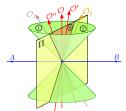
# Les tachyons : un aperçu graphique

#### Éric Gourgoulhon

Laboratoire Univers et Théories Observatoire de Paris / CNRS / Université Paris Diderot Meudon, France

http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/



#### Plan

- Introduction
- 2 Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- **6** Conclusions

#### Outline

- Introduction
- 2 Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- 6 Conclusions

#### **Avertissement**

Ce qui suit n'est pas une tentative d'interprétation en terme de tachyon des neutrinos annoncés superluminiques dans l'expérience OPERA [Adam et al., arXiv:1109.4897].

D'ailleurs, si les résultats d'OPERA sont corrects ( $V=1.000025\,c$  à  $E\sim17$  GeV), la comparaison avec les résultats sur les neutrinos de la supernova SN 1987A ( $|V-c|<2\times10^{-9}c$  à  $E\sim0.01$  GeV) montre qu'une interprétation naïve en terme de tachyon ne tient pas, car pour un tachyon, la vitesse est une fonction décroissante de l'énergie, ainsi que nous le verrons plus bas.

#### **Avertissement**

Ce qui suit n'est pas une tentative d'interprétation en terme de tachyon des neutrinos annoncés superluminiques dans l'expérience OPERA [Adam et al., arXiv:1109.4897].

D'ailleurs, si les résultats d'OPERA sont corrects ( $V=1.000025\,c$  à  $E\sim17$  GeV), la comparaison avec les résultats sur les neutrinos de la supernova SN 1987A ( $|V-c|<2\times10^{-9}c$  à  $E\sim0.01$  GeV) montre qu'une interprétation naïve en terme de tachyon ne tient pas, car pour un tachyon, la vitesse est une fonction décroissante de l'énergie, ainsi que nous le verrons plus bas.

Le but est ici d'exposer quelques propriétés élémentaires des tachyons classiques (non quantiques), sans calcul, à l'aide uniquement de diagrammes d'espace-temps et en mettant l'accent sur les problèmes de causalité.

## Quelques dates dans l'histoire des tachyons

- Einstein (1905) : la vitesse de la lumière "joue du point de vue physique le rôle des vitesses infiniment grandes" ; l'énergie cinétique d'un électron diverge lorsque  $V \to c \Longrightarrow V > c$  impossible
- Einstein (1907) : signal superluminique ⇒ paradoxe causal (l'effet précède la cause)
- Tolman (1917): reprend l'argument d'Einstein (→ paradoxe de Tolman)
- Bilaniuk, Deshpande & Sudarshan (1962) : notion de particule superluminique cohérente avec la relativité restreinte : masse imaginaire, vitesse toujours >c; résolution du problème de causalité via l'interprétation de Stueckelberg-Feynman
- Feinberg (1967): introduit le terme tachyon; décrit l'anti-téléphone; premier traitement en théorie quantique des champs pour un spin 0 ⇒ fermions scalaires (!)
- Pirani (1970) : paradoxe causal plus subtil que l'anti-téléphone; résolu en 1971
- Cawley (1972) : on ne doit pas exclure que le neutrino soit un tachyon
- 1970-1985 : nombreux études et débats (Recami et al.)

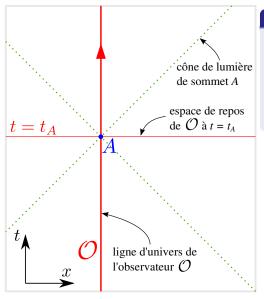
17 octobre 2011

### Outline

- Introduction
- 2 Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- Conclusions



## Diagrammes d'espace-temps Minkowski (1909)

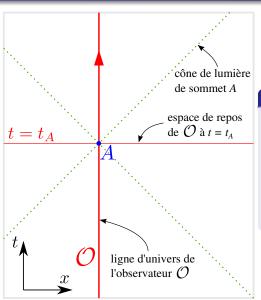


#### Intérêt des diag. d'espace-temps :

- description d'une particule dans sa globalité spatio-temporelle : ligne d'univers
- mise en exergue de la structure fondamentale de la relativité : les cônes de lumière

En un point A, le cône de lumière est formé par les lignes d'univers des photons arrivant ou issus de A. Les cônes de lumière sont des structures absolues, indépendantes de tout observateur (traduction géométrique de l'invariance de c). Ils correspondent aux directions isotropes de la métrique d'espace-temps q.

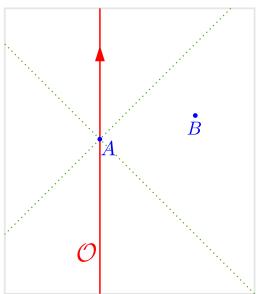
## Diagrammes d'espace-temps Minkowski (1909)



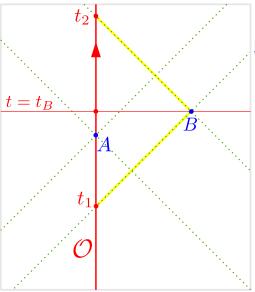
#### Observateur inertiel

La ligne d'univers de tout observateur inertiel est une droite située à *l'intérieur* de tout cône de lumière ayant son sommet sur elle.

L'espace de repos de  $\mathcal O$  à  $t=t_A$  est l'ensemble des événements simultanés à A du point de vue de  $\mathcal O$ 



 $\begin{tabular}{ll} {\bf Datation \ d'un \ \'ev\'enement \ distant \ } B \\ {\bf par \ l'observateur \ } {\cal O} \end{tabular}$ 

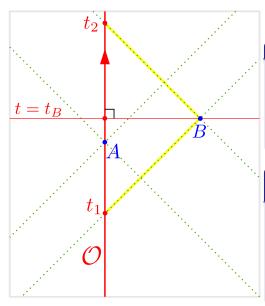


Datation d'un événement distant B par l'observateur  $\mathcal{O}$  ?

#### Simultanéité d'Einstein-Poincaré

Aller-retour d'un signal lumineux de  $\mathcal{O}$  vers B : mesure de  $t_1$  (départ) et de  $t_2$  (retour)

$$\implies t_B := \frac{1}{2} \left( t_1 + t_2 \right)$$



Datation d'un événement distant B par l'observateur  $\mathcal{O}$ ?

#### Simultanéité d'Einstein-Poincaré

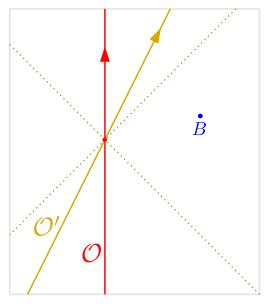
Aller-retour d'un signal lumineux de  $\mathcal{O}$  vers B : mesure de  $t_1$  (départ) et de  $t_2$  (retour)

$$\Longrightarrow t_B := \frac{1}{2} (t_1 + t_2)$$

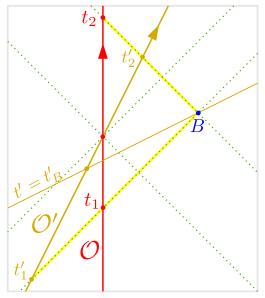
## Orthogonalité vis-à-vis du tenseur métrique

L'ensemble des événements simultanés à B pour  $\mathcal O$  est un espace de dimension 3 **orthogonal** (au sens du tenseur métrique g) à la ligne d'univers de  $\mathcal O$ 

 $\Longrightarrow$  espace de repos de  $\mathcal O$ 



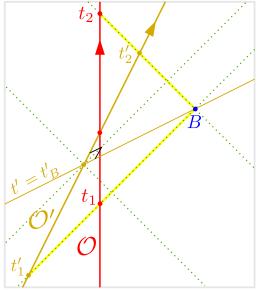
Datation de B par un deuxième observateur  $\mathcal{O}'$ 



Datation de B par un deuxième observateur  $\mathcal{O}'$ 

Critère d'Einstein-Poincaré

$$\Longrightarrow \left| t_B' = \frac{1}{2} \left( t_1' + t_2' \right) \right|$$

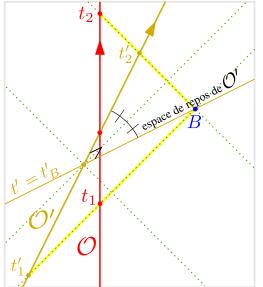


Datation de B par un deuxième observateur  $\mathcal{O}'$ 

Critère d'Einstein-Poincaré

$$\Longrightarrow t'_B = \frac{1}{2} \left( t'_1 + t'_2 \right)$$

L'ensemble des événements simultanés à B pour  $\mathcal{O}'$  (espace de repos de  $\mathcal{O}'$ ) est un espace **orthogonal** (au sens de la métrique g) à la ligne d'univers de  $\mathcal{O}'$ 



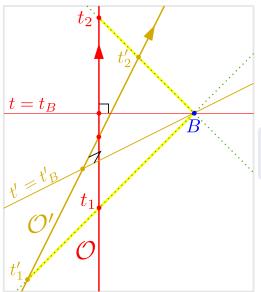
Datation de B par un deuxième observateur  $\mathcal{O}'$ 

Critère d'Einstein-Poincaré

$$\Longrightarrow t_B' = \frac{1}{2} \left( t_1' + t_2' \right)$$

L'ensemble des événements simultanés à B pour  $\mathcal{O}'$  (espace de repos de  $\mathcal{O}'$ ) est un espace **orthogonal** (au sens de la métrique g) à la ligne d'univers de  $\mathcal{O}'$ 

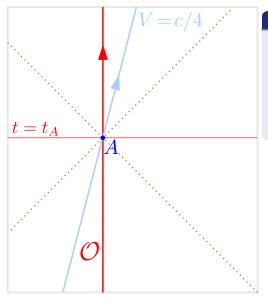
Graphiquement il s'obtient par symétrie de la ligne d'univers de  $\mathcal{O}'$  par rapport à la bissectrice du quadrant  $(t>0,\ x>0)$ 



Les espaces de repos de  $\mathcal{O}$  et  $\mathcal{O}'$  ne coı̈ncident pas : relativité de la notion de simultanéité

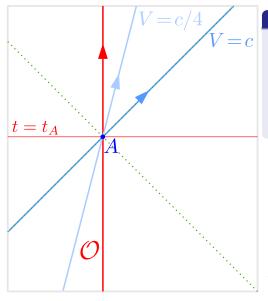
### Outline

- Introduction
- Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- Conclusions



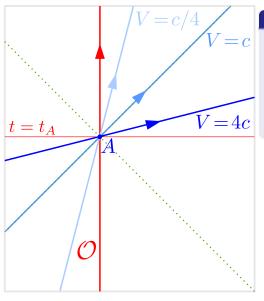
### Classification des particules

 bradyon ≡ ligne d'univers du genre temps



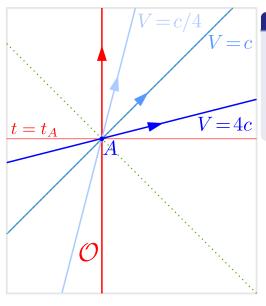
#### Classification des particules

- bradyon ≡ ligne d'univers du genre temps
- luxon ≡ ligne d'univers du genre lumière



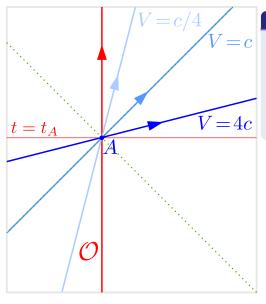
#### Classification des particules

- bradyon ≡ ligne d'univers du genre temps
- luxon ≡ ligne d'univers du genre lumière
- tachyon ≡ ligne d'univers du genre espace



#### Classification des particules

- bradyon ≡ ligne d'univers du genre temps
- luxon ≡ ligne d'univers du genre lumière
- tachyon ≡ ligne d'univers du genre espace
- bradyon = particule massive ordinaire (proton, neutron, électron, quark, etc.)
- luxon = particule de masse nulle (photon, graviton?)



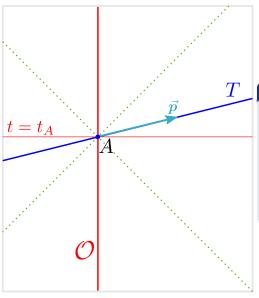
#### Classification des particules

- bradyon ≡ ligne d'univers du genre temps
- luxon ≡ ligne d'univers du genre lumière
- tachyon ≡ ligne d'univers du genre espace

#### Remarques:

- Ces définitions sont indépendantes de tout observateur
- La ligne d'univers d'un tachyon est partout du genre espace

## Dynamique d'un tachyon

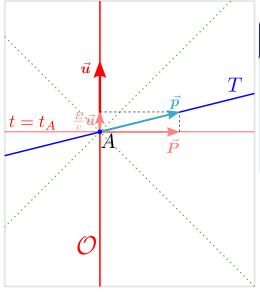


#### 4-impulsion

Comme pour toute particule, la dynamique d'un tachyon T peut être décrite par un vecteur<sup>a</sup>  $\vec{p}$ , appelé **4-impulsion**, défini en tout point de sa ligne d'univers et tangent à elle.

<sup>a</sup>vecteur d'espace-temps, souvent appelé *quadrivecteur* 

## Dynamique d'un tachyon



## Énergie et quantité de mouvement par rapport à un observateur

L'énergie E et la quantité de mouvement  $\vec{P}$  mesurées par  $\mathcal O$  sont données par la décomposition orthogonale de la 4-impulsion :

$$\vec{p} = \frac{E}{c}\vec{u} + \vec{P}$$

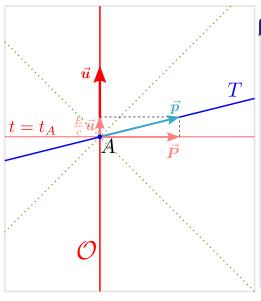
où  $\vec{u}$  est la 4-vitesse de  $\mathcal{O}$ .

Rappel : 4-vitesse : vecteur unitaire tangent à la ligne d'univers et dirigé vers le futur

Remarque : écriture équivalente :

$$p^{\alpha} = (E/c, P^x, P^y, P^z)$$

## Masse d'un tachyon

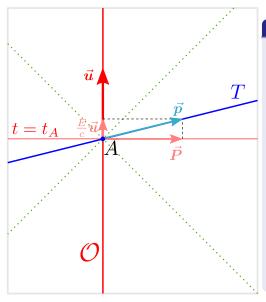


#### Masse

La masse m d'une particule est donnée par la norme de la 4-impulsion vis-à-vis du tenseur métrique<sup>a</sup> :

$$m^2c^2 = -\vec{\boldsymbol{p}}\cdot\vec{\boldsymbol{p}}$$

## Masse d'un tachyon



#### Masse

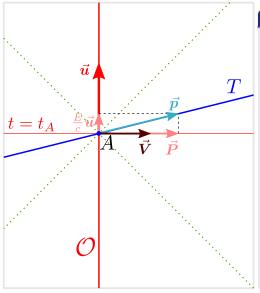
La masse m d'une particule est donnée par la norme de la 4-impulsion vis-à-vis du tenseur métrique<sup>a</sup> :

$$m^2c^2 = -\vec{\boldsymbol{p}}\cdot\vec{\boldsymbol{p}}$$

- bradyon  $\iff \vec{p}$  genre temps  $\iff m > 0$
- luxon  $\iff \vec{p}$  genre lumière  $\iff m = 0$
- $\begin{array}{ll} \bullet \;\; {\rm tachyon} \;\; \Longleftrightarrow \;\; \vec{p} \; {\rm genre} \;\; {\rm espace} \\ \;\; \Longleftrightarrow \;\; m^2 < 0 \\ \;\; \Longleftrightarrow \;\; m \;\; {\rm imaginaire} \\ \end{array}$

aon utilise la signature (-,+,+,+)

## Vitesse du tachyon par rapport à un observateur

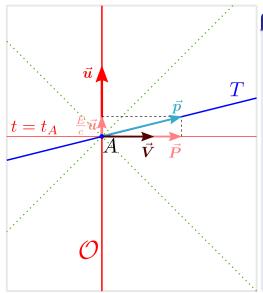


#### Vecteur vitesse

Comme pour toute particule, la vitesse  $\vec{V}$  du tachyon par rapport à l'observateur  $\mathcal{O}$  vérifie

$$\vec{P} = \frac{E}{c^2} \vec{V}$$

## Vitesse du tachyon par rapport à un observateur



#### Vecteur vitesse

Comme pour toute particule, la vitesse  $\vec{V}$  du tachyon par rapport à l'observateur  $\mathcal O$  vérifie

$$\vec{\boldsymbol{P}} = \frac{E}{c^2} \, \vec{\boldsymbol{V}}$$

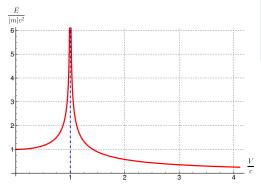
$$\left. egin{aligned} \vec{m{u}} \cdot \vec{m{u}} &= -1 \\ \vec{m{u}} \cdot \vec{m{P}} &= 0 \end{aligned} \right\} \Longrightarrow$$

$$|m|^2 c^2 = \vec{p} \cdot \vec{p} = -E^2/c^2 + P^2$$
  
=  $\frac{E^2}{c^2} \left( -1 + \frac{V^2}{c^2} \right)$ 

$$\implies V > c$$

Le tachyon est donc superluminique par rapport à tout observateur.

## Relation énergie-vitesse



#### Énergie d'un tachyon

La relation précédente se met sous la forme

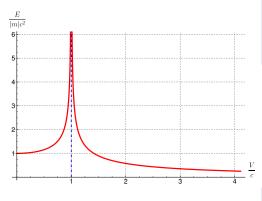
$$E = \frac{|m|c^2}{\sqrt{V^2/c^2 - 1}}$$

Remarque : On peut réécrire cette formule sous la forme usuelle :

$$E = \Gamma mc^2$$

avec  $\Gamma:=1/\sqrt{1-V^2/c^2}$  et m tous deux imaginaires.

## Relation énergie-vitesse



#### Énergie d'un tachyon

La relation précédente se met sous la forme

$$E = \frac{|m|c^2}{\sqrt{V^2/c^2 - 1}}$$

Remarque : On peut réécrire cette formule sous la forme usuelle :

$$E = \Gamma mc^2$$

avec  $\Gamma := 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$  et m tous deux imaginaires.

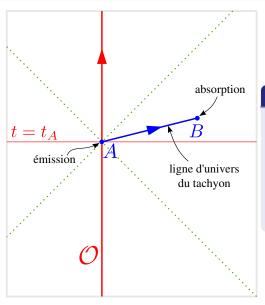
L'énergie des tachyons est une fonction décroissante de la vitesse. avec  $E \to 0$  lorsque  $V \to +\infty$ .

Les tachyons: un aperçu graphique

18 / 42

#### Outline

- Introduction
- Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- 6 Conclusions

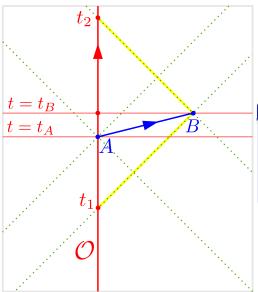


#### Émission et absorption d'un tachyon

- ullet émission en A
- ullet absorption en B

La ligne d'univers du tachyon est à l'extérieur du cône de lumière.

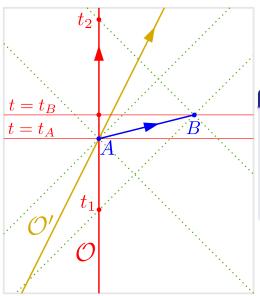
Dans le cas présent, la vitesse du tachyon par rapport à  $\mathcal O$  est V=4c.



#### Instant de l'absorption mesuré par ${\cal O}$

 $t_B = \frac{1}{2} (t_1 + t_2)$  (simultanéité d'Einstein-Poincaré)

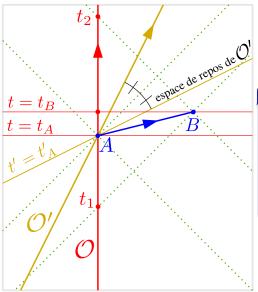
 $t_B > t_A$  : l'absorption se produit après l'émission



#### Deuxième observateur $\mathcal{O}'$

 $\mathcal{O}'$  est en mouvement (subluminique) par rapport à  $\mathcal{O}$ .

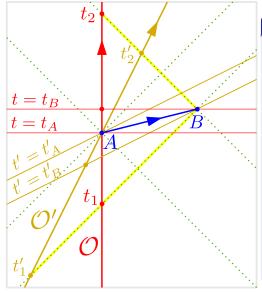
Dans le cas présent, la vitesse de  $\mathcal{O}'$  par rapport à  $\mathcal{O}$  est U=c/2 et  $\mathcal{O}'$  rencontre  $\mathcal{O}$  au moment de l'émission du tachyon.



#### Deuxième observateur $\mathcal{O}'$

 $\mathcal{O}'$  est en mouvement (subluminique) par rapport à  $\mathcal{O}$ .

Dans le cas présent, la vitesse de  $\mathcal{O}'$  par rapport à  $\mathcal{O}$  est U=c/2 et  $\mathcal{O}'$  rencontre  $\mathcal{O}$  au moment de l'émission du tachyon.



### Le paradoxe (Einstein, 1907)

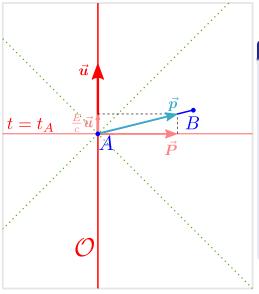
Pour  $\mathcal{O}'$ , la date  $t_B'$  de l'événement B est obtenue en considérant l'espace de repos de  $\mathcal{O}'$  passant par B.

Numériquement, on l'obtient à partir de l'aller-retour d'un signal lumineux (critère d'Einstein-Poincaré) :

$$t_B' = \frac{1}{2}(t_1' + t_2')$$

On constate que  $t_B^\prime < t_A^\prime$ 

Pour l'observateur  $\mathcal{O}'$ , l'absorption du tachyon se produit avant son émission!



### Résolution du paradoxe (1/4)

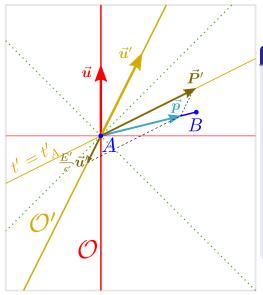
Introduisons la 4-impulsion  $\vec{p}$  du tachyon.

L'énergie E et la quantité de mouvement  $\vec{P}$  mesurées par  $\mathcal O$  sont données par la décomposition orthogonale de  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = \frac{E}{c}\vec{u} + \vec{P},$$

où  $\vec{u}$  est la 4-vitesse de  $\mathcal{O}$ .

On constate que E > 0.



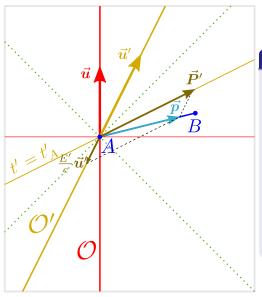
### Résolution du paradoxe (2/4)

Point de vue de l'observateur  $\mathcal{O}'$ : l'énergie E' et la quantité de mouvement  $\vec{P}'$  du tachyon mesurées par  $\mathcal{O}'$  sont données par la décomposition orthogonale de  $\vec{p}$  vis-à-vis de  $\mathcal{O}'$ :

$$\vec{p} = \frac{E'}{c}\vec{u}' + \vec{P}',$$

où  $\vec{u}'$  est la 4-vitesse de  $\mathcal{O}'$ .

On constate que E' < 0.

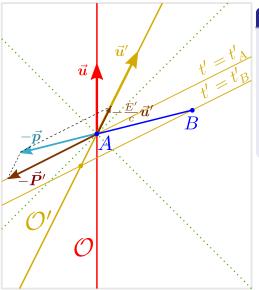


#### Résolution du paradoxe (3/4)

Point de vue de l'observateur  $\mathcal{O}'$ : Le tachyon apparaît comme une particule d'énergie *négative* qui remonte le temps (puisque  $t'_{B} < t'_{A}$ )

Interprétation de Stueckelberg-Feynman : une telle particule est équivalente à une particule d'énergie positive qui va de B vers A (antiparticule).

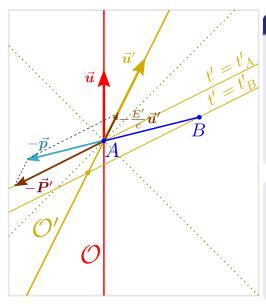
[Bilaniuk, Deshpande, & Sudarshan, Amer. J. Phys. **30**, 718 (1962)]



### Résolution du paradoxe (4/4)

		0	$\mathcal{O}'$
	$\overline{4}$	émission	absorption
		↓ ↓	1
Ì	В	absorption	émission

Pour chaque observateur, l'émission précède l'absorption : la causalité est préservée!



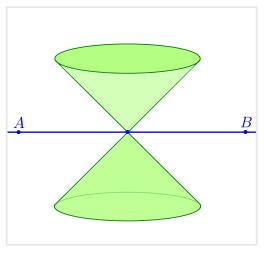
### Résolution du paradoxe (4/4)

	0	$\mathcal{O}'$
$\overline{A}$	émission	absorption
	↓ ↓	1
B	absorption	émission

Pour chaque observateur, l'émission précède l'absorption : la causalité est préservée!

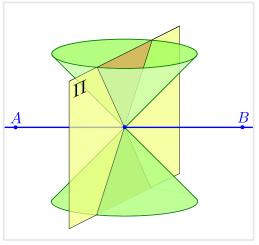
Les concepts d'émission et d'absorption d'un tachyon sont donc relatifs à l'observateur.

Il n'y a que les **lois physiques** qui doivent être invariantes par changement d'observateur inertiel, pas la description des phénomènes.

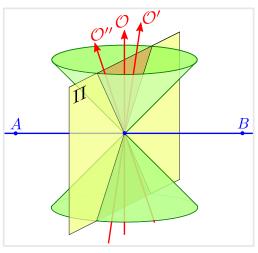


La ligne d'univers d'un tachyon est du genre espace.

Elle est donc, en chaque point, en dehors du cône de lumière issu de ce point.



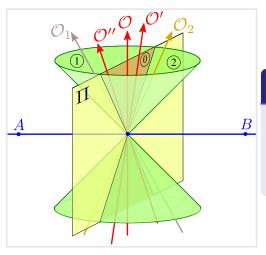
Le complémentaire orthogonal (vis-à-vis de la métrique g) d'une ligne du genre espace est un hyperplan  $\Pi$  du genre temps.



Le complémentaire orthogonal (vis-à-vis de la métrique g) d'une ligne du genre espace est un hyperplan  $\Pi$  du genre temps.

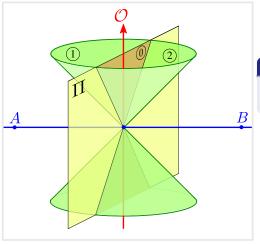
 $\Longrightarrow \exists$  droites du genre temps dans  $\Pi$ 

 $\implies$   $\exists$  observateurs de ligne d'univers orthogonale à celle du tachyon

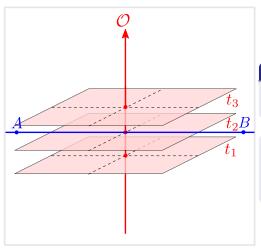


# Classification des observateurs / tachyon

- lacktriangle observateurs dans  $\Pi$
- observateurs dans la moitié "gauche" du cône de lumière
- observateurs dans la moitié "droite" du cône de lumière



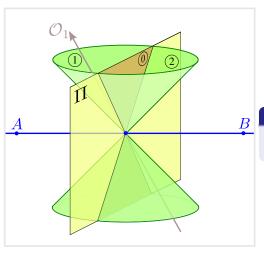
Observateur dans la région 0



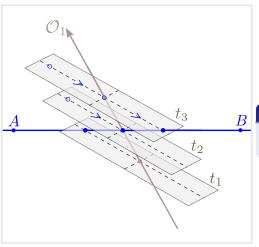
#### Observateur dans la région 0

Le tachyon n'existe qu'à l'instant  $t = t_2$ !

Pour  $\mathcal{O}$ , le tachyon n'apparaît pas comme une particule, mais comme une "connexion" instantanée entre deux événements A et B simultanés.

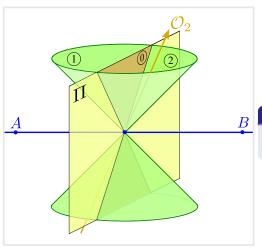


Observateur dans la région 1

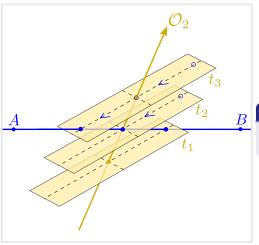


### Observateur dans la région 1

Le tachyon existe à tous les instants et se meut de A vers B.

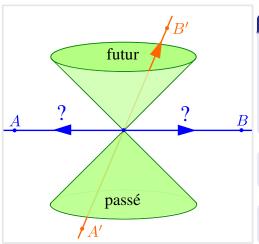


Observateur dans la région 2



### Observateur dans la région 2

Le tachyon existe à tous les instants et se meut de B vers A.



#### Orientation de la ligne d'univers

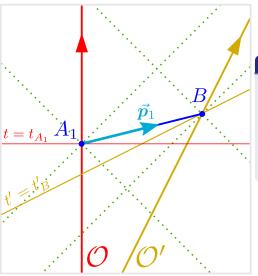
Contrairement à une ligne d'univers du genre temps (bradyon), aucune structure de l'espace-temps de Minkowski ne fournit d'orientation canonique de la ligne d'univers d'un tachyon.

Pas de distinction entre passé et futur à l'extérieur du cône de lumière

Pas d'orientation canonique de la 4-impulsion  $\vec{p}$  d'un tachyon

### Outline

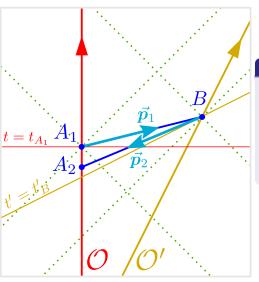
- Introduction
- Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- 6 Conclusions



Version proposée par Feinberg (1967) :

### Principe

L'observateur inertiel  $\mathcal{O}$  émet un tachyon (d'énergie positive) en  $A_1$  qui atteint l'observateur  $\mathcal{O}'$  en B.

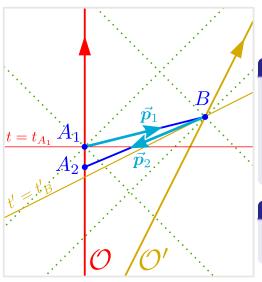


Version proposée par Feinberg (1967) :

#### Principe

L'observateur inertiel  $\mathcal O$  émet un tachyon (d'énergie positive) en  $A_1$  qui atteint l'observateur  $\mathcal O'$  en B.

Dès réception, ce dernier renvoie un tachyon (d'énergie positive) vers  $\mathcal{O}$ , qui le reçoit en  $A_2$ .



Version proposée par Feinberg (1967) :

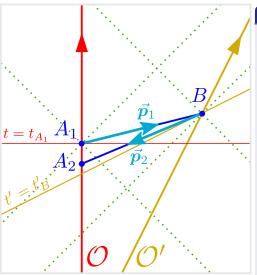
#### Principe

L'observateur inertiel  $\mathcal{O}$  émet un tachyon (d'énergie positive) en  $A_1$  qui atteint l'observateur  $\mathcal{O}'$  en B.

Dès réception, ce dernier renvoie un tachyon (d'énergie positive) vers  $\mathcal{O}$ , qui le reçoit en  $A_2$ .

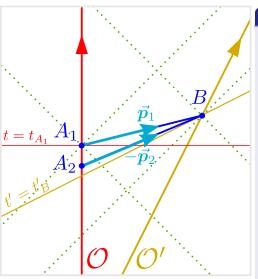
#### Le paradoxe

 $t_{A_2} < t_{A_1}$  : la réponse de  $\mathcal{O}'$  arrive avant l'appel de  $\mathcal{O}$  !



### Résolution du paradoxe

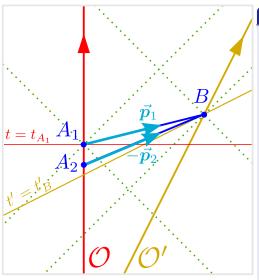
Pour  $\mathcal{O}$  le tachyon qui arrive en  $A_2$  a une énergie négative et remonte le temps



#### Résolution du paradoxe

Pour  $\mathcal O$  le tachyon qui arrive en  $A_2$  a une énergie négative et remonte le temps

- $\Rightarrow \mathcal{O}$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en  $A_2$
- $\equiv$  émission spontanée, indiscernable d'un tachyon E < 0 envoyé par  $\mathcal{O}'$

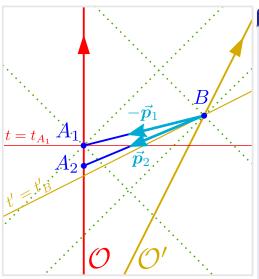


#### Résolution du paradoxe

Pour  $\mathcal O$  le tachyon qui arrive en  $A_2$  a une énergie négative et remonte le temps

- $\Rightarrow \mathcal{O}$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en  $A_2$
- $\equiv$  émission spontanée, indiscernable d'un tachyon E<0 envoyé par  $\mathcal{O}'$

De même, pour  $\mathcal{O}'$ , le tachyon qui arrive en B depuis  $A_1$  a une énergie négative et remonte le temps



#### Résolution du paradoxe

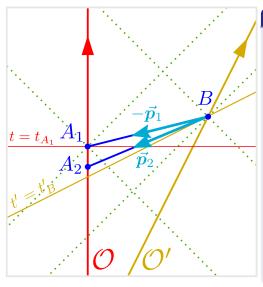
Pour  $\mathcal O$  le tachyon qui arrive en  $A_2$  a une énergie négative et remonte le temps

- $\Rightarrow \mathcal{O}$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en  $A_2$
- $\equiv$  émission spontanée, indiscernable d'un tachyon E < 0 envoyé par  $\mathcal{O}'$

De même, pour  $\mathcal{O}'$ , le tachyon qui arrive en B depuis  $A_1$  a une énergie négative et remonte le temps

 $\Rightarrow \mathcal{O}'$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en B

401491471717



#### Résolution du paradoxe

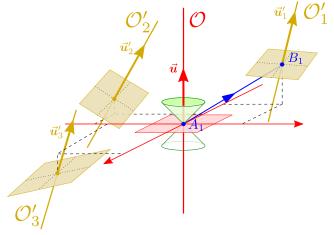
Pour  $\mathcal O$  le tachyon qui arrive en  $A_2$  a une énergie négative et remonte le temps

- $\Rightarrow \mathcal{O}$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en  $A_2$
- $\equiv$  émission spontanée, indiscernable d'un tachyon E < 0 envoyé par  $\mathcal{O}'$

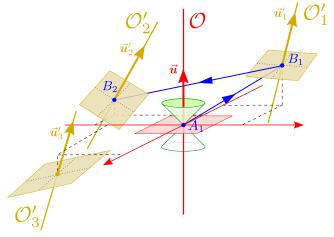
De même, pour  $\mathcal{O}'$ , le tachyon qui arrive en B depuis  $A_1$  a une énergie négative et remonte le temps

 $\Rightarrow \mathcal{O}'$  considère donc plutôt qu'il émet un tachyon en B

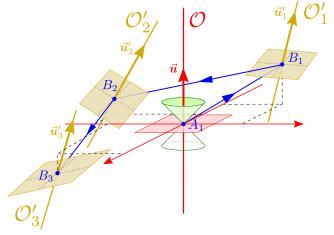
Chaque observateur ne fait qu'émettre des tachyons ⇒ pas d'échange d'information



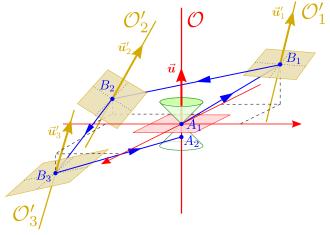
Dans cette version à quatre observateurs non coplanaires, chaque observateur ne fait que recevoir et émettre des tachyons d'énergie positive,



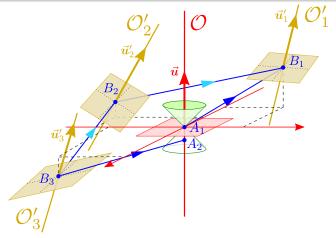
Dans cette version à quatre observateurs non coplanaires, chaque observateur ne fait que recevoir et émettre des tachyons d'énergie positive,



Dans cette version à quatre observateurs non coplanaires, chaque observateur ne fait que recevoir et émettre des tachyons d'énergie positive, de sorte que la solution invoquée pour l'anti-téléphone ne s'applique pas,



Dans cette version à quatre observateurs non coplanaires, chaque observateur ne fait que recevoir et émettre des tachyons d'énergie positive, de sorte que la solution invoquée pour l'anti-téléphone ne s'applique pas, et on a tout de même  $t_{A_2} < t_{A_1}$  [Pirani, Phys. Rev. D 1, 3224 (1970)]



Résolution [Parmentola & Yee, Phys. Rev. D 4, 1912 (1971)] : On remarque que les segments  $B_1B_2$  et  $B_2B_3$  sont vers le passé pour l'observateur  $\mathcal{O}$ . De son point de vue,  $\mathcal{O}_3'$  émet deux tachyons en  $B_3$ : l'un est reçu en  $A_2$  et l'autre va être absorbé par  $\mathcal{O}_1'$  en  $B_1$ , en même temps que le tachyon émis par  $\mathcal{O}$  en  $A_1 \Longrightarrow$  pas de lien causal entre  $A_1$  et  $A_2$ .

### Outline

- Introduction
- 2 Préliminaires
- 3 Définition des tachyons et principales propriétés
- Tachyons et chronologie
- 5 Anti-téléphone et variantes
- **6** Conclusions

### Conclusions

- L'existence de tachyons est compatible avec la relativité restreinte.
- Il n'y a pas de sens de parcours défini intrinsèquement sur la ligne d'univers d'un tachyon.
- Les tachyons peuvent ne pas être localisables vis-à-vis de certains observateurs.
- L'échange de tachyons peut conduire à des paradoxes causaux. Ces paradoxes peuvent être résolus via l'interprétation de Stueckelberg-Feynman en terme d'antiparticule. Les concepts d'émission et de réception d'un tachyon dépendent alors de l'observateur, ce qui rend problématique l'usage de tachyons pour des échanges d'information superluminiques.
- Nous n'avons discuté que des aspects classiques des tachyons: leur traitement quantique fait apparaître d'autres facettes. Notamment, la présence de tachyons dans une théorie quantique de champs est signe d'instabilité. Par exemple, la théorie des cordes bosoniques développée à la fin des années 1960 contient des tachyons et le recours à la supersymétrie a permis de les éliminer (Ramond 1971).

### **Bibliographie**

Les références sont cliquables et conduisent aux articles originaux

#### Articles de revue :

- E. Recami (1986): Classical tachyons and possible applications [Riv. Nuovo Cimen. 9, 1]
- E. Recami (1987): Tachyon kinematics and causality: A systematic thorough analysis of the tachyon causal paradoxes [Found. Phys. 17, 239]

#### Sources historiques:

- A. Einstein (1907): Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie [Ann. Physik 23, 371]
- R. C. Tolman (1917): *The Theory of Relativity of Motion*, Univ. California Press (Berkeley), p. 54 [www.archive.org]
- O. M. P. Bilaniuk, V. K. Deshpande, & E. C. G. Sudarshan (1962): "Meta" Relativity [Amer. J. Phys. 30, 718]
- G. Feinberg (1967): Possibility of Faster-Than-Light Particles [Phys. Rev. 159, 1089]
- F. A. E. Pirani (1970): Noncausal Behavior of Classical Tachyons [Phys. Rev. D 1, 3224]
- R. G. Cawley (1972): Neutrino mass bounds [Let. Nuovo Cimen. 3, 523]

