# Einstein et la refondation relativiste de la physique

Gilles Cohen-Tannoudji

gicotan@club-internet.fr

http://gicotan.club.fr

# Plan de l'exposé

- Le programme d'Einstein
- La « structure fine » de la relativité restreinte: avec ou sans éther?
- La relativité restreinte sans éther
- Le champ relativiste et l'événement quantique
- Refondation ou ascension aventureuse?

# Le programme d'Einstein

# Sources

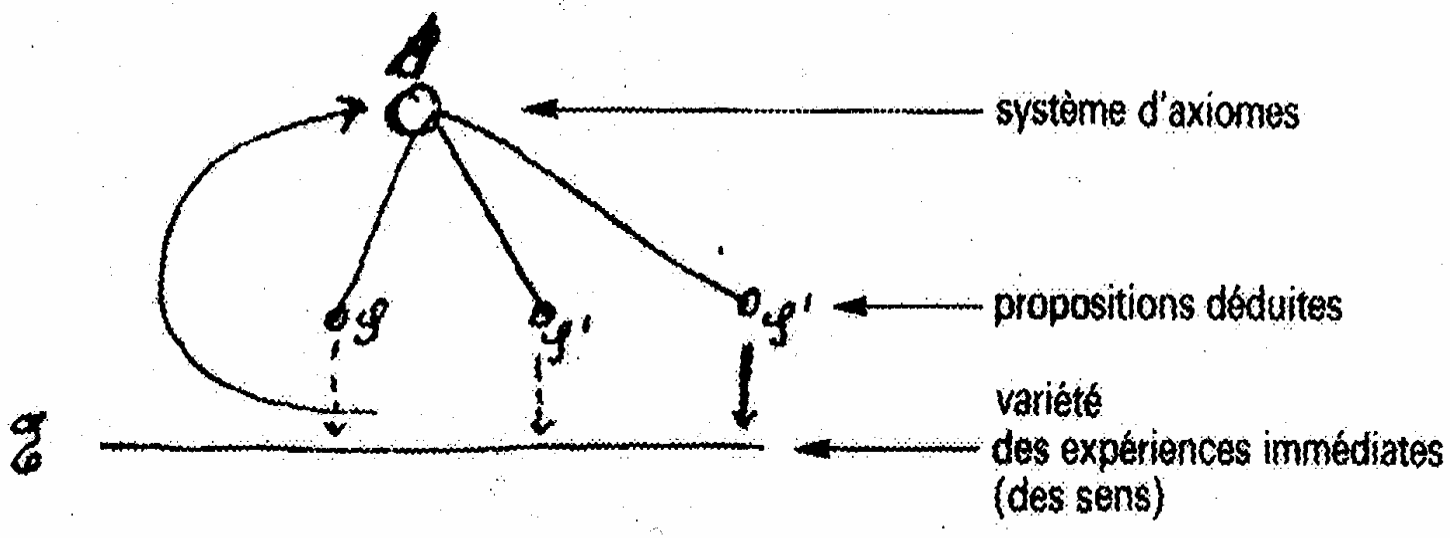
- *La physique et la réalité* Franklin Institute Journal, vol 221, n°3, mars 1936, in *Conceptions scientifiques*, pp. 20 – 76, Champs Flammarion, 1990
- *Les fondements de la physique théorique, Science n°91,* mai 1940, in *Conceptions scientifiques*, pp. 77 – 96, Champs Flammarion, 1990
- Einstein Infeld, *L'Évolution des Idées en Physique,* Champs Flammarion, 1983

- **Considérations générales concernant la méthode scientifique**

  – « Les expériences sensibles forment la **matière** qui nous est donnée; mais la **théorie** qui doit les interpréter **est faite par l'homme. (…) Ce que nous appelons physique comprend ce groupe de sciences de la nature qui basent leurs concepts sur des mesures, et dont les concepts et les propositions se prêtent à être formulés mathématiquement**. »

  Einstein, *Les fondements de la physique théorique,* in *Conceptions scientifiques, p. 77-78,* Champs Flammarion Paris 1990

  – « Toute la science n'est rien de plus qu'un raffinement de la pensée de tous les jours. »
    - Formation du concept d' **objet matériel** : complexe d'impressions sensibles auquel nous associons un concept, le concept d'objet corporel.
    - Attribution à l'objet corporel d'une **existence réelle**. La seule justification de ce pas est qu'il peut aider à la « **compréhensibilité du monde** »


système d'axiomes
propositions déduites
variété
des expériences immédiates
(des sens)

## – Stratification du système scientifique

- Les **concepts primaires** :« les concepts directement et intuitivement reliés à des complexes typiques d'expériences sensibles ». La science utilise la totalité des concepts primaires et les propositions qui les relient entre eux. Cette première phase s'apparente à la pensée de tous les jours. La science ne peut pas s'en contenter car elle manque totalement d'unité logique.
- Le **système secondaire** : système plus pauvre en concepts et en relations mais comportant une plus grande unité logique, payée par le fait que ses concepts ne sont plus directement liés aux expériences sensibles.
- **Cette stratification peut s'itérer jusqu'à ce que l'on parvienne « à un système de la plus grande unité concevable et à la plus grande pauvreté de concepts des fondements logiques qui soit encore compatible avec l'observation faite par nos sens. »**
- **« Le rapport n'est pas analogue à celui du bouillon à la viande de bœuf, mais à celui du numéro de vestiaire au pardessus ». (La physique et la réalité)**

- « La liberté de choix est cependant d'un genre spécial. Elle ne ressemble pas à la liberté d'un écrivain de romans, mais plutôt à celle d'un homme engagé dans la solution d'un problème de mots croisés bien posé. Il peut, à vrai dire proposer un mot quelconque comme solution, mais il y en *un seul* qui résout l'énigme sous toutes ses formes. »

- **La mécanique et les tentatives de fonder toute la physique sur elle.**
  - **Matière, espace et temps**
    - Temps subjectif (**ordre temporel**)
    - Changement **d'état** et changement de **position** ("*corrigés par des mouvements arbitraires de notre corps*" -Poincaré-)
    - **Objet matériel**: pas de changement d'état, seulement des changements de position; objet pratiquement rigide
    - Notion de position relative, notion de contact, prolongement quasi-rigide
    - **Ensemble des prolongements quasi-rigides=espace infini**
    - Corps de référence et géométrie

- Descartes et la **géométrie**: deux points *P' P''*; carré de la longueur du segment

$$(x'-x'')^2+(y'-y'')^2+(z'-z'')^2$$

Indépendant de la position des corps et de celles de tous les autres corps.

- **Géométrie euclidienne posée de façon axiomatique**
- *Erreur funeste* de l'oubli de la base empirique de la géométrie euclidienne

– **Temps objectif**
  - Horloges locales (analogues aux corps rigides)
  - Evénements dans tout l'espace (**avant la relativité, confusion entre ce qui est simultanément vu et ce qui arrive simultanément**)

– **Les fondements et les succès de la mécanique**
  - La réalité physique, indépendante des sujets qui l'expérimentent consiste d'une part en **l'espace et le temps**, et d'autre part en des **points matériels** existant de manière permanente.
  - Les **forces**, comme la force de gravitation de Newton, agissent instantanément à distance, et ne dépendent que de la distance qui sépare des particules invariables.
  - La **théorie cinétique de la matière** (Maxwell et Boltzmann), « qui est née des problèmes mécaniques, embrasse les phénomènes de la chaleur, et conduit à une image féconde de la structure de la matière. » (**Einstein Infeld, L'évolution des idées en physique**)

## – Les difficultés de la mécanique

- Une charge en mouvement induit sur une aiguille aimantée une force qui ne **dépend** pas que de la distance mais aussi **de la vitesse** et qui agit **perpendiculairement**
- En optique c'est la **conception ondulatoire** de la lumière qui s'impose, mais les propriétés mécaniques du milieu supposé porter les ondes, **l'éther**, ne sont pas comprises.
- Impossible de réduire à la mécanique les phénomènes optiques sans répondre à la question des propriétés mécaniques de l'éther
- Faut-il abandonner le point de vue mécanique? (Einstein Infeld)

- **Le champ, la relativité**
  - Le champ, « **l'invention la plus importante depuis le temps de Newton** »
    - « Ce ne sont pas les charges, ni les particules, mais le **champ** dans l'espace entre les charges et les particules qui est **essentiel pour la description des phénomènes physiques**. »
    - Les équations de Maxwell « décrivent la **structure** du champ électromagnétique et gouvernent les phénomènes électriques aussi bien que les phénomènes optiques. »
    - « **La théorie de la relativité naît des problèmes du champ**. Les contradictions et les inconséquences des anciennes théories nous obligent à attribuer des propriétés nouvelles au **continuum espace-temps**, qui est la scène de tous les **événements** de notre monde physique. »

- « La théorie de la **relativité restreinte** est basée sur deux **suppositions fondamentales**:
  - Les lois physiques sont les mêmes dans tous les systèmes de coordonnées en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres;
  - La vitesse de la lumière a toujours la même valeur.
- De ces **suppositions, pleinement confirmées par l'expérience**, sont déduites les propriétés des règles et des horloges en mouvement, où la longueur des premières et le rythme des dernières changent avec la vitesse.
- **La théorie de la relativité modifie les lois de la mécanique**. Les anciennes lois ne sont pas valables si la vitesse d'une particule s'approche de celle de la lumière. Les nouvelles lois, telles qu'elles ont été formulées par la théorie de la relativité, ont été confirmées avec éclat par l'expérience.
- Une autre conséquence de la théorie de la relativité (restreinte) est la **connexion entre la masse et l'énergie**. La masse est énergie et l'énergie a une masse. Les deux lois de conservation sont combinées en une seule, la loi de conservation de la masse-énergie. »

- « La théorie de la **relativité générale** donne encore une analyse plus approfondie du continuum espace-temps. La validité de la théorie n'est plus limitée aux systèmes de coordonnées d'inertie.
- Elle attaque le problème de la **gravitation** et formule de **nouvelles lois de structure pour le champ de gravitation**.
- Elle nous force à analyser le **rôle joué par la géométrie dans la description du monde physique**.
- Elle regarde **l'égalité de la masse pesante et de la masse inerte** comme **essentielle** et non comme purement accidentelle, ce que faisait la mécanique classique.
- Les conséquences expérimentales de la théorie de la relativité générale ne diffèrent que très peu de celle de la mécanique classique. Elles résistent bien à l'épreuve de l'expérience partout où la comparaison est possible.
- Mais la force de la théorie réside dans sa **cohésion interne** et la **simplicité de ses suppositions fondamentales**. »
- « La théorie de la relativité insiste sur l'importance du concept de champ en physique. Mais nous n'avons pas encore réussi à formuler une physique basée uniquement sur le champ. Pour le moment, nous sommes toujours obligés de supposer l'existence de **deux réalités**: le champ et la matière. »

- **Les quanta**
  - « **La matière a une structure granulaire**; elle est composée de particules élémentaires, les quanta élémentaires de la matière.
  - Ainsi, **la charge électrique a une structure granulaire** et – ce qui est extrêmement important du point de vue de la théorie des quanta – **il en est de même de l'énergie**. Les photons sont les quanta d'énergie dont la lumière est composée.
  - **La lumière est-elle une onde ou une pluie de photons? Un rayon d'électron est-il une pluie de particules élémentaires ou une onde?**
  - Ces questions fondamentales sont imposées à la physique par l'expérience. En cherchant à y donner une réponse, nous devons **renoncer à décrire les événements atomiques comme se passant dans l'espace et le temps**, nous devons nous éloigner encore davantage de l'ancienne conception atomique.
  - La physique quantique formule des **lois qui régissent des foules et non des individus.** Ce ne sont pas des propriétés mais des probabilités qui sont décrites: elle ne formule pas des lois qui dévoilent l'avenir des systèmes, mais des lois qui régissent les changements des probabilités dans le temps et se rapportent à de grands ensembles d'individus. »

# La « structure fine » de la relativité restreinte: avec ou sans éther?

# Sources

- Yves Pierseaux, *La « structure fine » de la relativité restreinte*, (Préface de G.C-T), L'Harmattan, 1999.
- Yves Pierseaux, *Special Relativity. Einstein's Spherical waves versus Poincaré's Ellipsoidal waves.* arxiv.org physics/0411045

# La relativité restreinte (RR) de Poincaré (qualifiée de « avec temps vrai », ou « avec variable cachée », ou « avec éther »)

- « Il n'y a aucune raison scientifique valable de ne pas considérer la théorie de Poincaré comme une théorie de la relativité à part entière: la RR avec variable cachée, le temps vrai, n'est pas un état inachevé de la RR sans variable cachée. »
  - « Poincaré obtient en effet, des 1905, **l'essentiel des résultats relativistes**. »
  - Poincaré déduit l'équation différentielle de la dynamique relativiste
  - **Il met en évidence la structure de groupe des transformations de Lorentz**
- La RR de Poincaré, qui est une synthèse entre la mécanique et l'électromagnétisme classiques, suppose un **caractère purement ondulatoire de la lumière.**
- L'approche de Poincaré est un modèle dynamique: la contraction de « **l'électron déformable** » est produite par la pression de l'éther.

- Chez Poincaré, **la contraction des longueurs et la dilatation des durées sont réelles**; elles ne sont pas perçues parce qu'elles concernent aussi les étalons de longueur (« tiges déformables ») et de durée. « **Un corps en mouvement de translation subit une déformation** dans le sens même où il se déplace; une sphère, par exemple, devient comme une espèce d'ellipsoïde aplati dont le petit axe serait parallèle à la translation. (…) pour observer un tel phénomène il faudrait des instruments de mesure d'une précision extrême, mais leur précision serait infinie qu'on n'en serait pas plus avancé, **car emportés eux aussi dans le mouvement, ils subiront la même déformation.** » (Poincaré, *La mécanique nouvelle*, conférence donnée au congrès de Lille de l'AFAS en 1909)
- Poincaré interprète l'augmentation de l'inertie avec la vitesse comme due à l'éther: « Dans cette conception, la masse constante de la matière a disparu. L'éther seul, et non plus la matière, est inerte. Seul l'éther oppose une résistance au mouvement, si bien que l'on pourrait dire: **il n'y a pas de matière, il n'y a que des trous dans l'éther**. » (La Mécanique nouvelle)

# Les principes fondamentaux des deux RR

- **RR avec éther (Poincaré)**
  - Principe de relativité
  - Principe de dualité du temps vrai et du temps local
  - Principe de contraction réelle des électrons déformables
- **RR sans éther (Einstein)**
  - Principe de relativité
  - Principe d'invariance de la vitesse d'un rayon de lumière dans tout référentiel
  - Principe d'identité des unités de mesure (tiges rigides et rythmes identiques)

# La relativité restreinte sans éther

# La relativité restreinte d'Einstein (qualifiée de « sans variable cachée » ou « sans éther »

- « La RR avec éther constitue essentiellement **une synthèse entre la mécanique et l'électromagnétisme classiques**, alors que la RR sans variable cachée **introduit systématiquement des éléments étrangers à ces deux théories classiques**. »
  - « Les éléments non justifiés dans la RR sans éther (accélération lente de l'électron ponctuel doté d'un quantum de charge, tiges rigides, rythmes identiques d'horloges 'atomiques' identiques, complexes de lumière, etc.) ne deviennent vraiment compréhensibles qu'en considérant en amont de **l'heuristique** einsteinienne la **thermodynamique** et en aval **la théorie quantique** (spectre identique de fréquences d'émission d'un atome de type déterminé dans tout système inertiel). »
  - Dans la deuxième partie de son article sur la RR Einstein considère « une surface qui enveloppe d'une façon durable le même **complexe de lumière**. » Il définit l'énergie du complexe de lumière à l'aide d'une moyenne temporelle et obtient **la même transformation pour l'énergie et la fréquence.**
  - « En bref: après avoir développé une approche (heuristique) des **quanta de lumière** (mars 1905), Einstein développe une théorie (relativiste) des **complexes de lumière (juin 1905)**

– Cheminement historique de la RR sans éther

- Cinématique relativiste et principe d'équivalence masse-énergie (juin et septembre 1905)
- Dynamique et thermodynamique relativistes de Planck (1906 et 1907)
- Synthèse de la RR sans éther (cinématique, dynamique, thermodynamique) par Einstein (1907)
- Représentation quadrivectorielle de Minkowski (1908)

## – Intervalles, genres, temps propre

- La transformation de Lorentz

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- appliquée à deux **événements** (points d'espace-temps) 1 et 2, elle laisse invariant **l'intervalle d'espace-temps**

$$s_{12}^2 = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2, t_2 - t_1 = t_{12}, (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = l_{12}^2$$

$$c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2 = c^2 t'^2_{12} - l'^2_{12}$$

- Chez Einstein, la contraction des longueurs et la dilatation des durées **ne sont pas réelles**: elles sont le résultat d'un **effet de perspective**

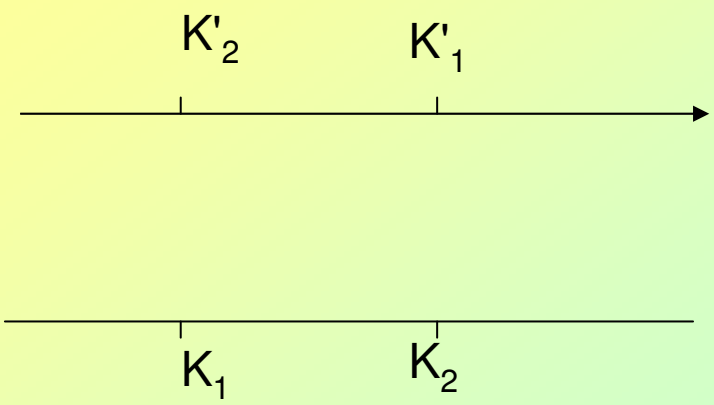
- **Le temps propre** concept introduit par Minkowski en 1908.

Supposons que nous observions, dans un système d'inertie une telle horloge en mouvement, que nous pouvons considérer comme uniforme sur un intervalle infinitésimal de temps. Pendant *dt*, l'horloge parcourt $(dx^2+dy^2+dz^2)^{1/2}$. **Le temps *dt'* indiqué par cette horloge, au repos dans son référentiel (*dx'=dy'=dz'*=0), sera égal, en vertu de l'invariance de l'intervalle à :**

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2dt'^2 ,$$

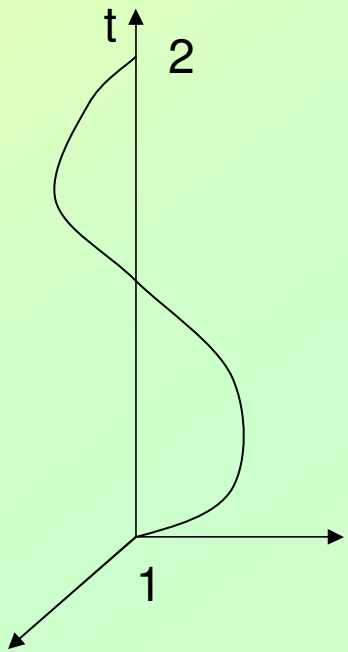
$$dt' = dt\sqrt{1-\frac{dx^2+dy^2+dz^2}{c^2dt^2}} = \frac{ds}{c} = dt\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

**Une horloge mobile marche plus lentement qu'une horloge au repos.**




Pour pouvoir comparer la marche d'horloges dans des référentiels différents il faut avoir plusieurs horloges dans un référentiel de comparaison. $K'_1$ qui marquait la même heure que $K_1$ quand elle l'a croisée, retarde sur $K_2$ quand elle la croise.

**Une** horloge d'un système comparée **aux** horloges de l'autre système **retarde toujours**




Si on considère deux horloges et que l'une revienne vers l'autre (immobile) après avoir parcouru une trajectoire fermée, c'est l'horloge mobile qui toujours retardera sur l'horloge immobile

**Propriété des géodésiques en métrique pseudo-euclidienne:**

Entre 1 et 2, le temps propre de l'horloge immobile (géodésique d'espace-temps) est plus long que celui de l'horloge mobile

- **Champs et particules en Relativité**
  - L'absence d'interaction instantanée à distance amène à délaisser le concept de force (action d'un point matériel sur un autre) au profit du concept de **champ**: une particule crée un champ et toute particule se trouvant dans ce champ sera soumise à une certaine force
  - C'est seulement au bout d'un certain temps que le changement de la position de l'une des particules produit un effet sur les autres. **Une interaction ne peut avoir lieu à tout instant qu'entre deux points voisins de l'espace (théorie locale des champs).**
  - **En mécanique classique, on peut utiliser des corps rigides absolus. De tels corps ne peuvent pas exister en Relativité**: ils pourraient transmettre instantanément des actions à distance. **Seules interviennent en Relativité des particules élémentaires, (sans structure et sans extension spatiale). La relativité conserve le concept essentiel, en mécanique classique, de point matériel**
- **La mécanique relativiste du point matériel**
  - Soient x et v la position et la vitesse d'un point matériel. L'intervalle d'espace-temps sur la trajectoire de ce point matériel est noté

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta \mathbf{x}^2 = c^2 \Delta \tau^2$$

  - $\tau$ est le temps propre le long de la trajectoire

$$d\tau = \left(1 - \frac{\mathbf{v}^2}{c^2}\right)^{1/2} dt = \gamma^{-1} dt$$

– Notations **quadri-vectorielles**

$$x^\mu \equiv (ct, \mathbf{x}) \quad \mu = 0,1,2,3$$

$$\Delta s^2 = g_{\mu\nu}\Delta x^\mu \Delta x^\nu = \Delta x_\mu \Delta x^\mu$$

où le tenseur métrique est défini par

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad g_\mu{}^\nu = \delta_\mu{}^\nu$$

qui fait monter et descendre les indices

– Invariances de Poincaré et de Lorentz

$$x^\mu \to x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu + a^\mu \quad \Lambda^T g \Lambda = g$$

$\Lambda$ est une transformation de Lorentz qui peut s'écrire comme le produit d'une **rotation ordinaire** par un "**boost**" le long d'une direction **n**

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{n}\left[(\cosh\alpha - 1)\mathbf{x}.\mathbf{n} - ct\sinh\alpha\right]$$

$$ct' = ct\cosh\alpha - \mathbf{n}\mathbf{x}\sinh\alpha$$

où **v**=*c* tanhα **n** est la vitesse du repère en mouvement

La **quadrivitesse**

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = \left(c\frac{dt}{d\tau}, \frac{d\mathbf{x}}{d\tau}\right) = \frac{dt}{d\tau}(c, \mathbf{v})$$

est un quadrivecteur du genre temps de longueur constante égale à *c*. sa dérivée par rapport au temps propre

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} = \frac{du^\mu}{d\tau}$$

lui est orthogonale est est donc du genre espace.

– Le **quadrimoment**

Pour une particule libre de masse *m*, le quadrimoment s'écrit

$$p^\mu = mu^\mu = \left(\frac{E}{c}, \mathbf{p}\right) = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{\mathbf{v}^2}{c^2}}}(c, \mathbf{v})$$

$$p^2 = m^2c^2 = \frac{E^2}{c^2} - \mathbf{p}^2 \qquad \mathbf{p} = \frac{E\mathbf{v}}{c^2}$$

$$\mathbf{p} = 0 \Rightarrow E_0 = mc^2$$

$$m = 0 \Rightarrow E = |\mathbf{p}|c$$

$$\frac{v}{c} \to 0 \Rightarrow E \approx mc^2 + \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$$

$$m = 0 \leftrightarrow v = c \leftrightarrow d\tau = 0$$

# Le champ relativiste et l'événement quantique

# Le champ relativiste

- **La relativité et le concept de champ**
  - Remplacement de **l'éther** par le **champ**
  - La **relativité** et le problème de **l'espace** **(appendice n° 5 ajouté en 1952 à la quinzième édition du livre de vulgarisation d'Einstein *Relativité*)**
    - En mécanique newtonienne, « quand on enlève la matière pondérable (les points matériels) il reste l'espace et le temps. »
    - En relativité restreinte, « quand on enlève le champ, il reste l'espace-temps de Minkowski. »
    - En relativité générale, « quand on enlève le champ, il ne reste rien! »: « **il n'y a pas d'espace vide de champ**. »
  - **Est-il possible de fonder toute la physique sur le concept de champ?**
    - **Peut-on se passer du concept de point matériel?**
    - **La pluralité des champs est-elle admissible?**

- **Le dualisme champ/point matériel**:

  "Pourtant, ce qui me paraît certain, c'est que **dans une théorie cohérente, ne doit apparaître, à côté du concept de champ, le concept de particule**. La théorie tout entière doit être basée uniquement sur des équations aux dérivées partielles et leurs solutions sans singularité."

- **Le dualisme de la gravitation et de l'électromagnétisme**:

  "Mais on ne saurait prétendre que les parties de la relativité générale qui peuvent aujourd'hui être considérées comme achevées aient doté la physique de fondements complets et satisfaisants. En premier lieu, le champ total y paraît être composé de **deux parties sans lien logique: la gravitation et l'électromagnétisme**."

# L'événement quantique

- **Possibilité d'aspects granulaires en théorie des champs**
  - Différences entre le comportement de la lumière et celui des corps « pondérables »
  - Succès incontestable de la théorie ondulatoire de la lumière, **mais**:

« **On doit cependant garder à l'esprit que les observations optiques se réfèrent à des moyennes temporelles plutôt qu'à des valeurs instantanées**. »

« **Il est concevable que la théorie de la lumière qui opère avec des fonctions spatiales continues puisse conduire à des contradictions avec l'expérience quand elle est appliquée à des phénomènes d'émission ou de transformation de la lumière**. »

A. Einstein: « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière » Berne 17/03/1905 Annalen der Physik **17** 132, 1905

- **Le concept d'événement élémentaire**
  - **Un fil conducteur dans l'ensemble des travaux d'Einstein**

    - Fondements de la physique statistique: **fréquence statistique, probabilité de présence dans le temps dans un certain volume de l'espace**. Conception utilisée dans l'article sur les quanta de lumière.
    - **Événement élémentaire**: événement supposé concentré en un point et de durée infiniment petite: **point d'espace-temps**.
    - « Il nous faut garder à l'esprit que tous les jugements dans lesquels le temps joue un rôle sont toujours des jugements sur des **événements simultanés.** Lorsque, par exemple, je dis 'tel train arrive ici à 7 heures', cela signifie à peu près: 'le passage de la petite aiguille de ma montre sur le 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés.(Article de juin 1905)
    - **Événements indépendants et promenade aléatoire**: théorie du mouvement brownien. « Les positions qu'occupe une particule au cours du mouvement brownien à deux instants espacés d'une seconde doivent toujours apparaître, même à l'observateur le plus consciencieux, comme indépendantes l'une de l'autre, et le plus grand mathématiciens ne réussirait jamais dans un cas déterminé à calculer d'avance, même approximativement, le chemin parcouru pendant une seconde par une telle particule. » (Einstein, *Sur le principe de Boltzmann et quelques conséquences qui en découlent immédiatement*, inédit de 1910, traduit par Bertrand Duplantier in *Einstein 1905-2005,* séminaire Poincaré 09/04/2005, p. 213)

– **La théorie quantique du rayonnement** (article de 1916 sur « l'émission stimulée »)

- Véritable **synthèse des articles de 1905** sur les quanta, le mouvement brownien et la relativité.
- « Imaginons une molécule qui, lors d'une transition d'un état autorisé par la théorie quantique à un autre, reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement ou cède de l'énergie $\varepsilon$ sous forme de rayonnement. Dans l'espace, un processus élémentaire de ce type peut être pensé soit comme partiellement, voire totalement, orienté, soit comme symétrique (non orienté). *Il s'avère que l'on n'aboutit à une théorie libre de contradiction que si l'on conçoit ces processus élémentaires comme totalement orientés.* »
- « la molécule subit dans le processus d'émission de rayonnement un recul de grandeur $h\nu/c$ dont la direction est, dans l'état actuel de la théorie, déterminée seulement par le hasard. (…) malgré tout j'ai pleinement confiance dans la sûreté de la démarche ici suivie. »

- **L'épisode de « l'argument du trou »**
  - En 1913, Einstein a failli renoncer à la théorie de la relativité générale à cause de **« l'argument du trou »:**
    - Il considère un espace-temps empli de matière (ou de champs) à l'exception d'une région, « le trou ».
    - « **Transformation de trou** »; modifiant la métrique et les champs de matière à l'intérieur du trou et les laissant invariants à l'extérieur
    - Deux distributions de métrique et de champs de matière reliées par une transformation de trou sont **indiscernables**
      - Par l'observation
      - Par la théorie
    - Elles ne doivent pas correspondre à des réalités physique distinctes.
  - L'issue trouvée par Einstein: le contenu physique d'une théorie est épuisé par le catalogue de tous les événements de coïncidence qu'elle autorise. Seuls des **événements** localisés (ou quasi localisés) dans l'espace-temps comme l'intersection de deux lignes d'univers peuvent être définis de **manière invariante**.
- **La théorie quantique des champs: la réponse aux objections d'Einstein**
  - La réponse que **la théorie quantique des champs** oppose à l'objection du dualisme du champ et du point matériel **est finalement la même que celle qu'Einstein oppose à l'argument du trou**: en théorie quantique des champs, **il n'y a pas de points matériels**, il n'y a que des **champs** qui manifestent leur existence lors **d'événements quantiques** d'émission ou d'absorption de quanta d'énergie qui relèvent d'une **prédictibilité probabiliste** et obéissent à des **statistiques quantiques (Bose-Einstein ou Fermi-Dirac)**.

- **Équations de Dirac et de Klein-Gordon**
  - Généralisations relativistes de l'équation de Schrödinger
  - Problème des solutions de **fréquence (ou d'énergie) négative**
  - Explication du **spin**
  - Prédiction des **antiparticules**
- **Théorie quantique des champs, physique des hautes énergies et statistique quantique**
  - La symétrie « **PCT** »
  - La **connexion spin statistique**
  - Champs libres, **espace de Fock** et **statistiques quantiques**
  - Champs en interaction
    - **Matrice S**
    - **Intégrale de chemins et développement perturbatif**
  - **Le modèle standard**
    - **Théories de jauge**
    - **Renormalisation**
    - **Brisures spontanées de symétrie**
    - **Théorie de jauge sur réseaux et phénomènes critiques**

# Refondation ou ascension aventureuse?

« En nous servant d'une comparaison nous pouvons dire que la création d'une nouvelle théorie ne ressemble pas à la **démolition d'une grange et à la construction, à sa place, d'un gratte-ciel**. Elle ressemble plutôt à l'ascension d'une montagne, où l'on atteint des points de vue toujours nouveaux et toujours plus étendus, où l'on découvre des connexions inattendues entre le point de départ et les nombreux lieux qui l'environnent. Mais le point de départ existe toujours et peut être vu, bien qu'il paraisse plus petit et forme une partie insignifiante dans notre vaste vue, que nous avons gagnée en vainquant les obstacles dans **notre ascension aventureuse.** »

Einstein, Infeld, *L'évolution des idées en physique,* (Princeton 1936) Champs Flammarion, 1983, p. 143

## – Théorie quantique des champs et interactions fondamentales

- Dans la TQC appliquée aux interactions fondamentales, les champs quantiques associés aux **forces** et ceux associés à la **matière** sont mis sur le même plan (pas de dualisme champ/point matériel)
- Dualisme de la gravitation et de l'électromagnétisme
  - Possibilité de **négliger la gravitation aux énergies accessibles expérimentalement**.
  - Possibilité de **négliger les effets quantiques en cosmologie à grande échelle**.
  - Aucune objection à la **pluralité** des champs quantiques; **l'unification** des interactions fondamentales, gravitation comprise, n'intervenant qu'à des énergies très élevées (de l'ordre de l'énergie de Planck, $10^{19}$ GeV)

- **Le camp de base: le modèle standard**
  - **Théorie quantique des champs** (mariage des quanta et de la relativité restreinte) et **modèle standard** de la physique des particules et des interactions non gravitationnelles.
  - Théorie de la **relativité générale**, sous-tendant la cosmologie contemporaine et le **modèle standard du big bang**
- **La prochaine étape: vers une cosmogonie scientifique**
  - **Mécanisme de Higgs**
    - Il existe un **état de l'Univers primordial où tous les champs sont de masse nulle, et où donc on ne peut, nulle part, définir un temps propre**
    - La brisure de la symétrie électrofaible est une **transition** rendant massifs certains quanta: **émergence de la masse et … du temps !**
    - La théorie de cette transition prédit l'existence d'une particule nouvelle, le **boson de Higgs** dont la recherche est le premier objectif assigné au **LHC**, le collisionneur qui doit entrer en fonctionnement au **CERN** en 2007
  - **Cosmologie quantique: actualité du rêve d'Einstein d'une théorie unitaire**