

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, ce qui sera postulé par Newton).

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



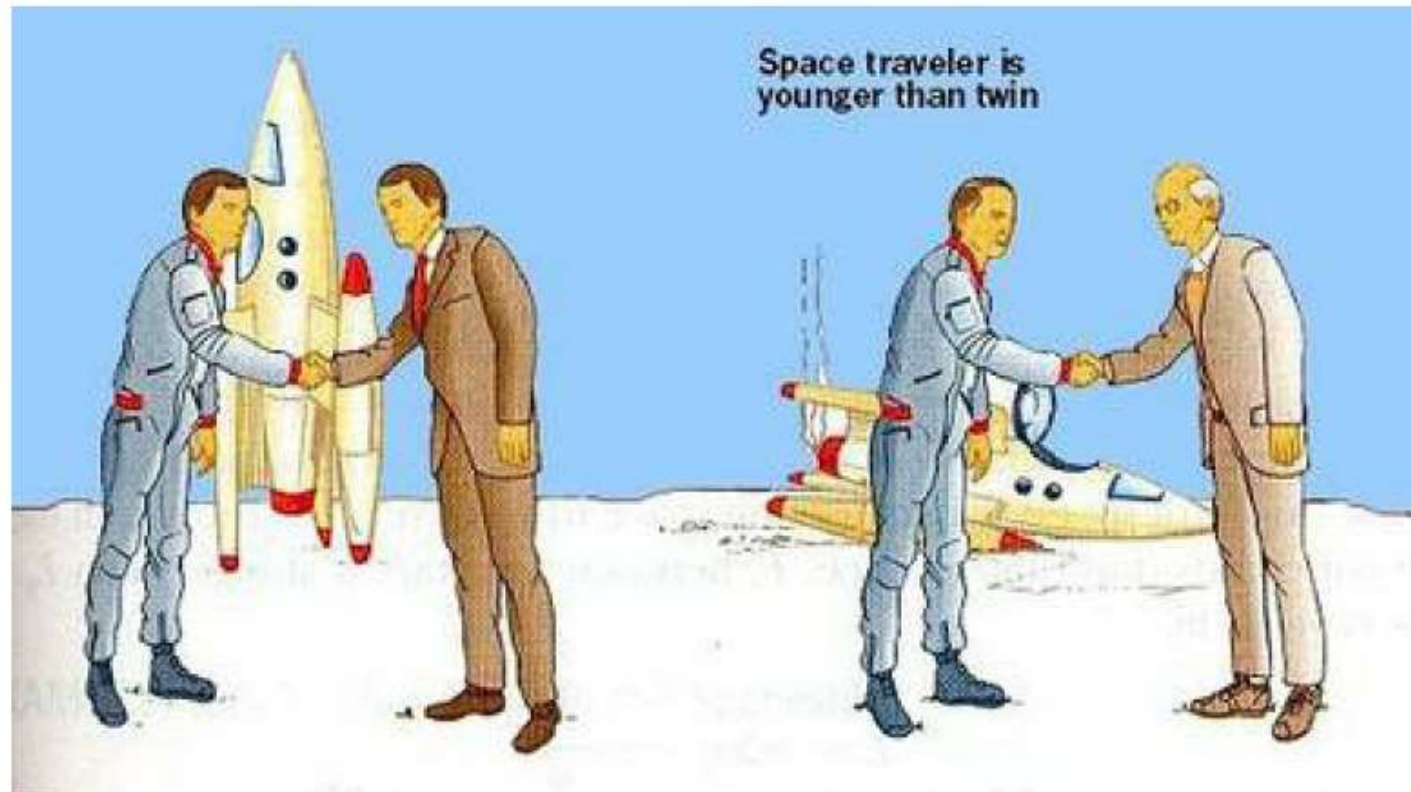
- ▶ Nous avons trois concepts: Temps, espace, mouvement qui ne sont pas indépendants.
- ▶ Quels sont les concepts « premiers » parmi ces trois. En général le mouvement est considéré une composition de temps et d'espace, concepts intuitivement premiers à notre esprit.
- ▶ Et si c'était le mouvement, combinaison 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 bouscule cette conception 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 ».

La fin du temps universel



Le paradoxe des jumeaux. © DR

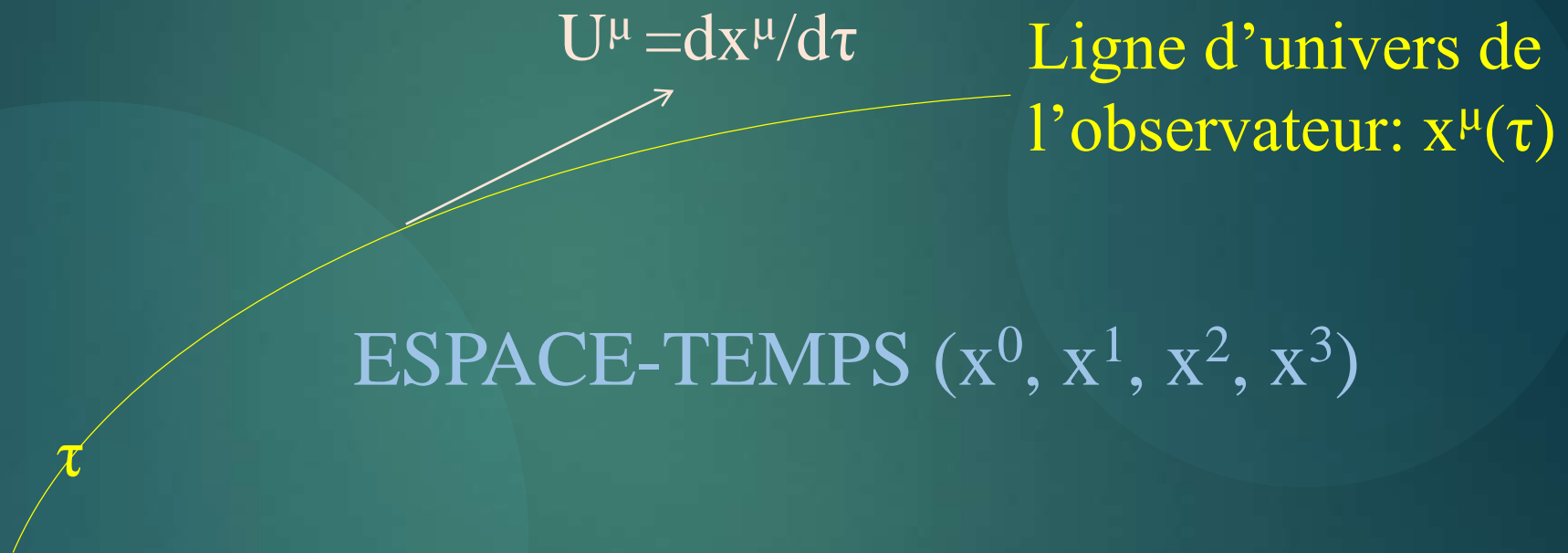
- ▶ La relativité signe la fin du temps universel et l'émergence de temps propres indépendants pour chaque ligne d'univers. Ceci est illustré ici par le célèbre paradoxe des « jumeaux » de Langevin où celui qui a voyagé a moins vieilli que celui resté sur Terre.

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.

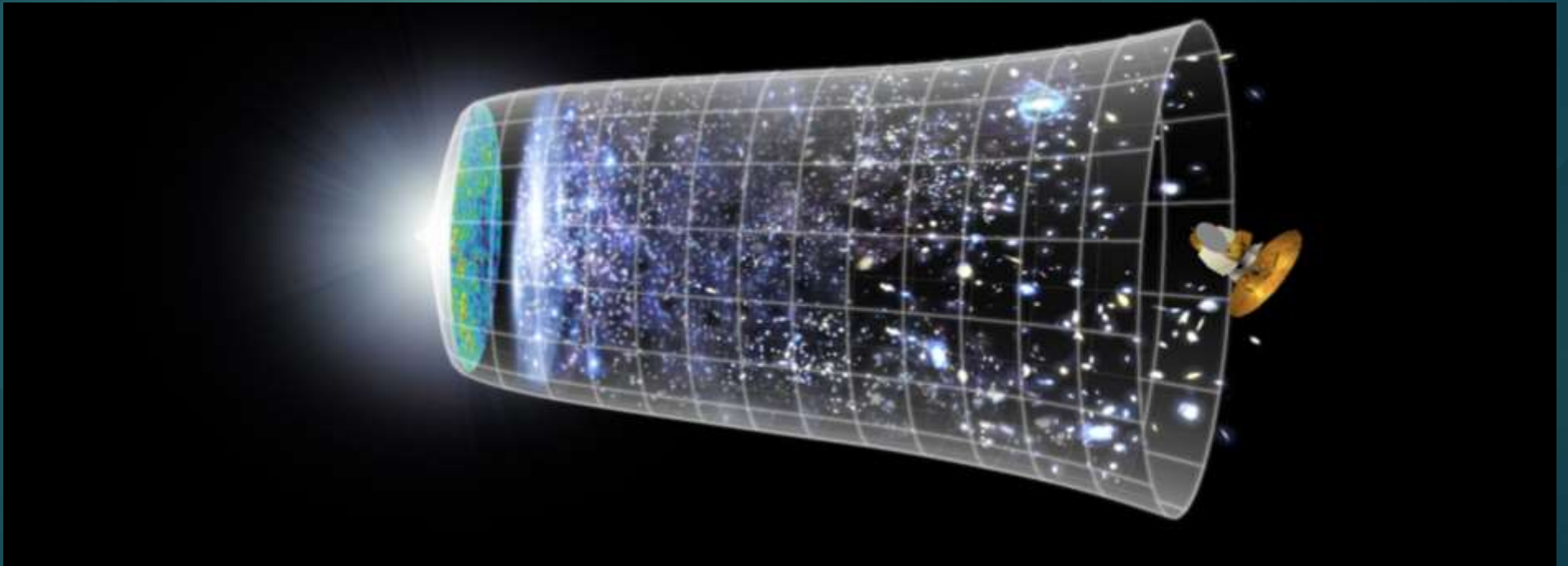
Les concepts d'espace, de temps et de mouvement en relativité



La relativité propose une solution cohérente au problème de la primauté des concepts spatio-temporels en posant comme fondamental le concept de continuum d'espace-temps (cf Minkowski).

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

- ▶ Introduisons le sujet par un exemple bien connu:
- ▶ Le modèle standard en cosmologie, ironiquement qualifiée de « Big Bang » par Fred Hoyle.



Le modèle cosmologique standard: L'univers a une histoire!

- ▶ On décrit généralement ce modèle comme un espace en expansion à partir d'une singularité initiale considérée comme marquant l'origine temporelle de l'univers. L'âge de 13,7 milliards d'années, aujourd'hui, est mesuré en temps cosmologique (coordonnée temps de la forme de Robertson Walker) .C'est l'âge réputé de l'univers.
- ▶ On utilise la métrique de RW parce qu'elle est pratique (et correcte), mais il faut l'interpréter avec discernement car elle s'appuie sur un certain feuilletage espace-temps qui montrent des sections spatiales en expansion, ce qui n'est pas une description covariante.

Le modèle cosmologique standard: L'univers a une histoire!

- ▶ Il y a des scientifiques qui nient cette expansion, en montrant qu'on peut écrire (correctement) la métrique dans d'autres coordonnées où cette expansion de l'espace n'existe pas.
- ▶ Prenons l'exemple simple d'un univers de Friedmann-Lemaître critique où les « sections spatiales » (à $t = t_k = \text{cste}$) sont euclidiennes, pour illustrer cela.
- ▶ Bien entendu, on pourrait montrer que cela se généralise aux cas non critiques mais la démonstration dans le cas critique, le plus simple, illustre bien le problème.

Le modèle cosmologique standard: L'univers a une histoire!

- ▶ La forme de Robertson-Walker (univers critique) s'écrit:
- ▶ $ds^2 = -dt^2 + a^2(t)[dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$,
- ▶ Pour $t = t_k$, la métrique qui se réduit à:
- ▶ $a^2(t_k)[dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$
- ▶ dépend de t_k , (expansion quand t_k croît).
- ▶ Posons $R = a(t).r$. On obtient la forme proposée par Michel Mizony dans (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00782038/>):
 $ds^2 = -dt^2(1 - 4R^2/9t^2) - dt.dR(4R/3t) + dR^2 + R^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$
- ▶ Pour la même section spatiale $t = t_k$ la métrique qui se réduit à:
- ▶ $dR^2 + R^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$ est constante. Alors qui a raison?

Le modèle cosmologique standard: L'univers a une histoire!

- ▶ Les deux, car lorsqu'on calcule des grandeurs covariantes, ce qui correspond aux seules grandeurs qu'on peut vérifier expérimentalement, alors les résultats donnés par ces formes convergent (et pour cause, les coordonnées sont arbitraires).
- ▶ Si cette description, utilisant des concepts classiques newtoniens qui nous sont familiers, est correcte géométriquement, car dans cette solution, on peut effectivement décomposer l'espace-temps en hypersurfaces spatiales 3D à temps constant, orthogonales aux géodésiques « co-mobiles » de type temps, elle masque la nature physique de la phénoménologie.

L'univers n'a pas une histoire mais “il est une histoire!”

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- ▶ En effet l'espace-temps correspondant à certaines conditions de symétrie et de distribution de matière et énergie est déterminé par l'équation d'Einstein, à quatre dimensions.
- ▶ Le résultat qui inclut donc temps et espace ne peut pas être considéré comme dynamique puisque intrinsèquement la dimension temporelle en fait partie.
- ▶ Le modèle cosmologique l'espace-temps n'est donc pas dynamique (cela n'a pas de sens), l'apparence dynamique va, en fait, relever de l'observateur sur sa ligne d'univers.

L'univers est une histoire!

- ▶ La notion de passé de présent et de futur s'exprime par rapport à cet observateur lorsqu'il parcourt sa ligne d'univers (il explore un univers spatio-temporel existant) et non pas à l'univers qui est le tout (tout l'espace dans toute son extension temporelle). Ainsi la singularité « initiale » n'est initiale que pour les observateurs, à noter que cette singularité est repoussée à l'infini du passé pour ces observateurs « co-mobiles ».
- ▶ L'espace-temps, certes, contient une singularité, où toutes les géodésiques et lignes d'univers se rejoignent, mais rien ne permet de la qualifier d'initiale, ce qui suppose une évolution temporelle de cet univers.

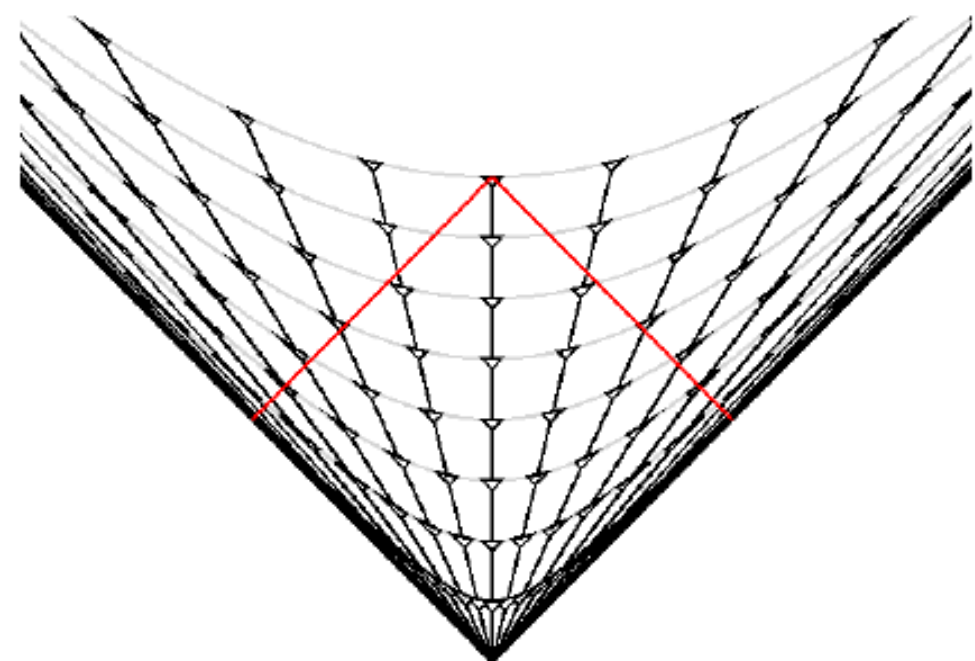
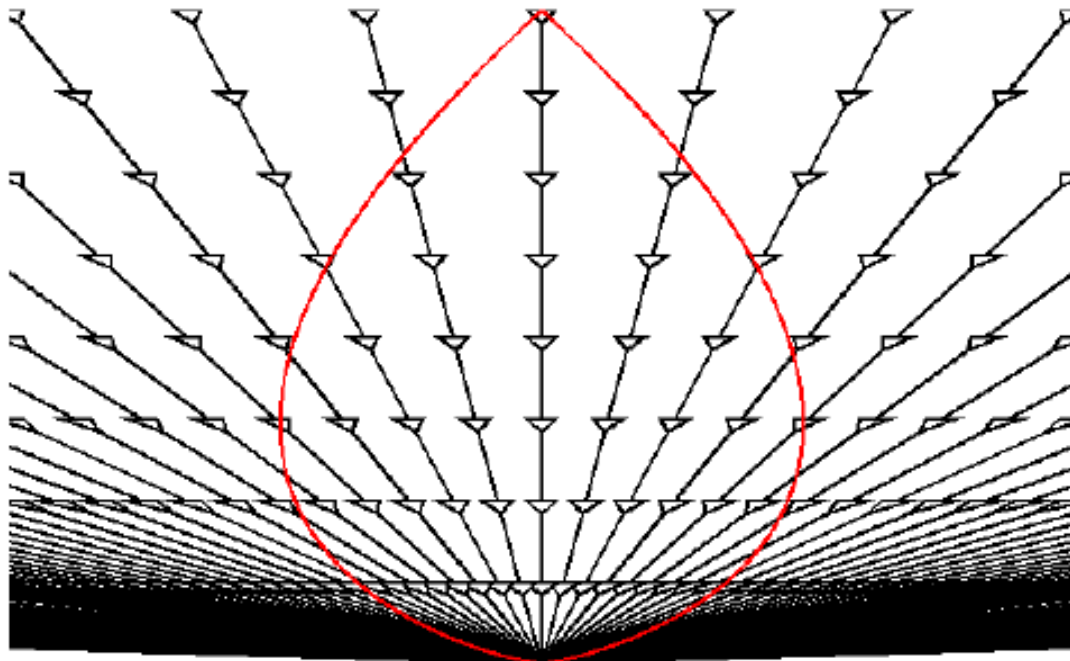
L'univers est une histoire!

- ▶ Ainsi dans cette représentation, 13,7 milliards d'années n'est pas l'âge de l'univers mais est la mesure de la « longueur » du paramètre affiné de sa ligne d'univers géodésique co-mobile, temps propre de cet observateur, « extrapolée » jusqu'à la singularité entre aujourd'hui et la singularité.
- ▶ De même l'univers n'est pas en expansion, ce sont ces observateurs géodésiques co-mobiles qui s'éloignent tous les uns des autres, ce qu'ils peuvent constater par échange de signaux lumineux qui mettent de plus en plus de temps à leur parvenir (critère physique).
- ▶ Cette divergence de ces géodésiques est la bonne caractéristique physique de la phénoménologie qu'on qualifiait d'expansion de l'univers.

L'univers est une histoire!

- ▶ Il faut aussi souligner que pour cet observateur (aujourd'hui), compte tenu de la « dilatation temporelle », en fait la divergence des géodésiques, l'intervalle entre les événements du passé lui paraissent d'autant plus dilatés qu'il observe de plus en plus loin dans le passé, la singularité initiale étant inobservable, car rejetée à l'infini du passé.
- ▶ Ceci est bien illustré sur les diagrammes, ci dessous, montrant la représentation globale des lignes d'univers dans le référentiel cosmologique et celui (minkowskien) associé localement à l'observateur (cf tutoriel de N. Wright).

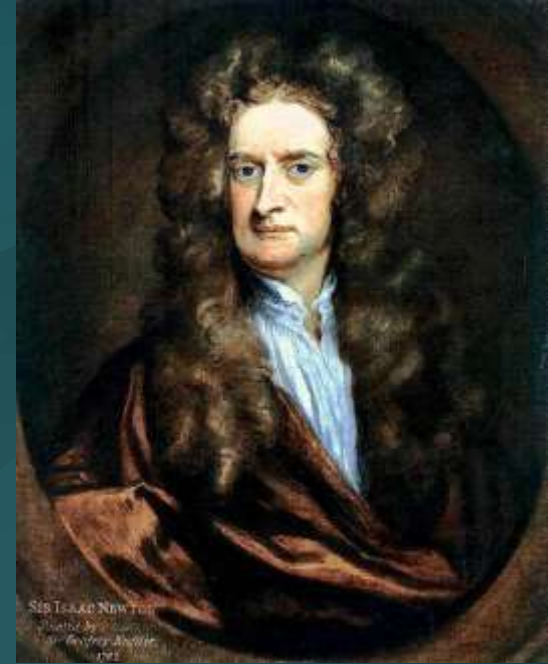
L'univers est une histoire!



Représentation Cosmologique:
Métrique de Robertson Walker

Représentation locale dans le
référentiel de l'observateur.

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:

Propriétés du temps newtonien

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

Chronologie, simultanéité: De ceci résulte que la chronologie des événements 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 événement est antérieur à un autre.

Durées: La datation des événements étant universelle, la durée entre deux événements 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



Sens croissant du temps,
les plans délimitent des
intervalles de temps égaux
de 0 à n

Ligne d'univers d'un observateur

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 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 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 de celles d'espaces par son signe dans le ds^2 .

En effet, 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).

Prenons l'exemple bien connu du champ extérieur généré par une masse unique à symétrie sphérique.

.

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

Cette solution est en général représentée par la forme de Schwarzschild, en coordonnées spatiales sphériques, par:

$$ds^2 = dt^2 \left[1 - \frac{2M}{r} \right] - \frac{dr^2}{\left[1 - \frac{2M}{r} \right]} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

Où t , est la coordonnée temporelle (convergeant avec le temps propre à l'infini) et r , θ , φ les coordonnées spatiales.

Mais on peut faire une transformation de coordonnées pour définir une nouvelle coordonnée temporelle T telle que:

$$T = t + 2GM \left(\sqrt{\frac{2r}{GM}} + \ln \left(\frac{\sqrt{r - \sqrt{2GM}}}{\sqrt{r + \sqrt{2GM}}} \right) \right) \quad \text{si } r > 2GM$$

$$T = t + 2GM \left(\sqrt{\frac{2r}{GM}} + \ln \left(\frac{\sqrt{2GM - r}}{\sqrt{r + \sqrt{2GM}}} \right) \right) \quad \text{si } r < 2GM$$

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

Ce changement de coordonnée paraît bien étrange et inutilement compliqué.

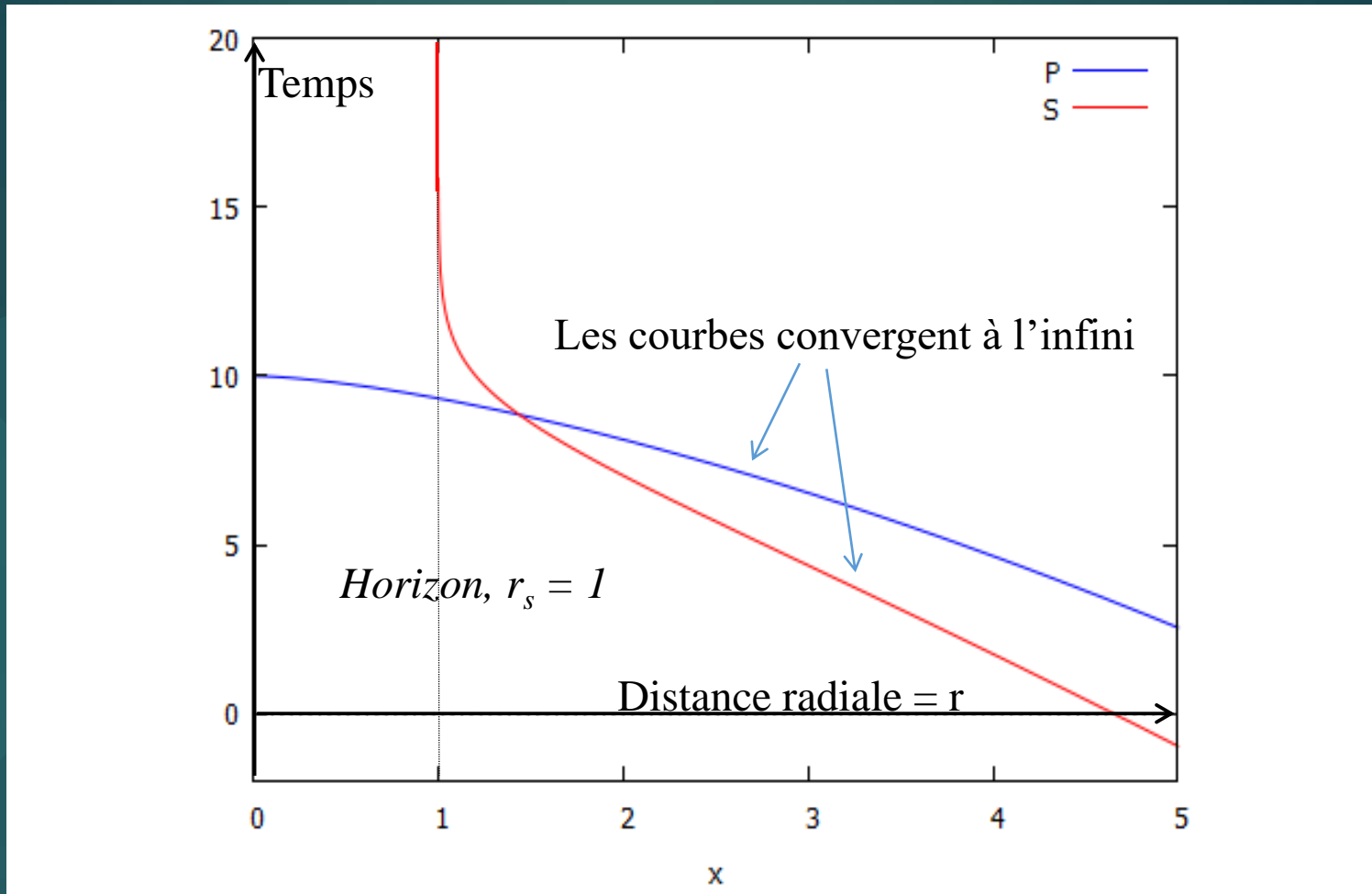
Pourtant il va simplifier la représentation du mouvement géodésique radial d'un observateur montrant qu'il traverse l'horizon en un temps fini et atteint ensuite la singularité en un temps fini. La métrique associée est:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dT^2 + 2 \sqrt{\frac{2GM}{r}} dr \cdot dT + dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

Tout aussi valide que celle de Schwarzschild .

La diversité des coordonnées temporelles qu'on peut utiliser attestent que cette coordonnée ne peut pas représenter le « Temps », même si son ADN en contient!

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 $ds^2 = c^2d\tau^2$) 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:

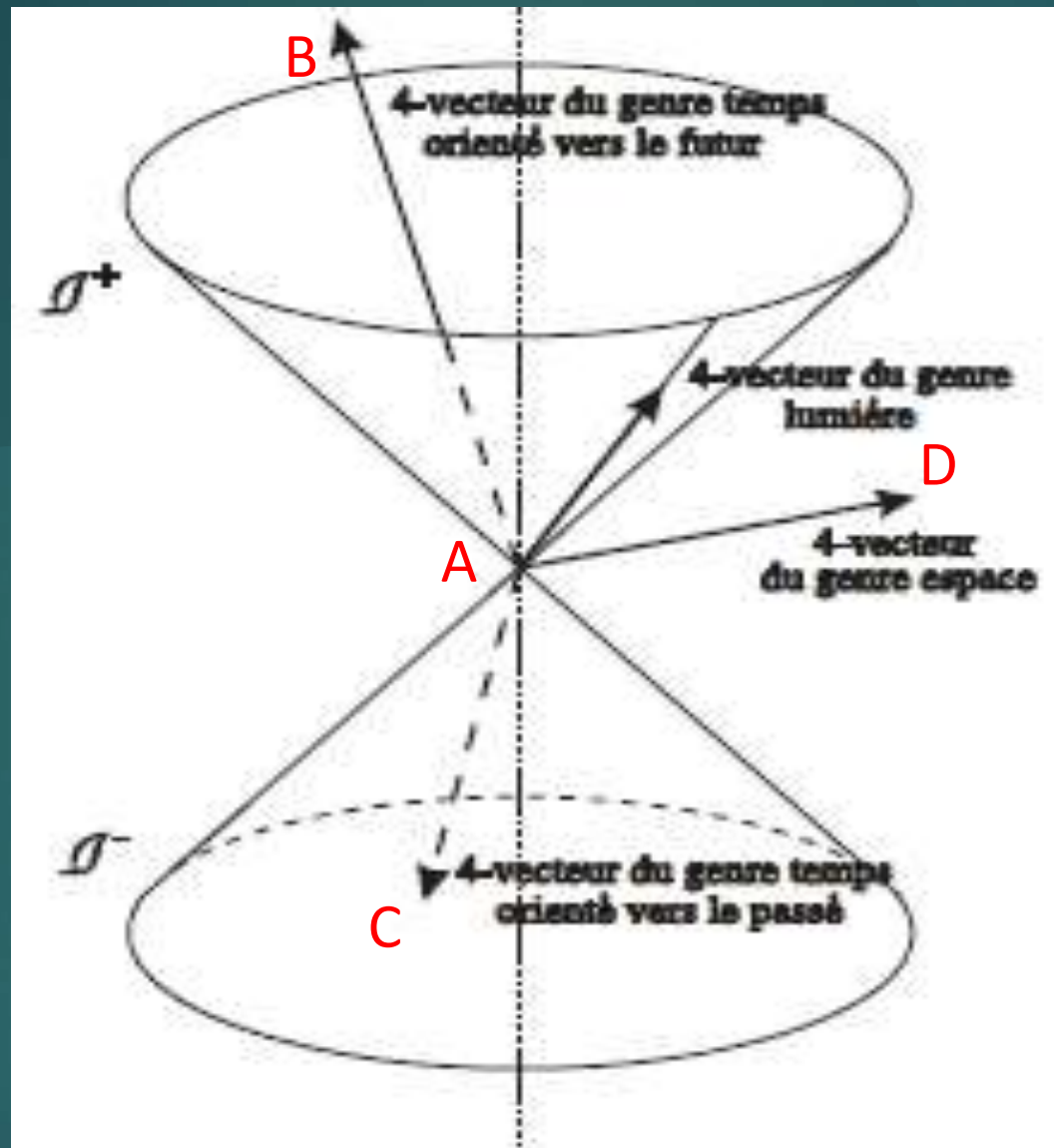
$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

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, difficile de dire si l'un est la cause de l'autre.

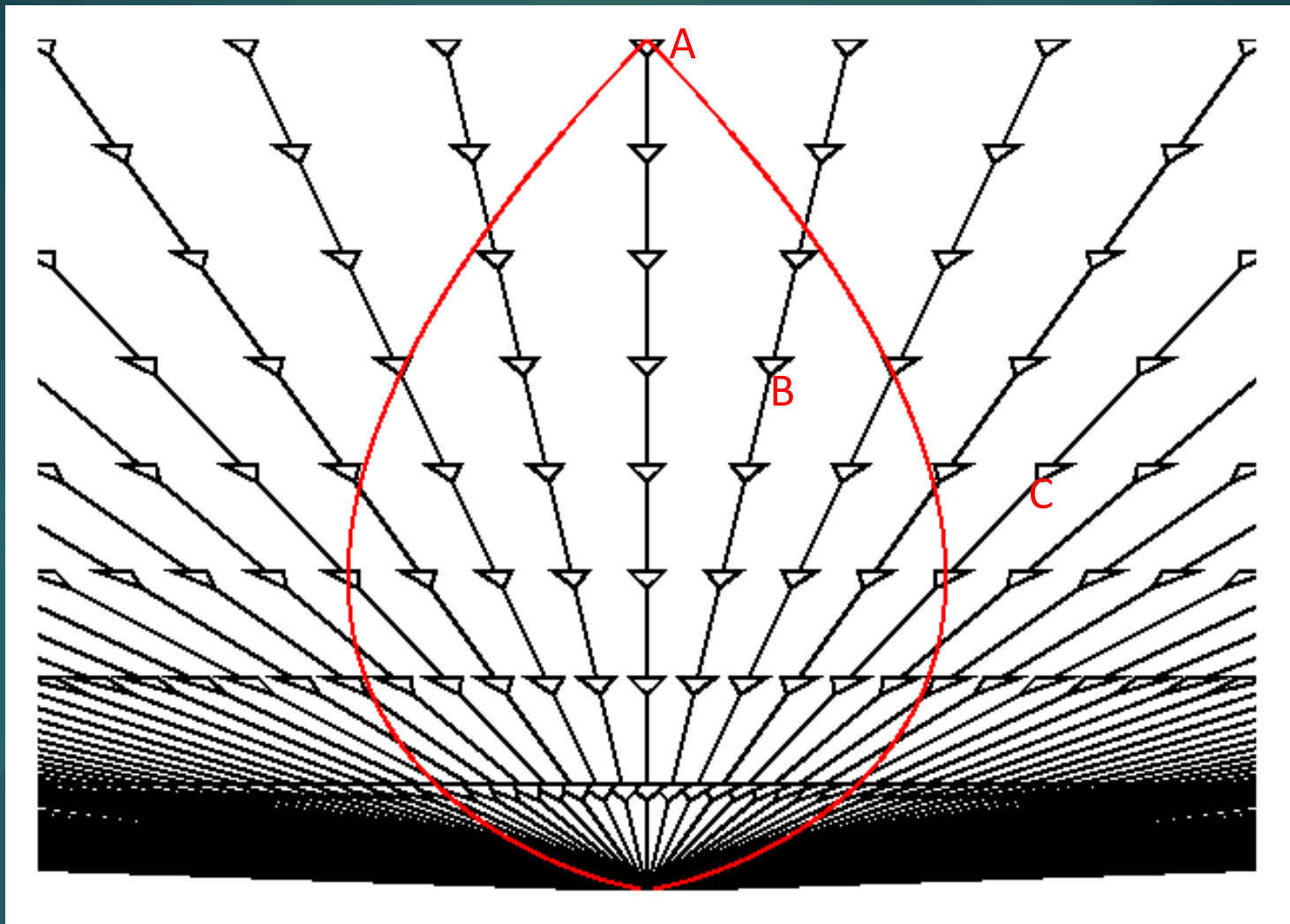
Notre propre pensée, phénomène dynamique qui se fait dans le temps met en jeu des transferts d'énergie.

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

La causalité en relativité générale

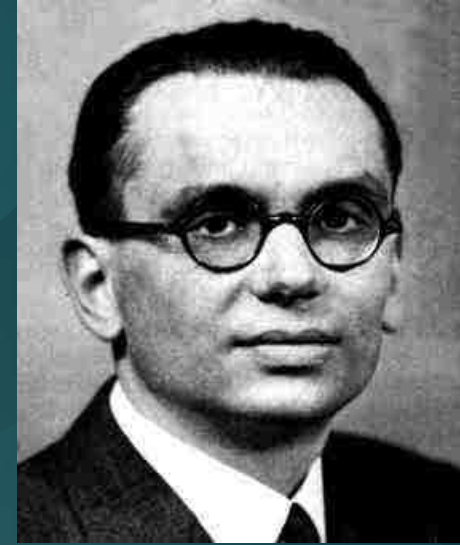
Nous avons vu comment l'espace-temps courbe de la relativité générale déformait le cône de lumière global, (en tout point tangent aux petits cônes de lumière des autres géodésiques de la même famille), définissant le passé et le futur (bien que nous ne l'avons pas représenté, on voit comment on pourrait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

Si ceci se produit nous allons encourir des paradoxes temporels.

Kurt Gödel (entre autres) a montré qu'on peut construire (géométriquement) de tels espace-temps, sans préjuger de leur caractère physique (existe-t-il une configuration de matière énergie physique de nature connue générant de telles géométries?)

La causalité en relativité générale

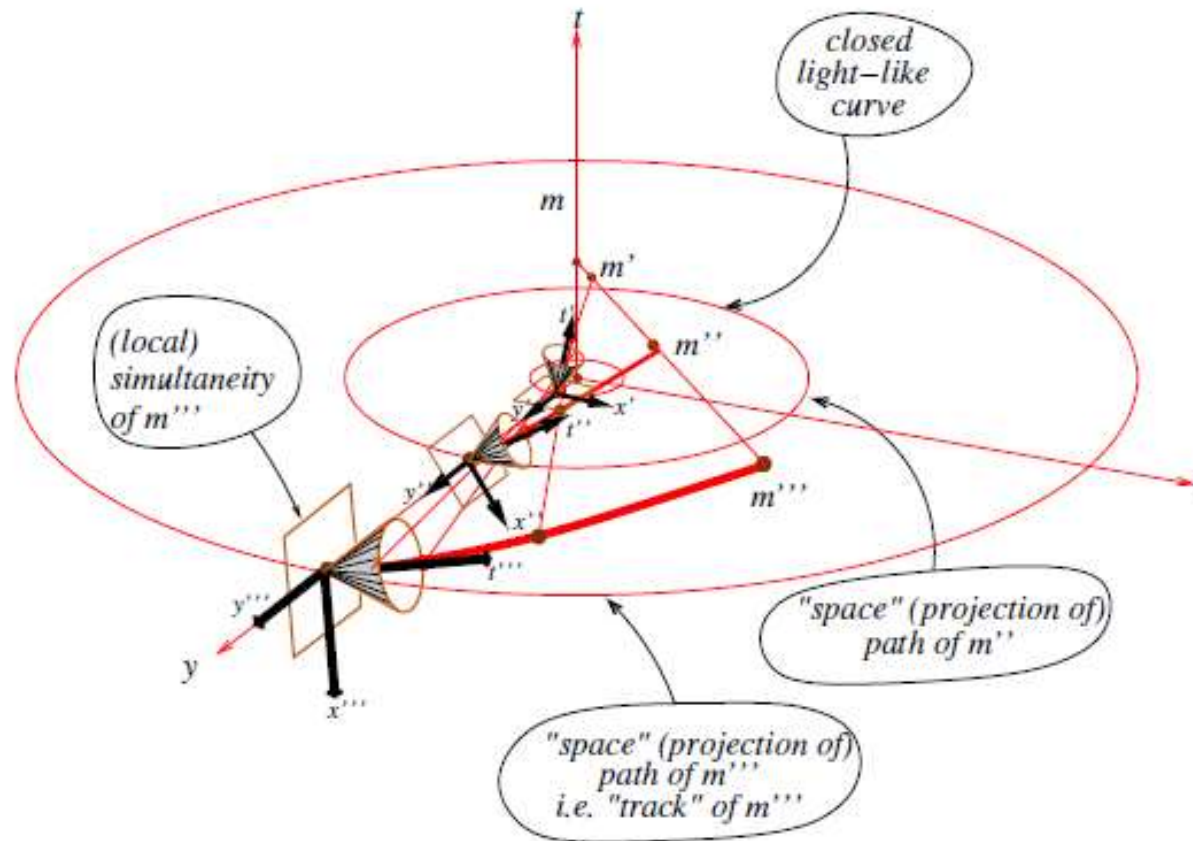


Figure 3: Observers m', m'', m''' perform a rigid rotation around observer m . Such observers are the only mass-carriers in this universe. Because of this rotation, m''' moves so fast that his light-cone tilts over so much that it is almost horizontal.

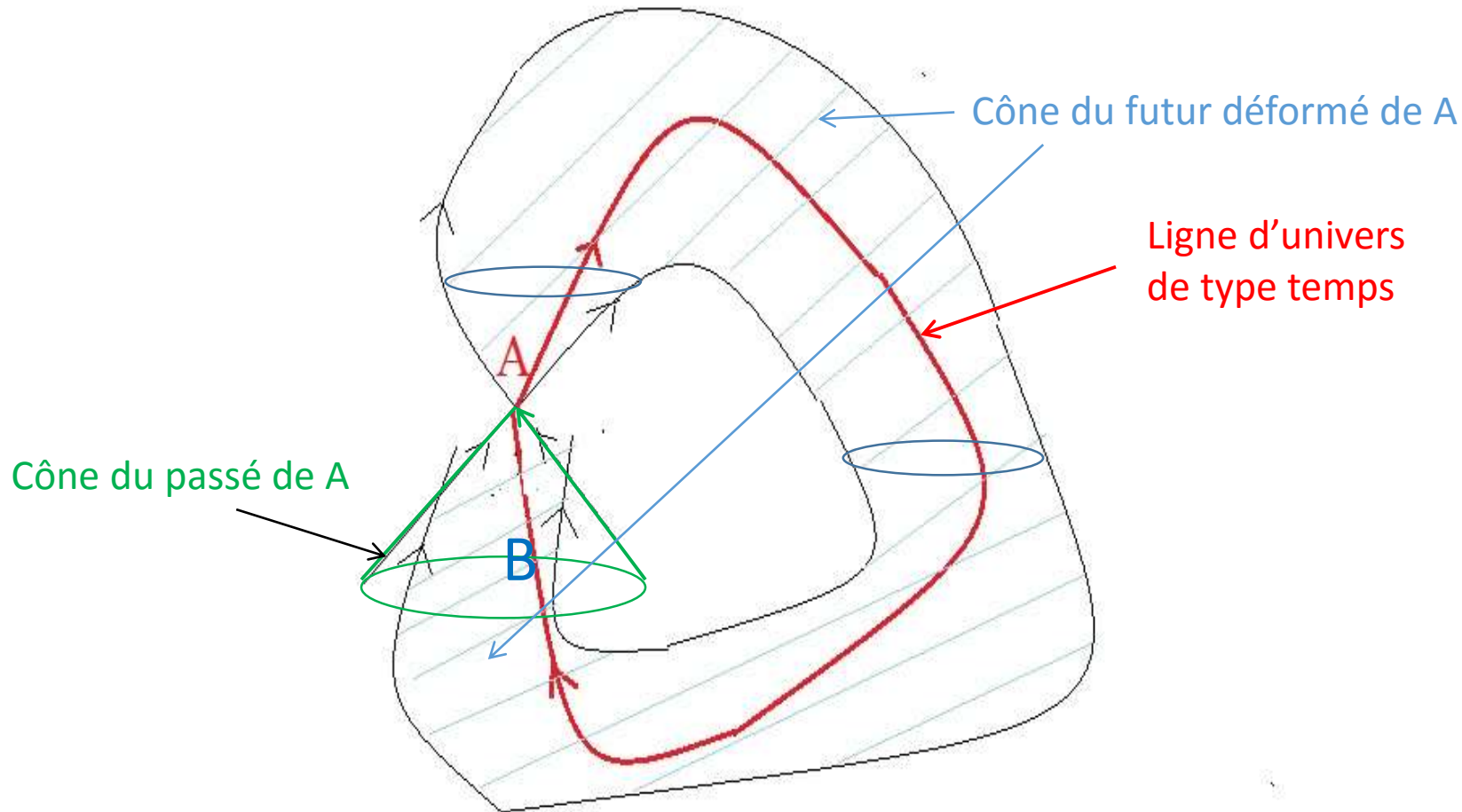
Un univers cylindrique « en rotation » de Gödel

La causalité en relativité générale

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.

La causalité en relativité générale: Trou Noir de Kerr et Carter-time-Machine

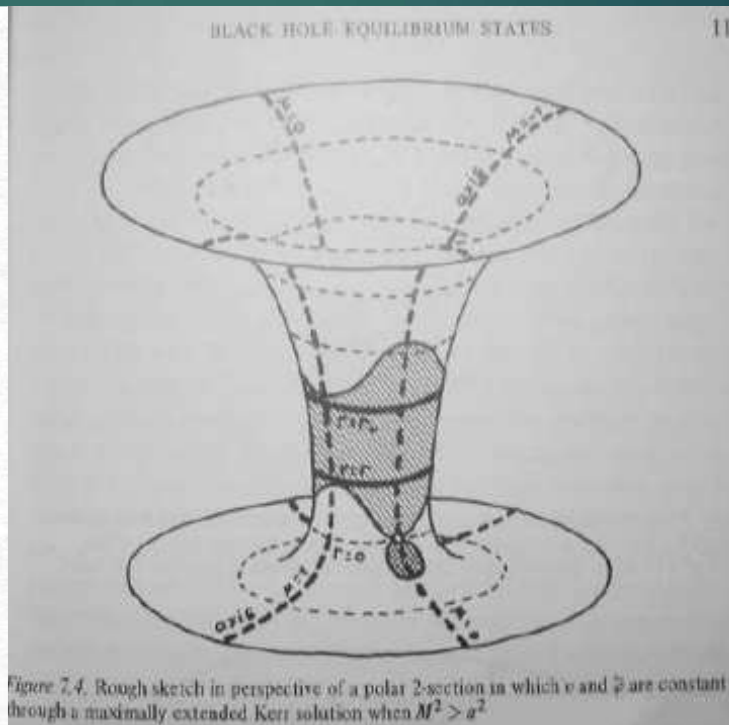
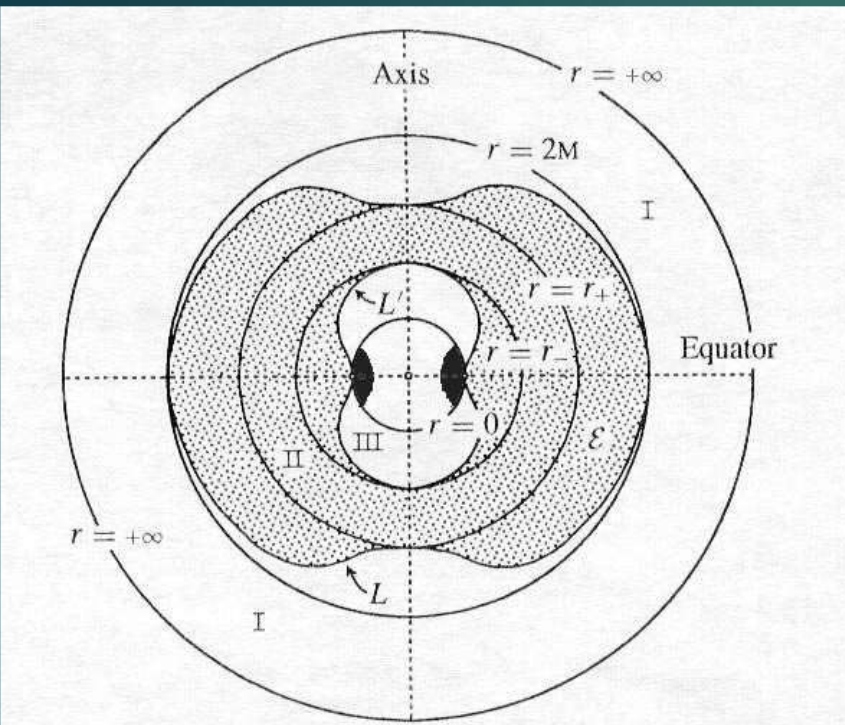


Figure 7.4. Rough sketch in perspective of a polar 2-section in which v and $\bar{\varphi}$ are constant through a maximally extended Kerr solution when $M^2 > a^2$.

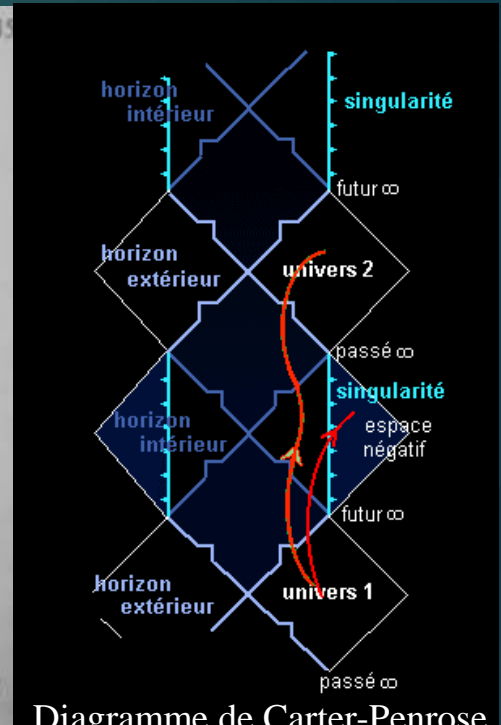


Diagramme de Carter-Penrose

Une section à t et φ constants de l'espace temps de Kerr est représenté ci-dessus au centre¹. La coordonnée r ² se lit les « méridiens » sur la surface de type hyperboloïde (à μ constant).

La coordonnée θ est en représentation polaire ($\mu = \cos\theta$).

¹ Figure empruntée à B. Carter: « Présentation at Christchurch, N.Z, August 2004 ».

² $r = \text{constante}$ est un ellipsoïde ayant pour axe de symétrie l'axe de rotation et de taille dépendant de r .

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?

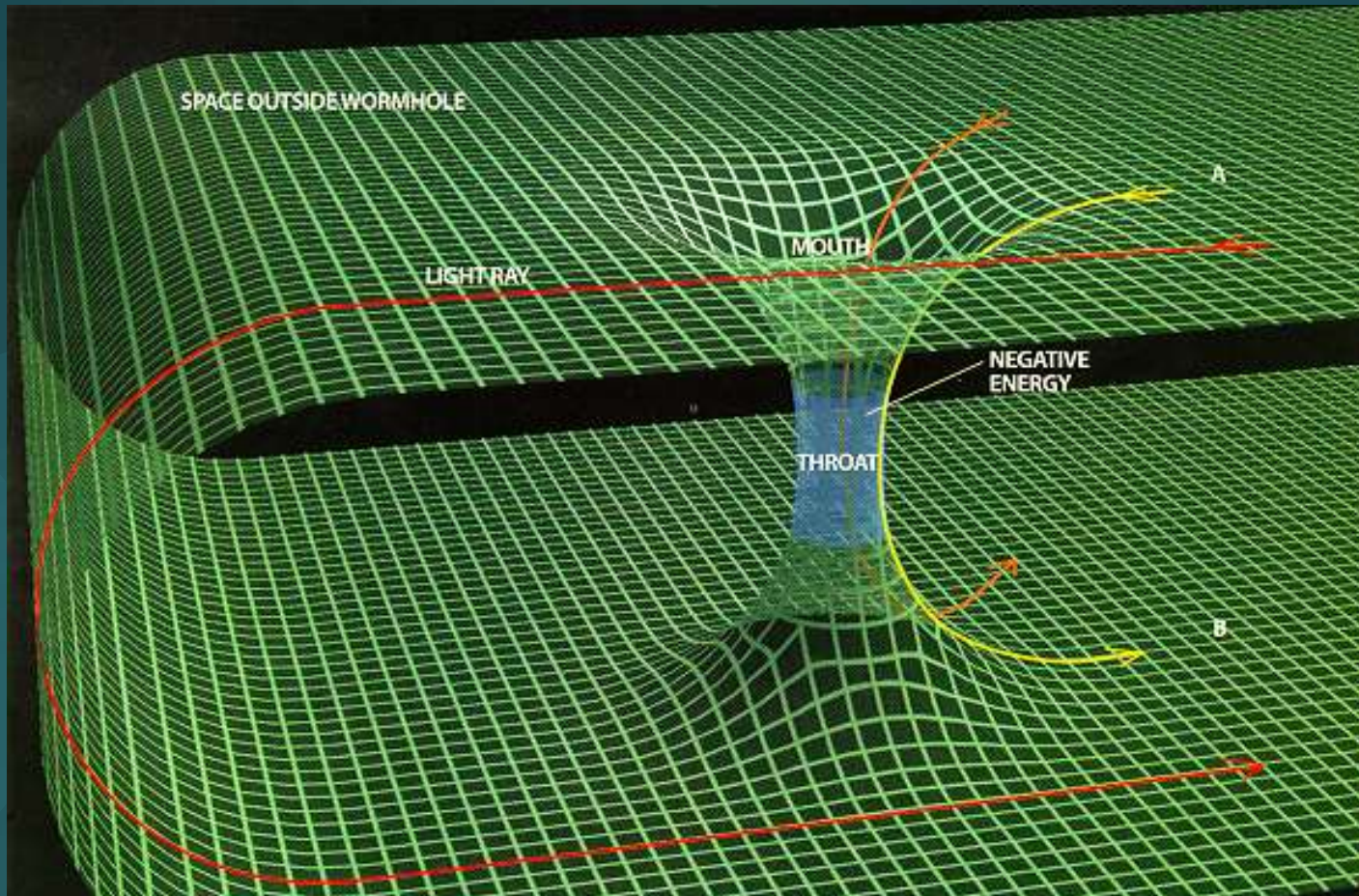
Scientific American, January 2000

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.



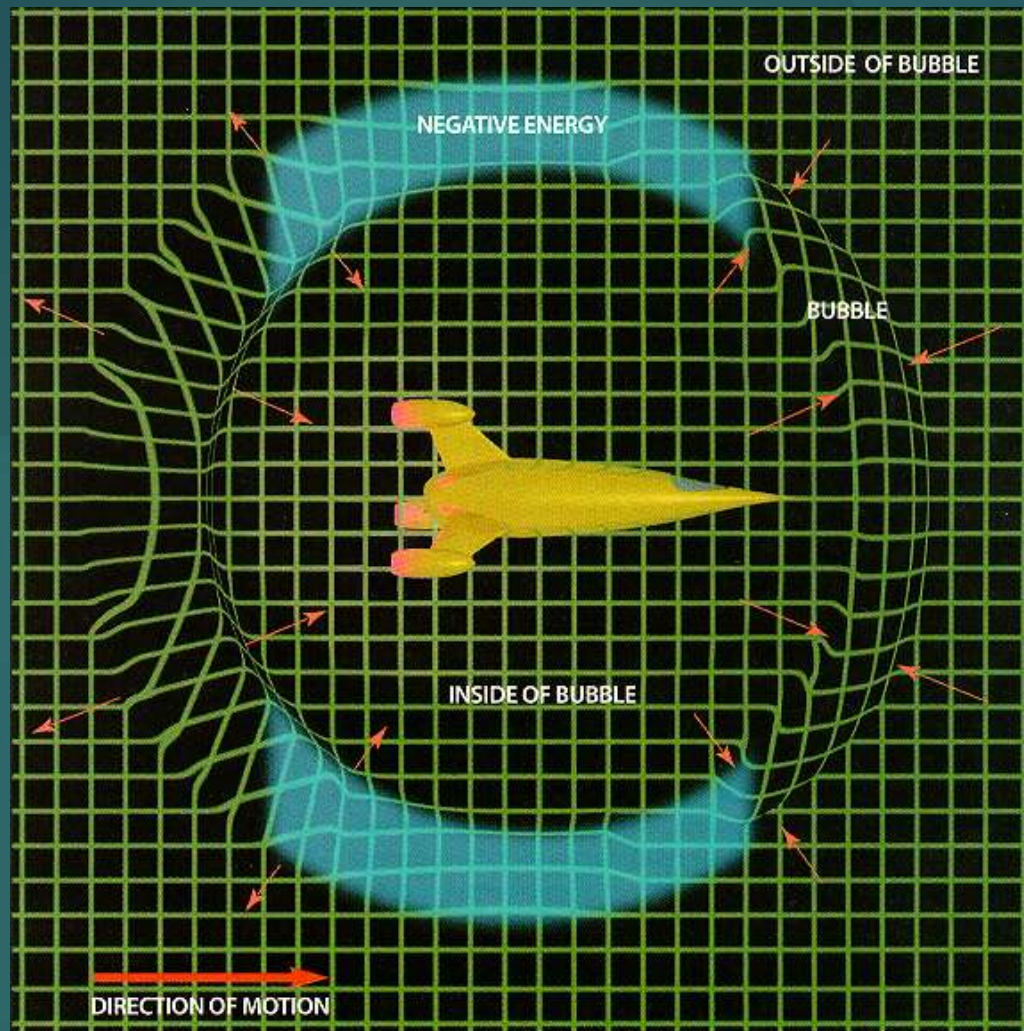
Un trou de ver, s'il en existe, apparaîtrait comme une bulle sphérique contenant une autre partie de l'univers. Dans cette photo de Times Square, le trou de ver permet aux newyorkais d'atteindre le Sahara en un seul pas, évitant des heures de vol vers Tamanrasset. Bien que ces trous de ver ne violent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

Après cette digression ludique revenons au corps du propos.

Comme nous l'avons déduit, « l'expansion » de l'univers doit s'apprécier comme la divergence des géodésiques du point de vue de l'observateur.

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.

La flèche du temps

Mais on peut aussi constater que ce sens correspond à celui qui permet l'évolution de la vie, telle qu'on la connaît, avec toutes les conditions associées (principe anthropique).

Ceci est-il une tautologie ou une contrainte?

Peut-être que dans l'autre sens une autre forme de structuration intelligente serait possible, mais ces anti-êtres arriveraient sans doute au même constat.

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 afffin, que par un paramétrage particulier on peut faire correspondre au temps propre sur une ligne de type temps, qui permet d'ordonner les évènements.

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 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.

Le temps en physique des particules

Cette physique s'appuie en général sur la relativité restreinte pour définir le cadre de la description des phénomènes.

Mais il est intéressant de noter que si les fermions semblent associés à l'espace (cf principe d'exclusion de Pauli), les bosons médiateurs des interactions (les champs) entre ces fermions, donc agents de la dynamique d'un système doivent alors être associés au paramètre dynamique de type temps.

Nous ne développerons pas cette phénoménologie, mais cette représentation devrait trouver une cohérence avec la relativiste à travers une description formelle (si l'espace est représenté par une fonction continue, le temps l'est par une fonction fréquentielle) .

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.