés du temps newtonien

Datation: La mécanique newtonienne permet d'allouer la même date à tout évènement de l'univers (pour tous les observateurs).

Chronologie, simultanéité: De ceci résulte que la chronologie des évènements donc aussi la simultanéité sont définies sans ambiguïté.

Causalité: La chronologie étant universelle, la causalité l'est puisque cela définit de manière non ambiguë si un évènement est antérieur à un autre.

Durées: La datation des évènements étant universelle, la durée entre deux évènements est la différence des temps qui est également universelle.

Propriétés du temps newtonien

Il faut prendre le terme évènement dans son sens le plus général: « moi, maintenant et ici », par exemple, est un évènement.

Il est utile de définir une ligne d'univers, comme en relativité, ce qui permet de rendre plus cohérente la comparaison des théories.

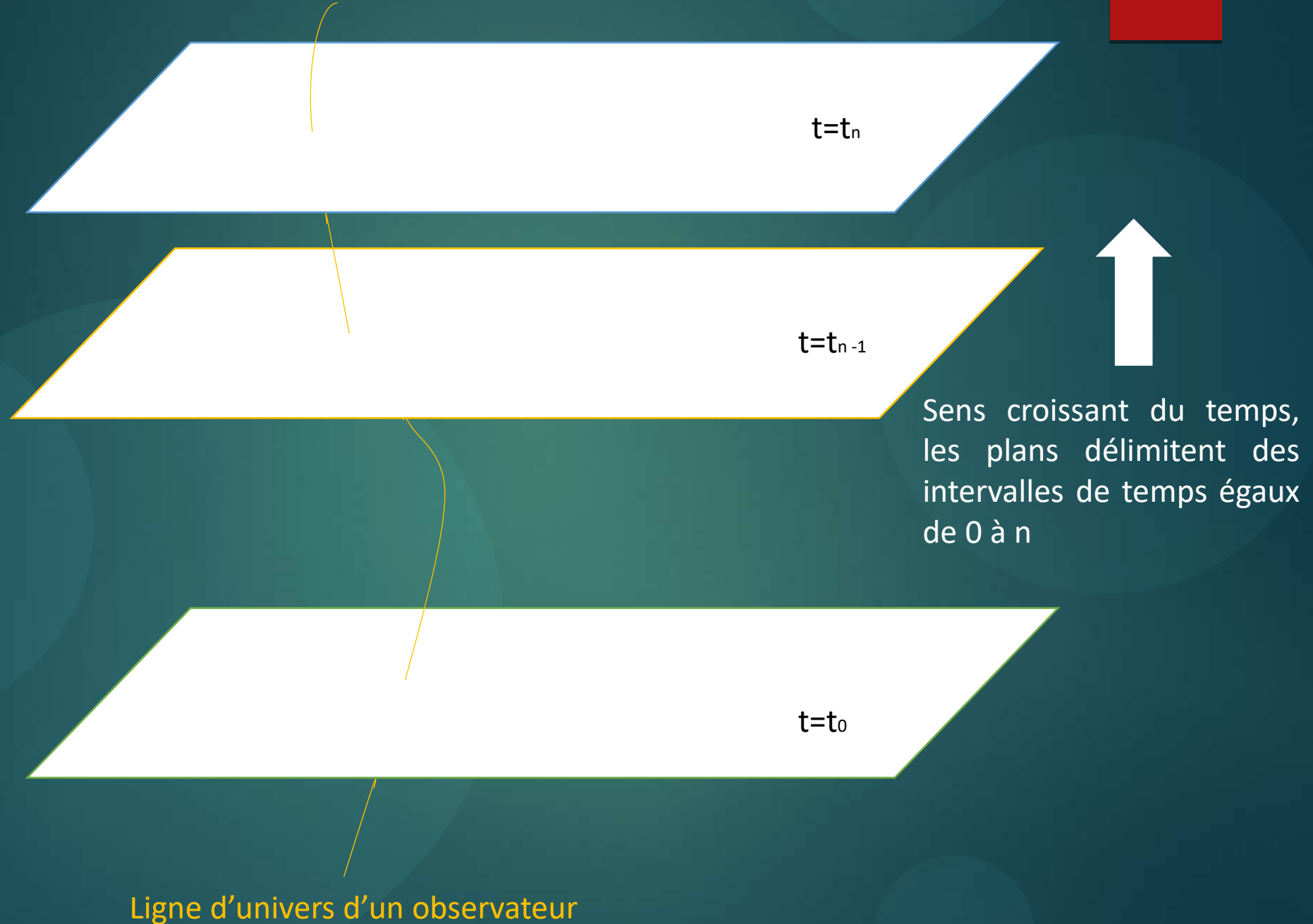
En mécanique classique cette ligne d'univers est très simple, c'est une ligne dans un espace euclidien à trois dimensions sur laquelle on peut inclure des informations de Temps (dates), pas régulièrement espacées si le mouvement de l'observateur n'est pas rectiligne dans cet espace.

Propriétés du temps newtonien

A noter qu'on peut aussi définir un temps propre, spécifique à cette ligne d'univers, qui se confond avec le Temps newtonien.

La notion de durée écoulée pour l'observateur sur sa ligne d'univers se calcule à partir de ces dates.

Propriétés du temps newtonien



Le Temps existe-t-il en relativité?

Datation: En relativité, elle n'existe, en général, que sur une ligne d'univers, donc est propre à chaque observateur.

Il peut exister des **fonctions temporelles globales** permettant un feuilletage d'un espace-temps en temps et espace (exemple en cosmologie), qu'on peut appliquer à une classe d'observateurs (co-mobiles dans le cas de la cosmologie) mais celles-ci sont arbitraires (coordonnées) et n'ont pas de caractère universel.

Simultanéité: En conséquence, la simultanéité des évènements, ne s'observe pas universellement.

Le Temps existe-t-il en relativité?

Causalité: En relativité restreinte, y compris étendue aux mouvements non inertiels il existe un critère de causalité spatio-temporel universel.

En relativité générale, pour les mouvements géodésiques ce critère semble être toujours valide, mais pour des mouvements non géodésiques cela est susceptible d'être violé (en théorie).

Notons que l'existence d'un critère de causalité est essentiel pour construire une physique raisonnable. La classification qu'on en fait en relativité générale est liée à la constitution de l'univers en matière-énergie qui en détermine la chrono-géométrie via l'équation d'Einstein.

Le Temps existe-t-il en relativité?

On distingue les structures causales suivantes:

- Globalement hyperbolique (ex. espace-temps de Minkowski)
 - Causalement simple
 - Causalement stable (il admet au moins une fonction temporelle globale)
 - Fortement causale (pas de courbe causale « presque fermée » en aucun point)
- Causal (pas de boucle causale)
- Chronologique: Pas de boucle temporelle.

Le Temps existe-t-il en relativité?

Conditions d'énergie:

Associées aux structures causales, on distingue généralement:

Condition d'énergie faible

Condition d'énergie nulle

Condition d'énergie dominante

Condition d'énergie nulle dominante

Condition d'énergie forte

La définition mathématique précise de ces conditions (inégalités invoquant les tenseurs) est trop technique pour être présentée ici, mais il est important de noter que ce sont elles qui déterminent les structures causales possibles dans un univers.

Le Temps existe-t-il en relativité?

Chronologie: Sauf pour les évènements liés par une structure causale elle n'est pas universelle.

Durées: La durée observée entre évènements n'a un sens, en général, que sur une ligne d'univers donc est propre à chaque observateur.

Le Temps existe-t-il en relativité?

Ces différences montrent que la conception de ce temps « métaphysique » indépendant de toute chose réglant inexorablement le cours des choses de la mécanique classique n'existe pas en relativité.

En particulier, non seulement il n'est pas indépendant de toute chose puisqu'il dépend de la matière-énergie, source de la gravitation, **mais c'est cette même matière-énergie qui, modelant un espace-temps courbe et définissant ses géodésiques, va engendrer le « temps propre ».**

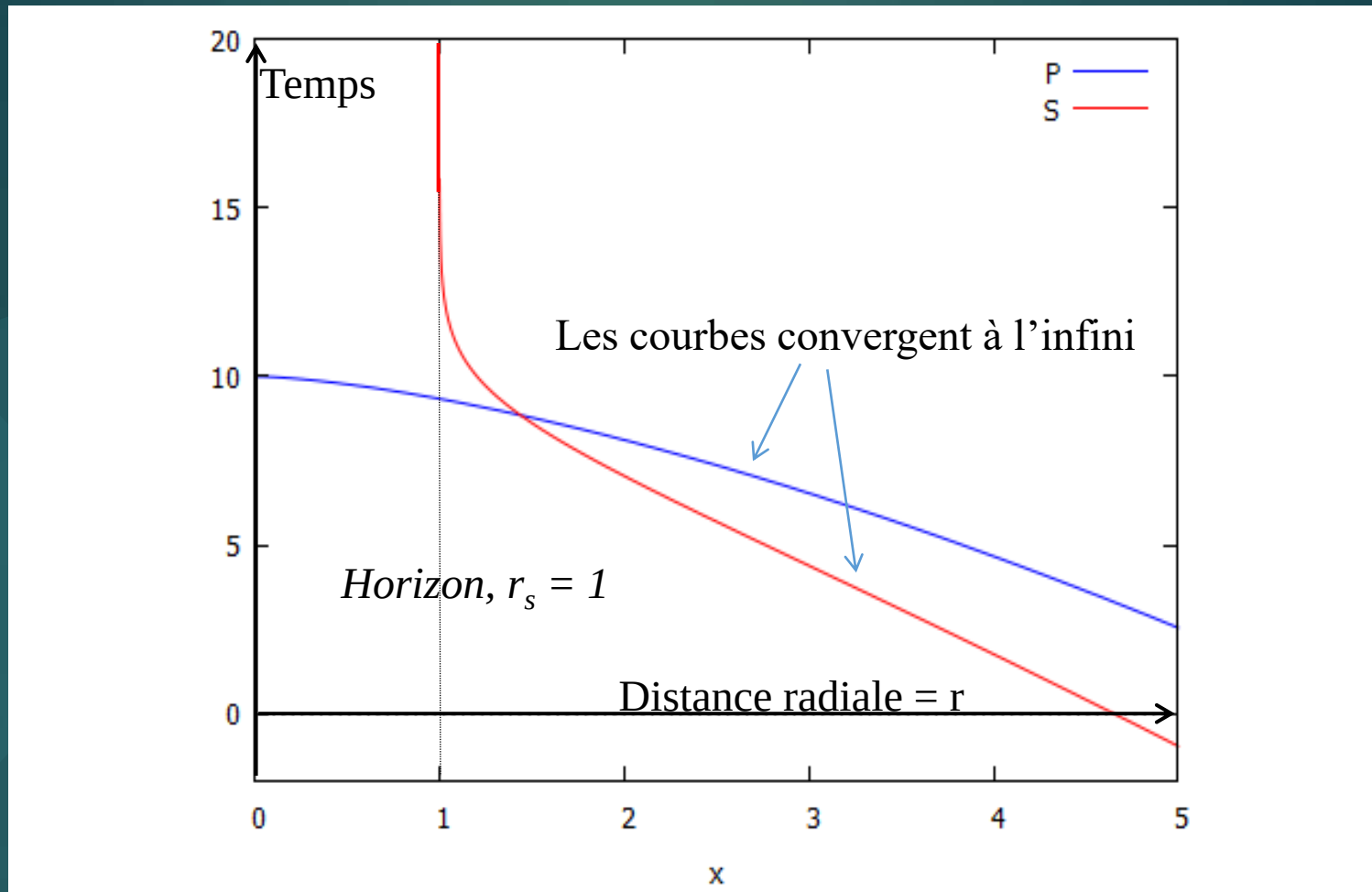
La coordonnée temps peut-elle faire office de Temps en relativité?

Cette coordonnée, caractérisant la « temporalité » (caractère temporel), se distingue structurellement et opérationnellement des coordonnées d'espaces par son signe dans le ds^2 .

La relativité restreinte et générale nous montrent que les coordonnées de temps et d'espace sont non physiques et arbitraires et qu'elles ne valent que par leurs relations synthétisées dans le ds^2 (en fait le tenseur métrique).

Pour le champ extérieur généré par une masse unique à symétrie sphérique, en utilisant deux types de coordonnées temporelles (coordonnées de Schwarzschild et coordonnées de Painlevé) on voit que les représentations du mouvement radial sont très différentes.

La coordonnée temps peut-elle faire office de Temps en relativité?



Comparaison des représentations d'une même géodésique radiale dans les coordonnées de Schwarzschild, en rouge, où la courbe représentant la géodésique diverge sur l'horizon, et de Painlevé, en bleu, où ce n'est pas le cas.

Le temps propre peut-il faire office de Temps en relativité?

Le Temps renaîtrait-il de ses cendres sous forme de temps propre, puisqu'il semble présenter un caractère physique et conduit à la définition d'invariants.

Ce point est ontologiquement difficile à défendre car ce temps propre τ est en fait un mélange de temps et d'espace (résulte du ds^2 car $ds^2 = c^2 d\tau^2$) et ce qui est du temps pour certains est un mélange de temps et d'espace pour d'autres: **Il y a du temps, dans ce « temps » là, mais il n'y a pas que cela!**

La relativité bouscule bon nombre de concepts bien pratiques qui nous paraissaient aller de soi. Il faudra donc faire avec ce qu'on a, comme cela est déjà le cas pour la comparaison des vecteurs et tenseurs distants.

Le temps propre peut-il faire office de Temps en relativité?

Pour bien comprendre le caractère monolithique du ds^2 , il faut se rappeler que l'écriture,

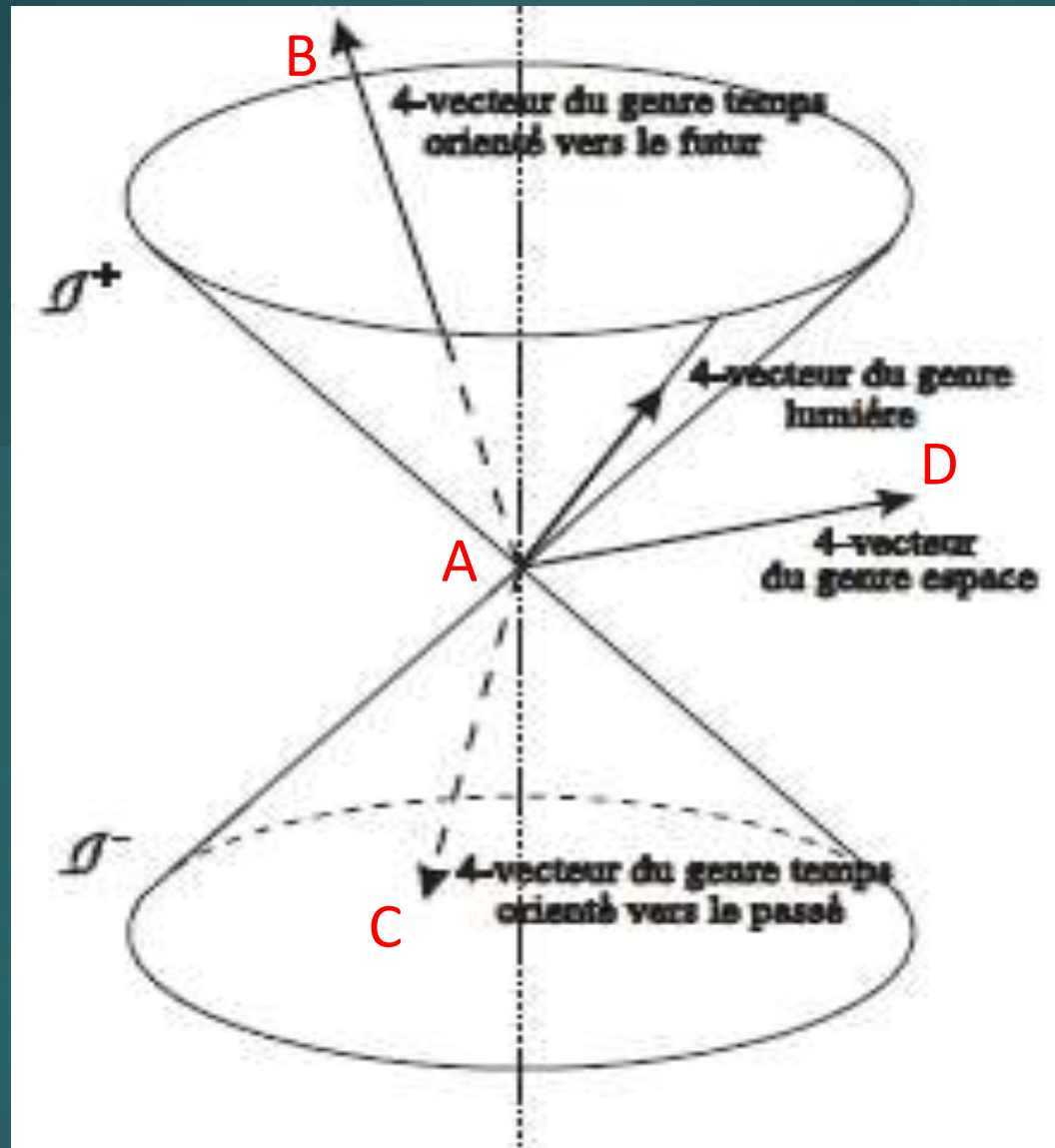
$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

n'est que la représentation, en géométrie analytique, du tenseur métrique qui est un objet géométrique où $g_{\mu\nu}$ sont les composantes et dx^μ , dx^ν la base (gradient des coordonnées dans l'espace courbe) dans laquelle est représenté le tenseur.

L'indice 2 représente la valence du tenseur (deux indices) et absolument pas un carré.

C'est la projection de ce tenseur sur la ligne d'univers d'un observateur qui détermine le « ds^2 » paramètre affine de la ligne d'univers.

La causalité en relativité restreinte



Cône de lumière montrant le caractère topologique de la relation causale en relativité restreinte: L'évènement **C**, dans le passé de **A** et a pu être sa cause, l'évènement **B** dans le futur de **A** a pu être causé par **A**, l'évènement **D** n'a aucun lien causal avec **A**.

Temps et énergie

En relativité le temps est associé à l'énergie (et l'espace à la quantité de mouvement). Ceci n'a rien de fortuit.

Toute évolution d'un système où une variable dynamique intervient se fait avec des échanges d'énergie.

A ce titre temps et énergie sont indissociables, l'un n'est pas la cause de l'autre, ce sont deux aspects d'un même phénomène.

Le temps est la représentation conceptuelle, l'énergie la représentation physique.

Ainsi on peut donner un sens physique à un paradoxe comme celui des jumeaux de Langevin.

Temps et énergie

Car si les équations qui décrivent le phénomène sont bien confirmées par l'expérience, il est difficile d'en donner une interprétation physique.

Lorsque le voyageur subit une accélération, on lui communique de l'énergie (par rapport au Terrien).

La physique montre que nombre de paramètres fondamentaux de la physique (comme la constante de structure fine) dépendent du niveau d'énergie (relative) auquel on les mesure.

Cela peut donner une interprétation physique au phénomène de désynchronisation des temps propres des jumeaux.

Temps et énergie

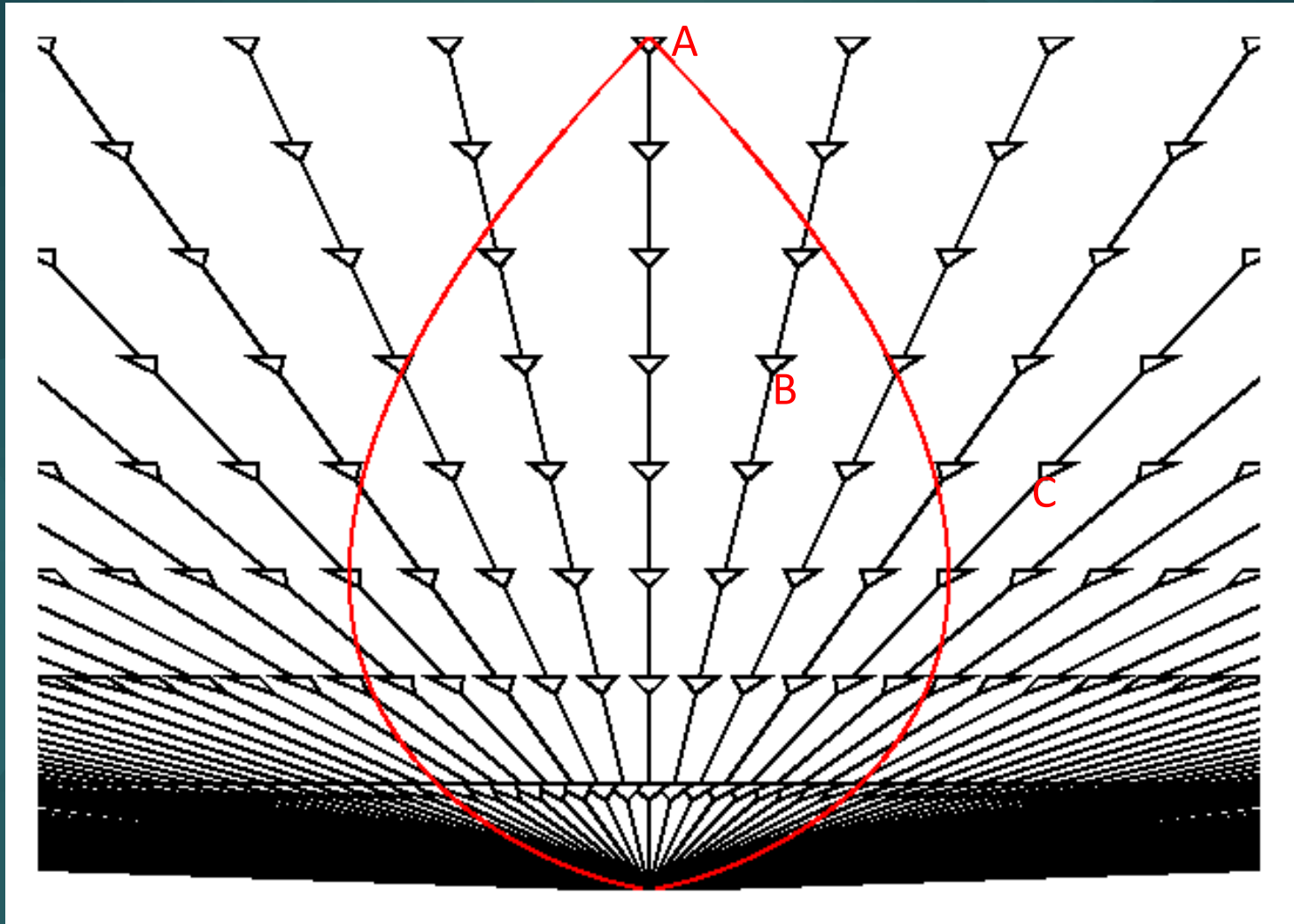
Notre propre pensée, phénomène dynamique qui se fait dans le temps met en jeu des transferts d'énergie.

A noter que la mécanique quantique nous enseigne que l'énergie se transmet par paquets (quantum d'action).

La causalité en relativité générale

Nous avons vu comment l'espace-temps courbe de la relativité générale déformait le cône de lumière global, (en tout point tangent aux petits cônes de lumière des autres géodésiques de la même famille), définissant le passé et le futur (bien que nous ne l'avons pas représenté, on voit comment on pourrait le construire).

La causalité en relativité générale



Le graphe rouge en forme de poire représente le cône du passé de l'évènement **A**. Le cône de lumière global est déformé en relativité générale. Des petits cônes de lumière locaux sont tracés sur des lignes d'univers. L'évènement **B** a pu être la cause de **A** mais pas l'évènement **C**.

La causalité en relativité générale

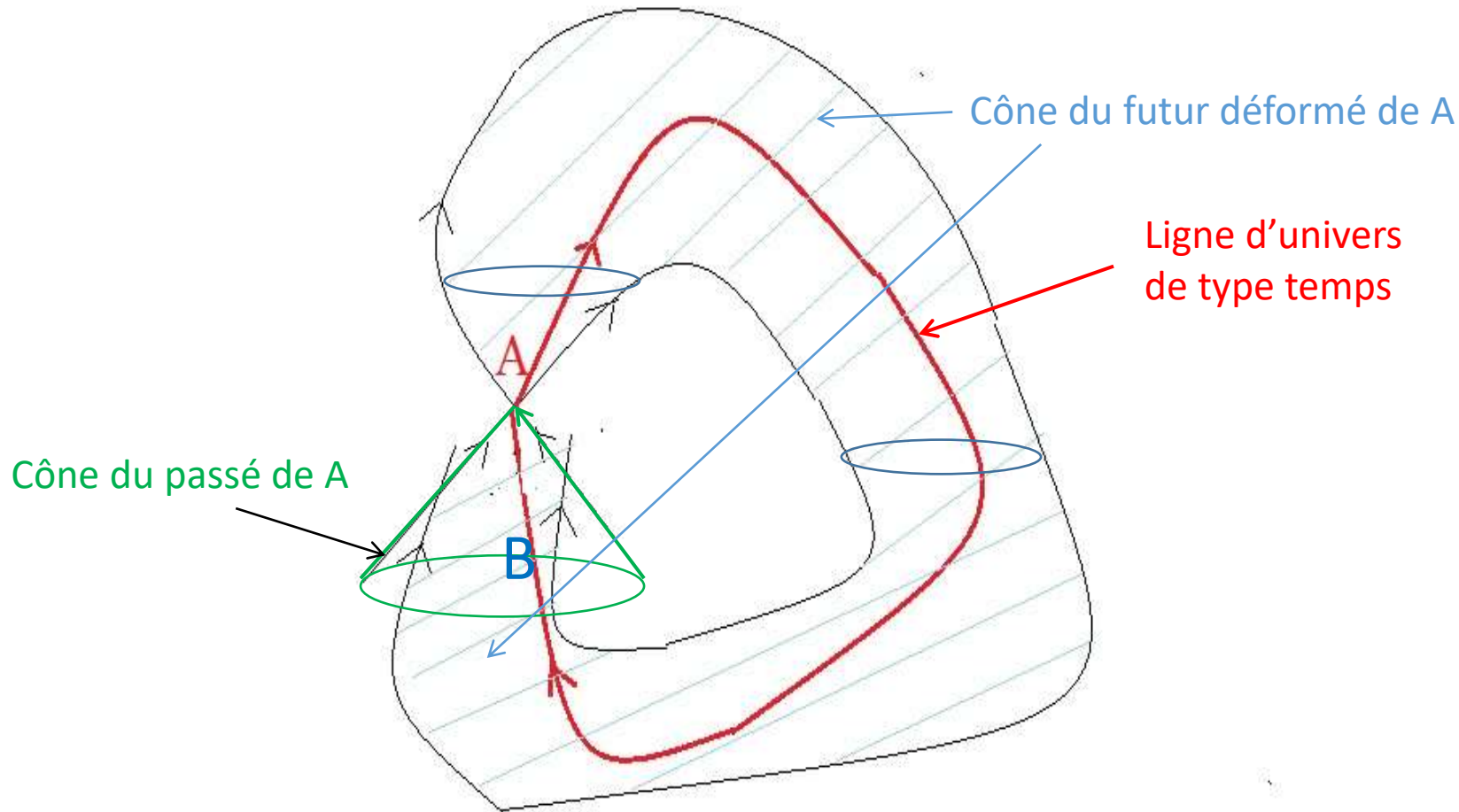
Cette déformation peut-elle être telle que le futur d'un événement puisse aussi être dans son passé?

Si ceci se produit nous allons encourir des paradoxes temporels.

Dans ces exemples le cône de lumière a une géométrie en boucle telle que le sommet du cône déformé se retrouve dans le cône du futur de l'évènement.

C'est pour cela qu'on parle de « boucles temporelles » ce qui suppose qu'on repasse au même point de l'espace-temps, mais, en fait, comme on peut aussi remonter dans le temps cette appellation est réductrice.

La causalité en relativité générale



Boucle temporelle

B est dans le passé de A et a donc pu être la cause de A et dans le futur de A donc avoir été causé par A!

La causalité en relativité générale



B. Carter a montré (1968) qu'il existe dans les solutions de la famille de Kerr une région, la « Carter Time Machine », sous l'horizon intérieur où de telles violations sont possibles. Cette région est généralement considérée comme non physique, du fait des conditions de formation de cet horizon, bien que ce ne soit pas prouvé.

Dans cette région, un événement peut être à la fois dans le passé et dans le futur d'un autre.

Le caractère physique de telles violations est toujours débattu, mais on n'a aucune démonstration de leur impossibilité et on en est réduit à des conjectures.

Voyage dans le temps

Remarquons que nous voyageons tous dans le « temps » ou du moins ce qui en fait office.

Par ailleurs, des paradoxes comme celui des jumeaux de Langevin nous enseignent que voyager vers le futur (sans possibilité de retour) est possible sans violer la causalité.

Ceux qui posent problème, mais font les délices des auteurs de science fiction, ce sont les voyages dans le passé.

Voyage dans le temps

Cela est trivialement possible si aucune modification du passé n'est envisageable (nous pouvons voir mais pas modifier).

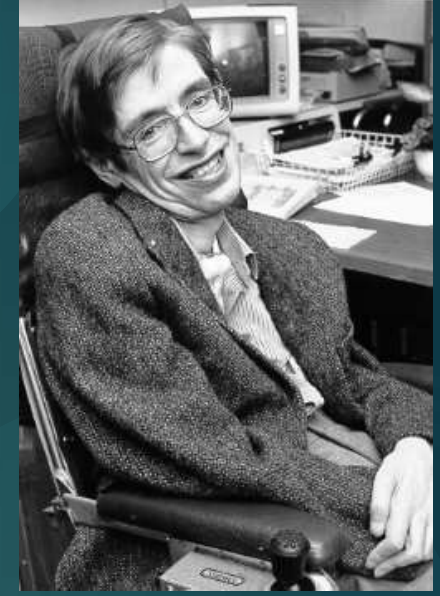
Imaginons que sur une planète éloignée de 1000 années lumière une civilisation ait construit un grand miroir orienté vers la Terre et qu'aujourd'hui avec des télescopes ultra-puissants nous pointions ces miroirs.

Voyage dans le temps

Nous verrions sans doute les romains dans leurs œuvres. Bien entendu cette technologie n'existe pas mais cela montre qu'il n'y a aucune impossibilité de principe. De manière plus concrète, des photos, des films d'archives permettent de voir le passé

Le problème se pose pour un voyage vers le passé où nous nous trouverions en situation de modifier ce passé. Les auteurs de science-fiction traitent ce problème par les univers parallèles.

Voyage dans le temps en relativité



S.Hawking (1992) a émis une conjecture « de protection chronologique » stipulant que tout espace-temps serait protégé contre les violations chronologiques par les lois mêmes de la physique, interdisant cela, mais ce n'est qu'une conjecture et à ce jour aucune démonstration n'existe.

Des éléments plus convaincants existent comme le fait que si un tel voyage existait, et pour n'importe quelle valeur du retour en arrière, nous aurions dû voir ces voyageurs du temps !

Plus vite que la lumière?

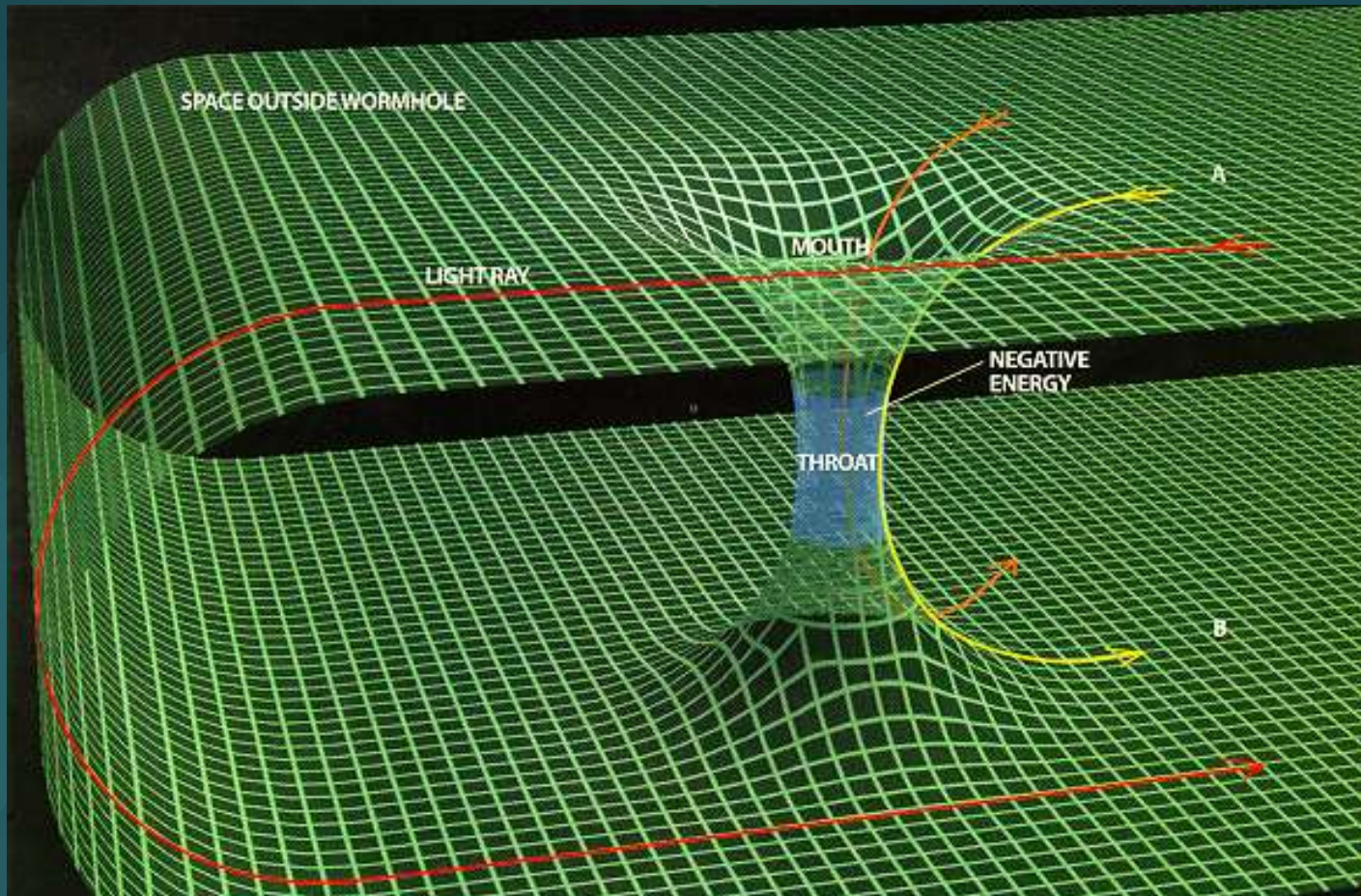
Scientific American, January 2000

La construction de trous de ver et de « warp drive » (propulsion par déformation de l'espace-temps) nécessite une forme d'énergie négative. Malheureusement les lois qui autorisent l'existence de cette énergie négative limitent ses possibilités.



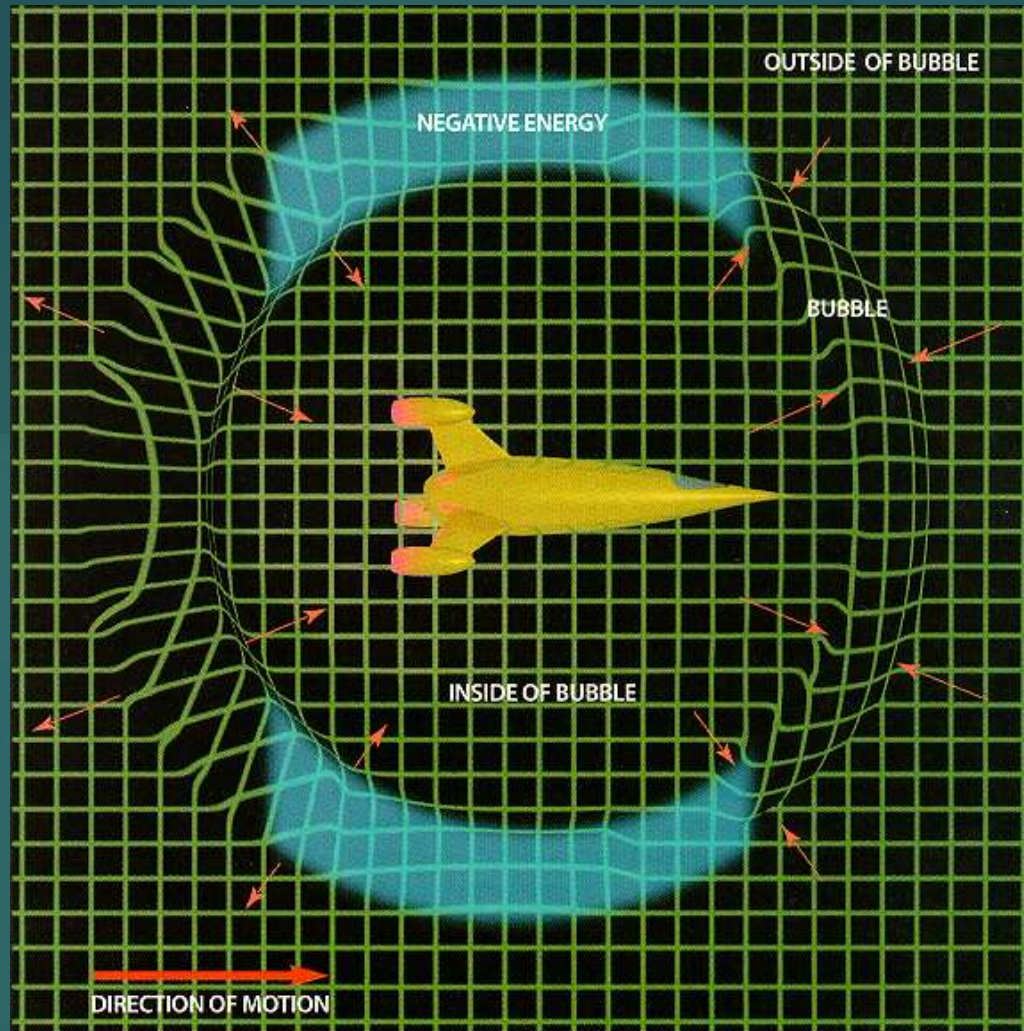
Un trou de ver, s'il en existe, apparaîtrait comme une bulle sphérique contenant une autre partie de l'univers. Dans cette photo de Times Square, le trou de ver permet aux newyorkais d'atteindre le Sahara en un seul pas, évitant des heures de vol vers Tamanrasset. Bien que ces trous de ver ne violent aucune loi connue de la physique, ils nécessiteraient une quantité non réaliste d'énergie négative.

Plus vite que la lumière?



La lumière a généralement une densité d'énergie positive ou nulle (*en haut*). Mais dans certains états contraints la densité d'énergie à un certain moment peut devenir négative à certains endroits (*en bas*). Pour compenser cela le pic d'énergie positive doit augmenter.

Plus vite que la lumière?



Une bulle d'espace-temps est ce qui ressemble le plus en physique moderne au "warp drive" de la science fiction. Elle peut transporter un vaisseau spatial à n'importe quelle vitesse. L'espace-temps se contracte sur l'avant de la bulle réduisant la distance à destination et se dilate à l'arrière augmentant la distance à l'origine (*flèches*). Le vaisseau reste immobile par rapport à son environnement immédiat, les astronautes ne ressentent aucune accélération. De l'énergie négative (*bleue*) est nécessaire sur les deux côtés de la bulle pour réaliser l'opération.

La flèche du temps



L'expansion » de l'univers peut s'apprécier de façon équivalente comme la divergence des géodésiques dans l'espace-temps.

Mais cette divergence suppose que les géodésiques des observateurs, dont nous sommes, sont parcourues dans un sens (dans l'autre il y aurait convergence).

L'interprétation standard (expansion) fait appel à la gravitation et au second principe de la thermodynamique (accroissement de l'entropie) pour régir l'évolution de l'univers. Mais on peut aussi constater que ce sens correspond à celui qui permet l'évolution de la vie, telle qu'on la connaît.

La flèche du temps



Considérant que, conformément à l'équation d'Einstein, l'univers existe et que la notion de passé et d'avenir n'a pas de sens pour l'univers vu qu'il inclut temps et espace dans toute leur extension, ce que nous appelons passé, présent et avenir est, en fait, le nôtre, sur notre ligne d'univers.

Dans cette approche, c'est donc l'observateur (l'être pensant) qui détermine cette flèche du temps.

La flèche du temps

Pour que le choix du sens soit pertinent il faut que, quel qu'il soit, un critère d'ordonnement des événements, sur une ligne d'univers, existe.

La géométrie associée à la relativité fournit ce critère via la causalité. B sera dit postérieur à A si B peut avoir été causé ou influencé par A. Géométriquement cela implique que B est dans le cône du futur de l'événement A.

En RR, comme le cône de lumière global est le prolongement jusqu'à l'infini du cône local dans l'espace-temps de Minkowski de structure fixe, le critère est simple à mettre en œuvre.

La flèche du temps

En relativité générale, le cône de lumière local dans les coordonnées globales a une structure en général plus complexe.

Elle diffère du cône de lumière fixe local dans le référentiel lorentzien associé à l'observateur mais ils sont liés par une transformation (les tétrades) qui préserve les critères topologiques.

Si un événement infiniment proche, comme la direction de la trajectoire suivie par l'observateur, est à l'intérieur du cône local fixe de lumière du futur (de la relativité restreinte) du référentiel lorentzien tangent, il est à nécessairement l'intérieur du cône local de lumière dans les coordonnées globales.

La flèche du temps

Donc, sauf cas particulier de boucles temporelles, nous disposons d'un critère opérationnel pour déterminer la causalité et permettre l'ordonnancement des événements sur une ligne d'univers en relativité générale.

Que reste-t-il du Temps universel en relativité?

Selon les avis, rien ou pas grand-chose.

Mais cela ne veut pas dire qu'on ne peut rien faire en relativité bien au contraire: Rappelons ce qui est bien défini.

Un univers caractérisé par la géométrie d'un espace-temps à quatre dimensions. Cette géométrie contient des toutes les courbes possibles dans cet espace-temps, de type temps, espace ou nul, dont les géodésiques caractérisant le mouvement inertiel.

Sur ces lignes d'univers la métrique permet de définir, entre autres, un paramètre affín, que par un paramétrage particulier on peut faire correspondre au temps propre sur une ligne de type temps, qui permet d'ordonner et dater les événements (sur cette ligne d'univers).

Que reste-t-il du Temps universel en relativité?

L'interaction entre ces lignes d'univers, si elles ne se coupent pas peut se faire par d'autres lignes d'univers.

Ainsi lorsque nous recevons de la lumière d'une étoile distante, la géodésique suivie par les photons coupe à la fois la ligne d'univers de l'étoile et la nôtre.

Dans cette géométrie les cônes de lumière délimitant les régions causales vont fournir des critères permettant d'ordonner des événements survenus dans différentes lignes d'univers, etc....

Nous voyons que nous disposons d'outils pour construire une mécanique certes différente de la mécanique classique mais parfaitement utilisable.

La mécanique classique reste-t-elle le dernier bastion du temps universel?

Au risque d'achever les derniers tenants du temps universel, on peut montrer que pour une large classe de phénomènes gravitationnels en mécanique classique on peut parfaitement les décrire, y compris leur « dynamique », sans faire appel au temps universel !

On utilise alors une forme géométrique purement spatiale pour formaliser le phénomène mais dans une géométrie non plus euclidienne, mais conformément euclidienne, en utilisant la liberté de jauge locale (cf. H. Weyl).

Les orbites sont alors les géodésiques d'une telle géométrie, et le paramètre dynamique est le paramètre affiné de la courbe décrivant l'orbite.

Conclusion

La relativité, à travers son concept d'espace-temps remet en cause nos conceptions intuitives de temps et d'espace. Cela a pour conséquence de changer drastiquement la manière dont la physique doit être représentée.

Déclarer que le temps n'existe pas a certes un côté provocateur compte-tenu de la manière dont nous le percevons, mais ce qui est mis en cause c'est le Temps « métaphysique » de la mécanique classique, avec toutes ses propriétés, et son caractère autonome et totalement contraignant qui n'a pas lieu d'être.

Nous avons montré comment on pouvait faire de la physique sans y faire référence et quelles en étaient les implications profondes.