

Marc Lachièze-Rey

Les avatars du vide

les Atomistes grecs en firent le fondement du monde,
Aristote le rejeta explicitement

Des qualificatifs divers:

espace (repérage , mouvements , cinématique) ;

vide ou *substance* lorsqu'il s'agit d'hydraulique ;

éther lorsqu'il s'agit d'interactions ou de propagation...

quintessence

vide total -/- vide substantiel.

Vide conceptualisé -/- vide privatif

Le vide dans les théories physiques

faculté d'exacerber les difficultés conceptuelles de telle ou telle théorie.
les efforts entrepris pour la clarifier → **moteur de progrès** efficace.

néant privatif, à peine une concrétisation du rien
ou **substance quasi matérielle** munie d'attributs
(«**éther**, quintessence»...)

dès que l'on supprime un aspect du vide, il revient sous une autre forme.
La physique penche tantôt du côté de la **géométrie** (l'espace), tantôt du côté
de la **substance** (l'éther).

«**joker**»: pour répondre à une question autrement insoluble... Mais
impossible de préciser son statut exact, d'en établir une théorie satisfaisante.

vide privatif ?

définition «privative» ? ce qui reste quand on a tout enlevé.

En pratique ?

des pompes de plus en plus perfectionnées permettent d'expulser une grande partie de l'air d'une enceinte, jusqu'à des pressions très faibles
→ atmosphère raréfiée. Mais évaporation, rayonnement électromagnétique émis par les parois (sauf zéro absolu)

→ Le véritable vide ne peut exister réellement :

concept idéal et inaccessible.

monde réel = superposition, à ce vide, de ...

le vide est présent tout au fond des choses.

vide privatif ?

ce qui reste quand on a tout enlevé.

Mais que signifie ce « **tout** » ?

(René Descartes : *on qualifie de vide une cruche qui contient de l'air, parce qu'elle est faite pour contenir de l'eau. Elle est donc vide... sans être vide.*)

→ définir ce que l'on enlève: diffère d'une théorie à l'autre.

enlever tout ce que je suis capable d'enlever; non pas *en pratique*, mais *en principe* :

en n'étant limité que par les principes fondamentaux de la théorie. Cela dépend de la théorie →

Chaque théorie possède sa conception du vide.

un objet physique ?

Dans la plupart des cas, il subsiste encore « **quelque chose** » qui, par nature, résiste à toute tentative de suppression et possède encore certaines propriétés.

→ Le vide apparaît souvent comme un objet physique nécessaire.

jamais identifié au « rien » ou au néant.

(Blaise Pascal, 1647 : « *il y a autant de différences entre le néant et l'espace vide que de l'espace vide au corps matériel; et qu'ainsi l'espace vide tient le milieu entre la matière et le néant* »).

il subsiste au moins **l'espace vide** comme contenant, référence, repérage, médiatisation:

là où sont situés et localisés les objets,
repérés leurs mouvements,
médiatisées les relations.

éther (alors qualifié de *luminifère*) comme milieu dont l'ébranlement constitue la lumière ou le rayonnement électromagnétique ;

éther encore (gravitationnel) comme support pour la transmission de la gravitation...

aspects *relativistes*

C'est à propos des notions de vide, en liaison avec le repérage des mouvements (*de l'éther*), que fut introduite la *relativité restreinte*.

Quant à la *relativité générale*, ce fut en grande partie pour résoudre le problème posé par *l'éther gravitationnel* d'Isaac Newton qu'elle fut conçue par Albert Einstein.

physique quantique : la distinction entre vide et substance devient très difficile ;

paradoxes du vide

cosmologie

Atomistes grecs

Atomistes grecs (Leucippe, Démocrite, Épicure, Lucrèce) :

« il n'y a que des atomes et du vide ».

fondement de la conception du monde :

condition du mouvement et même de l'existence des corps: comment un corps pourrait-il se déplacer ailleurs si cet «ailleurs» n'était pas vide?

«Si ce que nous appelons vide [...] n'existait pas, les corps ne sauraient où se tenir, ni où se mouvoir, alors qu'ils le font de manière évidente », (Épicure ,IVe siècle av. J.-C.)

«Le vide n'existe pas moins que les corps.»

illimité ;

les atomes (qui ne contiennent rien d'autre, pas même du vide) se déplacent en son sein.

Le vide Ici se confond avec ce que nous appelons aujourd'hui l'espace : réceptacle, la potentialité consiste à recevoir les corps.

Aristote

Aristote nie le vide.

Répondant aux Atomistes selon lesquels certains corps sont moins denses que d'autres simplement parce qu'ils contiennent (en proportion) davantage de vide, il soutient au contraire que les diverses densités des corps sont dues à leurs essences différentes.

Sans vide, la vision aristotélicienne est incapable de répondre de manière satisfaisante aux questions de repérage, (positions ou mouvements) →
controverse pendant deux millénaires.

Mais (Aristote) : mouvements dus à la propension des corps matériels à rejoindre leurs « lieux naturels ».

lieux naturels ?

Exclus de la composante *matérielle* du monde?

rôles de référence, de réceptacle, que l'on prête d'ordinaire au vide,
(préfigure le *champ* : une particule chargée se déplace guidée par le champ
électromagnétique

« lieu naturel » consubstantiel au *vide* ; distingué des autres lieux

→ certaines propriétés structurelles

Aristote

Par ailleurs, Aristote mentionne explicitement une « certaine essence corporelle, différente des substances qui sont autour de nous, supérieure à toutes ces substances et plus divine qu'elles : *l'éther* (Aristote [*Traité du ciel*],

« ce qui court perpétuellement»

ni lourd ni léger, non engendré et inaltérable, non miscible aux autres éléments, ...
vide ?

les tentatives de nier le vide sous l'argument qu'il serait une notion superflue conduisent à introduire d'autres notions au rôle analogue. , indispensable ... pour tenter de résoudre ses problèmes fondamentaux.

Platon utilisait le terme « éther» (du verbe *aithein* , « brûler») pour qualifier le ciel, la «partie pure du monde où sont les astres», proche de la région du feu.

cinquième élément ou « cinquième essence», plus tard nommée « quintessence». statut intermédiaire entre matière et néant.

Renaissance... du vide

De l'Antiquité au Moyen Âge, l'Occident nie l'existence du vide à la suite d'Aristote.

En même temps, quintessence ou éther demeurent omniprésents (substance céleste, diaphane, cristalline ...entre le matériel et le spirituel).

Nouvelle physique :

retour vers l'atomisme, fondé sur l'existence du vide ?

- le philosophe **Francesco Patrizi** (*De spacio physico et mathematico*, 1587) est l'un des premiers à soutenir explicitement, contre Aristote, l'existence du vide et de l'espace infini.
- Son contemporain **Giordano Bruno**, pour avoir soutenu les mêmes idées dans un retour à l'atomisme, sera jugé comme hérétique et brûlé en 1600.

Vide et Hydraulique

la question quitte le terrain purement conceptuel :
hydrauliciens de l'Antiquité (Philon, IIIe siècle av. J.-C. ; Héron d'Alexandrie (probablement Ier siècle ap. J.-C.) s'y étaient fortement intéressés

Au XVIIe siècle, **énigme** : malgré la technique, impossible de pomper l'eau au-delà d'une hauteur de 9 m !

Galilée l'attribue à une *force causée par le vide*.

Galilée l'évoque explicitement : *dans le vide*, les corps tombent tous avec la même accélération (en langage moderne).

Galilée conçoit le vide comme un « *milieu* » dépourvu de toute résistance.

Avec exactitude, pour nier le vide, Galilée contredit l'un des arguments d'Aristote selon lequel, en l'absence de toute résistance, un corps acquerrait une vitesse infinie.

En 1644, le mathématicien **Evangelista Torricelli**, disciple de Galilée, fait réaliser à Florence une «**expérience barométrique**» demeurée célèbre (en utilisant du mercure): met en évidence un espace vide dans la partie supérieure de son éprouvette retournée: **le vide existe bel et bien, même en pratique.**

Il devient impossible de soutenir que la Nature «a horreur du vide».

Pascal met en évidence la «**force de succion du vide**» → débat à propos de la nature de ce «**vide apparent**».

Les opposants à l'idée d'un «vide réel» :

«**air subtil**» ou «**épuré**», (qui aurait traversé les parois des tubes).

Descartes : «**matière subtile**» (le vide n'existe pas). Mais il voit le monde empli d'un **éther infini agité de tourbillons** (quasi matériel)

le Français **Pierre Gassendi** brandit le drapeau du vide, en critiquant la « matière subtile» de Descartes.

querelle en fait essentiellement terminologique.

querelle terminologique.

milieu / matière ; géométrie / substance

Les uns le distinguent des substances matérielles ; les autres l'en rapprochent (certains attributs de la substance).

les effets sont de mieux en mieux compris et exploités.

L'ingénieur allemand **Otto von Guericke** fabrique une « **pompe à vide** ».

À Magdebourg (1654) la force d'un attelage de vingt-quatre chevaux se révèle nécessaire pour séparer deux hémisphères entre lesquels on a fait le vide : pression de l'air contre le vide

le Hollandais **Christiaan Huygens** (alors à Paris), le Français **Denis Papin** et l'Irlandais **Robert Boyle** → premières machines à vapeur.

Newton évoque explicitement en 1717 le «**vide de M. Boyle**»

L'éther luminifère, support des ondes lumineuses

Le vide luminifère

Pour **Huygens**, la lumière est une onde qui se propage (cf ondes sonores, vagues) : ébranlement de quel milieu ? « éther » ou « vide luminifère »
objecteurs:

la lumière ne serait pas une onde (Newton : faisceau de corpuscules).

Cependant (1801) l'Anglais **Thomas Young** : interférences lumineuses → onde

(confirmé par le Français **Augustin Fresnel** quelques années plus tard :

« fort tenté de croire aux vibrations d'un *fluide particulier* pour la transmission de la lumière et de la chaleur » :

l'éther luminifère, un milieu élastique qui remplirait tout l'espace (Mais il ne l'assimile pas au vide, qu'il considère comme dépourvu d'attributs.)

Le vide électromagnétique

Young et Fresnel : la lumière est bien une vibration ;
se propage à une vitesse finie $c = 300\,000$ km/s.

L'éther = une sorte de gelée immobile qui transmettrait la vibration lumineuse.

problème : cette vibration doit rester parfaitement indifférente aux mouvements des corps et notamment des corps célestes, ! ...

Vers le milieu du XIXe siècle, le physicien écossais James Clerk Maxwell : l'électricité et le magnétisme représentent deux aspects de l'électromagnétisme; ondes électromagnétiques, de vitesse = c .

→ lumière = cas particulier d'onde électro- magnétique.

l'éther luminifère → l'éther électromagnétique

Maxwell introduit le concept de « champ électromagnétique»:

véritable substance, se propage dans l'espace vide.

ondes électromagnétiques = vibrations du champ (matière plutôt que vide)
en l'absence de charges électriques génératrices, le champ disparaît.

Le vide se définit alors comme absence de charges et absence de champs.

cinématique du champ électromagnétique de Maxwell ? vitesse constante ?

→ bouleversement total , relativité restreinte (Albert Einstein 1905)

Newton et l'éther gravitationnel

Newton croit la lumière de nature corpusculaire

→ pas besoin de l'éther luminifère de Huygens

Pourtant, il invoque un «**esprit subtil qui pénètre promptement tous les corps**» ; infiniment élastique ; composé de très petites particules non jointives.

Newton : **éther gravitationnel** pour transmettre la gravité.

Muni d' une sorte d'élasticité permettant la transmission.

pas de caractère matériel ;

on ne peut le localiser ;

« pénètre tous les corps solides » « caché dans leur substance ».

entre rien et quelque chose.

ce qui « reste dans un vase quand on en a pompé l'air »,

Newton assimile clairement son éther au vide.

conception cohérente et satisfaisante ? → philosophe Emmanuel Kant , physicien Ernst Mach → Einstein : relativité générale

Vides relativistes

Vers le milieu du XIXe siècle, éther électromagnétique, éther gravitationnel, espace absolu de Newton, vide des hydrauliciens... représentent différents avatars d'un même milieu dont les physiciens sont obligés de reconnaître l'existence, mais sans réussir à en concevoir un modèle satisfaisant.

la **relativité générale** (théorie de l'éther gravitationnel); **cosmologie relativiste**
physique quantique : abolit la distinction entre vide et matière : statuts équivalents.

Questions (**Références, repérage**):

Par rapport à quoi repérer les objets, les **Mouvements** ? dans l'espace vide: vide comme référence.

Par rapport à quoi un objet se déplace-t-il, s'il n'est environné d'aucun autre objet? Par rapport à quoi repérer son mouvement?

espace vide = éther électromagnétique

statut cinématique ? → **relativité restreinte** : Einstein : disparition de l'éther électromagnétique

mouvement uniforme

Qui est au repos ? je suis entraîné par la Terre autour du Soleil.

Ce dernier se déplace au sein de notre galaxie

elle-même attirée par ses voisines...

→ Personne, ou bien... tout le monde. la distinction ne possède aucune pertinence : notions relatives.

principe de relativité («le mouvement est comme rien») pour la matière (particules). ondes électromagnétiques ? → grave crise.

L'inexistence du vent d'éther

Galilée et Newton : cinématique des corps matériels (libres) : mouvements uniformes.
vide ; relations entre espace et temps ; localisation, repérage des mouvements.

principe de relativité : les propriétés d'un processus physique ne dépendent pas de son état de mouvement uniforme

loi de composition des vitesses : addition

principe d'inertie (galiléen)

contredit par la lumière?

expérience cruciale (1887, les Américains Albert Abraham **Michelson** et Edward Williams **Morley**) :

impossible de mettre en évidence un «vent d'éther» →

la lumière n'obéit pas au principe de relativité galiléen ;

il est impossible d'attribuer à l'éther un état de mouvement, quel qu'il soit.

le Néerlandais **Hendrik Antoon Lorentz** et le Français **Henri Poincaré** :

nouvelles formulations, sans interprétation cohérente.

Einstein (1905) : remise en question de l'espace et du temps, et donc du vide

relativité restreinte

éther = « une hypothèse superflue ».

La relativité restreinte

principe de relativité : « galiléen » → « einsteinien ».

composition des vitesses modifiée:

addition → « transformation de Lorentz ».

→ nouvelle cinématique « einsteinienne »

s'applique à la matière (addition : approximation) et aux rayonnements (constance)

Poincaré (théorie des groupes : groupe de Lorentz)

Poincaré, Hermann Minkowski : transformations de Lorentz = rotations de l'espace-temps.

«Dorénavant, l'espace, considéré séparément, et le temps, considéré séparément, sont destinés à disparaître comme des ombres, et seule une sorte d'union des deux gardera une réalité indépendante.» (Minkowski.)

espace et temps → espace-temps.

→ transformation de Lorentz, constance de la vitesse de la lumière, l'absence de vent d'éther (il n'y a plus d'éther!)

La cinématique du vide : état de mouvement du vide ?

en mouvement... par rapport à lui-même ? en même temps dans tous les états de mouvement possibles !

→ pas d'état de mouvement défini.

vide concret, mais la notion de mouvement ne s'applique pas à lui : le vide ne peut constituer de référence pour les mouvements

(on ne peut évoquer le mouvement d'un corps matériel par rapport à lui; on ne peut non plus, réciproquement, évoquer le mouvement du vide par rapport à quoi que ce soit.)

vide « cinématiquement invariant » = « invariant de Lorentz » :

vide en mouvement = vide au repos. (Cela n'est vrai ni de la matière, ni du rayonnement)

propriété fondamentale : peut servir de définition: le vide = l'état qui reste invariant :

(je vois toujours le *même vide*, que je sois au repos ou en mouvement)

(une particule n'est pas invariante de Lorentz) → le vide ne contient aucune particule.

Note : le vide n'est pas invariant sous d'autres transformations (mouvement accéléré et non plus uniforme → « effet Unruh».)

pour condenser : le passage de la physique newtonienne à la relativité restreinte = **invariance de Lorentz du vide**: tout le reste en découle (notamment espace et temps (non invariants de Lorentz) → espace-temps.

L'invariance de Lorentz constitue la symétrie fondamentale de l'espace-temps.

[en physique quantique, vide quantique = unique état invariant de Lorentz.]

relativité générale : courbure = éther gravitationnel_

relativité générale : gravitation = la *forme* de l'espace-temps (« courbure».)

champ gravitationnel = courbure de l'espace-temps.

plus de transmission à distance dans un espace vide ! mais déformation continue du milieu que constitue l'espace-temps.

l'interaction gravitationnelle = propagation de la courbure.

(variation dans l'espace-temps =

«propagation»:) → ondes gravitationnelles

Le vide de la relativité générale

la courbure est imprimée par des sources matérielles ou, en tout cas, énergétiques →
On ne peut donc assimiler la courbure de l'espace-temps au vide, puisqu'elle coexiste avec la source matérielle qui l'engendre.

Comment définir alors le vide en relativité générale?

espace-temps (sa courbure) dépourvu de toute source matérielle.

courbure nulle? sujet de controverses : **constante cosmologique**

Un vide vraiment vide?

Ne devrait-on pas définir le vide comme ce qui reste quand on a tout enlevé, *y compris l'espace* lui-même?

Selon Einstein, idéalement : en l'absence de matière, il ne reste rien, même pas l'espace (ou l'espace-temps). Mais...

gravité quantique ?.

Vide et inertie

principe de relativité ; les mouvements uniformes n'existent pas autrement que de manière relative; l'espace vide (ou l'éther) ne possède pas de vitesse (dans quelle direction pourrait-elle d'ailleurs bien pointer?).

Mais **mouvements accélérés** ? On peut apparemment mettre en évidence une accélération par rapport à l'espace (celle qui nous colle au siège de l'avion qui décolle) : Le principe de relativité ne s'applique pas aux mouvements accélérés. : → espace vide repérage (référence) pour les mouvements accélérés ?

Inertie= résistance d'un corps à la mise en mouvement.

origine de l'inertie ? liée au vide ? nous ne savons toujours pas aujourd'hui

l'inertie = propriété qui concerne l'espace absolu ?

ou bien (Ernst Mach nie l'existence de l'espace (ou de l'espace-temps) absolu : Nous croyons repérer les accélérations par rapport à l'espace, mais ce n'est qu'une illusion: nous les repérons en fait par rapport à l'ensemble des objets matériels existants.

« espace » = idéalisation de cet ensemble. Une telle prise de position correspond à l'un des énoncés possibles du principe de Mach. L'inertie d'un corps apparaîtrait alors comme une relation entre ce corps et le reste de la matière existante.

Einstein a déclaré que son élaboration de la relativité générale avait été très influencée par le principe de Mach.

problème très complexe. Pas d'unanimité chez les physiciens.

la courbure de l'espace-temps possède tout à la fois un caractère géométrique (physique aujourd'hui) et un caractère substantiel (vision « machienne »)

conception « relationnelle »: (Gottfried Wilhelm Leibniz, repris par Mach), : espace = l'idéalisation de l'ensemble des relations entre tous les objets.

[Selon la physique quantique, ces objets sont les champs quantiques. Leurs états fondamentaux (autrement dit, le vide quantique) seraient responsables de l'inertie et constitueraient la référence des positions et des mouvements (pour les accélérations par exemple).

Le vide de la théorie quantique des champs (TQC)

Celle-ci ne considère pas le monde matériel comme constitué de particules élémentaires, mais comme une **superposition de champs quantiques**: un pour chaque espèce (photons, électrons et positons, chaque type de quark (et son antiquark), etc.

Un champ quantique s'étend **dans la totalité de l'espace-temps**.
Les propriétés de **la totalité des «électrons»** dans le monde sont celles du champ quantique (unique) associé à ce type de particules.
un seul champ (quantique) électro- magnétique décrit l'ensemble de toutes les ondes lumineuses qui existent dans l'Univers, etc.

Les interactions entre champ électronique et champ électromagnétique décrivent d'un seul coup **toutes les interactions** électrons - ondes électromagnétiques de l'Univers.

Pour le champ [de l'électron] : immense diversité d'états possibles =
(état = une configuration de l'ensemble des électrons du monde)

état fondamental: **énergie minimale**

symétrie maximale : mêmes propriétés selon une multitude de points de vue
(reste invariant sous un vaste ensemble de transformations.)

Tous les autres états sont qualifiés d'« **excités** »: présence de particules .

vide quantique = superposition quantique des états fondamentaux associés à toutes les espèces (de particules)
= vide du champ de l'électron + vide électromagnétique (= des photons) + vide des quarks...

(Aucun champ excité ; aucune particule d'aucun type présente) : virtuel, puisque l'Univers est empli (entre autres) d'électrons.

Le vide n'est pas l'absence des champs, mais un état particulier des champs : absence d'excitation

énergie minimale, symétrie maximale, invariance de Lorentz,) mais aussi « matériel » que les particules.

«Le vide est empli en permanence d'un champ électromagnétique se propageant à c .» (1916, le physicien allemand Walther Nernst)

vide quantique comme base ontologique de la TQC ? Tout état = excitation de ce substrat fondamental et universel.

Énergie du vide (quantique)?

grande confusion à ce sujet : impossible de calculer l'énergie d'un état du champ quantique, quel qu'il soit.

- **calcul naïf** : champ quantique == collection infinie d'oscillateurs virtuels :
Un état du champ == l'ensemble infini de tous les états de tous les oscillateurs.
→ énergie du champ == somme des énergies de tous ces oscillateurs ? **valeur infinie** ! (même pour l'état fondamental)

le concept d'énergie n'est pas défini en théorie quantique des champs.

Mais on a rarement besoin de connaître une énergie **absolue** (sauf en cosmologie ?)

différences d'énergie entre états? l'infini moins l'infini ?

« **renormalisation** » ou « **régularisation** » inventée par physicien américain Richard P. Feynman :
« **cacher les infinis sous le tapis** ».

l'effet Casimir : les différences d'énergie entre états semblent bien posséder une réalité physique.

Mais pas d'énergie *absolue* du vide

L'effet Casimir (imaginé en 1948 et qui doit son nom à Hendrik Kasimir), fut mesuré pour la première fois en 1957. Il l'est aujourd'hui avec une précision de l'ordre de 1 %. Son étude, ou celle d'effets du même genre, est devenue un sujet actif de la physique nanoscopique. Il s'agit de l'existence d'une force qui manifeste une différence d'énergie entre deux états du champ quantique (électromagnétique). Il est d'usage de qualifier

énergie du vide comme référence ?

convention : l'énergie du vide est égale à zéro ?

Propriétés du vide quantique

L'état fondamental (le vide) peut être qualifié **d'éther**, car il constitue le support des interactions (sauf la gravitation).
points communs avec la matière.

Fluctuations et particules virtuelles

absence de particules : opérateur « nombre de particules » donne la valeur zéro.

Mais (Dirac) contient une infinité de particules «virtuelles» d'électrons, inobservables

jeux de langage

(avec antiparticules ; annihilation et matérialisation) → «fluctuations du vide»

localisées, se modifient : → une « substance ».

toujours présentes, à la manière de l'espace, ou du vide:

substrat de référence? (repérer positions et mouvements par rapport à ces fluctuations plutôt que par rapport à l'espace?
gravitation quantique ?)

Polarisation du vide

un électron (dans le vide) est entouré d'une multitude de particules «virtuelles».

l'apparition de ces particules virtuelles viole la conservation de l'énergie, fondamentale : les particules créées «emprunteraient» au vide (à qui d'autre?) l'énergie nécessaire à leur apparition (aucun problème puisqu'il en possède une quantité infinie!). processus très court

Le plus étonnant est que, malgré l'absence d'interprétation plus raisonnable, la théorie montre un pouvoir prédictif tout à fait spectaculaire.

Cosmologie

Pouvons-nous imaginer qu'une amélioration de la théorie quantique permettra de justifier la notion d'énergie du vide ?

= somme des énergies (jamais nulle) de toutes les oscillations élémentaires du champ, à toutes les longueurs d'onde. Les oscillateurs sont en nombre infini : de la longueur d'onde zéro (« taille » d'un point de l'espace) à l'infini (« taille » de l'Univers).

énergie = intégrale de zéro à l'infini = infini

remplacer zéro par une « longueur de coupure » E (cut off), qui représenterait une valeur minimale pour les longueurs d'onde possibles des oscillations ? →

La valeur de l'intégrale deviendrait finie, dépendant de la coupure.

Une version future des théories des champs quantiques puisse faire intervenir une telle coupure ?

Mais longueur de Planck (soit $1,6 \times 10^{-33}$ cm), →

densité d'énergie du vide quantique 10^{120} fois trop élevée

« problème de la constante cosmologique » ?

autre échelle?

supersymétrie ? les contributions à l'énergie du vide des différentes espèces se compenseraient

Il n'existe aucun moyen de considérer de manière rigoureuse l'énergie du vide quantique.

Vide et cosmologie

1917, Einstein : premier modèle relativiste (« modèle d'Einstein »)
volume et extension de l'espace finis.
Statique

L'expansion cosmique

Hubble, Soviétique Alexandre Friedmann, et Belge Georges Lemaître.

« temps de Hubble », constante de Hubble

paramètre de décélération

attraction gravitationnelle → *décélération*

supernovae → *accélération* (âge de l'Univers)

Origine de l'accélération cosmique ?

Constante cosmologique

= constante fondamentale de la nature (vide de la relativité générale).

ou **énergie sombre** ?

(= « énergie exotique » : mystérieuse substance à l'influence gravitationnelle répulsive)

vide de la théorie quantique des champs ?

La constante cosmologique Λ

- absente des premières formulations de la relativité générale (équations d'Einstein sans constante cosmologique) :

pas de sources de gravitation (matière ou rayonnement) → Univers sans courbure, statique sans expansion (**espace-temps de Minkowski** = vide de la RELATIVITE GENERALE sans Λ)
matière ou rayonnements déforment « le vide » en engendrant courbure et dynamique.

- version de la relativité générale avec Λ (constante fondamentale)
pas de source → «**espace-temps de De Sitter**» = vide de la relativité générale avec Λ
courbure absolument constante, dans l'espace et dans le temps, mais non nulle
Expansion constante, accélérée

$\Lambda =$ courbure du vide = $1/R^2$

R = rayon de courbure du vide

longueur fondamentale de la nature

avec /microscopique / la longueur de Planck (gravitation quantique ?)

dans les deux cas, le vide correspond bien à l'état le plus symétrique, le plus régulier que permet d'imaginer la théorie.

espace-temps réel = vide déformé (excité) par la présence de matière.
(observations)

Énergie sombre ou constante cosmologique?

Comment décider ?

simplicité → sans Λ : une seule constante (G) plutôt que deux (G et Λ).

Mais ... plus **général** et plus « **naturel** » → avec Λ .

observations

énergie sombre ? nous ne connaissons rien de tel

associer une densité d'« énergie » absolue au vide de la théorie quantique des champs ?

concept d'énergie du vide ?

(pari d'une nouvelle physique adéquate)

ad hoc

théorie quantique des champs courbe ? vide d'un l'espace-temps avec courbure ?

Le problème de... l'énergie du vide

longueur fondamentale e ? *ad hoc*

longueur de Planck → 10^{120} fois trop

«problème de la constante cosmologique» !

future théorie ?

vide = le plus «symétrique» des états possibles

maximum de régularité possible.

une éventuelle irrégularité apparaîtrait comme un détail contrastant avec l'environnement vide → nous serions amenés à vouloir l'« ôter » afin de réaliser un vide encore meilleur.

Pourrait-il se présenter des situations où il serait impossible d'ôter ce détail? tellement « incrusté » dans la structure du vide (ou de l'espace), que l'on soit contraint de considérer qu'il en est partie prenante?
à l'échelle microscopique, des « cicatrices » impossibles à faire disparaître ?

Ex. : corde (fixée à ses deux extrémités) avec un nœud ;
la corde peut être déformée (déplacement du nœud), mais dénouement impossible
topologie → « nœuds » (accrocs) intimement liées à l'espace ou l'espace-temps : des espèces spéciales de particules ?

Variations du vide et défauts cosmologiques : défauts du vide (en cosmologie)

« brisures de symétrie » = changements de l'état du vide

← théories unitaires

ancien vide → nouveau vide

régions de transition, interfaces (transition non harmonieuse) :

« défauts topologiques » (cf « nœuds » : géométrie ou matière ?) « monopoles », « cordes cosmiques »

Tout est géométrie?

matière =

accrocs dans le tissu géométrique de l'espace-temps (= le vide) que nous interpréterions comme des particules?

matière = géométrie

(rêvé d'Einstein ... Galilée, Platon ...)

théorie des cordes : matière = états de vibration et/ou d'enroulement de cordes microscopiques

Celui par qui le scandale arrive

le vide exacerbe souvent les problèmes conceptuels d'une théorie, de manière cruciale.

les difficultés suscitées par le vide constituent l'un des **générateurs du progrès physique**, en faisant naître une conception inédite.

→ renouveau des concepts fondamentaux (vide en particulier)

gravitation de Newton → éther gravitationnel (transmettre) : mène Einstein à la relativité générale.

→ vide de la relativité générale; constante cosmologique

éther luminifère (ou électromagnétique) → relativité restreinte.

La **physique quantique** a profondément modifié nos points de vue sur le vide.

cosmologie : vide de la relativité générale ou de la théorie quantique des champs ?

[**relativiste ou quantique**] : **cadres de pensée différents**

[cf « éther/espace infini » ou « vide/matière subtile ».]

Pour chacun, le statut du vide est mal défini et pose problème; ses propriétés sont mal décrites et mal comprises. La cosmologie ajoute à la confusion en mettant les deux points de vue en relation.

→ théorie plus globale, plus unitaire ?

« théorie du tout » ?

cordes et super-cordes, supersymétrie, gravité quantique en boucles ou en réseaux de spins, géométrie non commutative...

Vers l'unité?

Le rêve d'Einstein (...) : une unique substance.

relativité générale :

espace-temps (géométrique) = gravitation (interaction)

physique quantique :

unifie matière, rayonnements, interactions (sauf gravitation), vide.

conception du monde où matière et vide, rayonnements et interactions, mais aussi gravitation et géométrie de l'espace-temps apparaissent tous sur le même plan, soient traités de la même façon, relèvent de la même ontologie?

forme géométrique (de l'espace-temps) = champs quantiques.

vide gravitationnel = vide quantique ?

géométrie de l'espace-temps = excitation du vide ?