

=

Cours sur la notion de symétrie

Jean-Jacques Szczeciniarz. *University Paris 7*

2014 March

La philosophie de la physique est devenue une branche importante de la philosophie, elle occupe une place de choix dans les Handbooks de philosophie des sciences.

à travers une partie dominante qui est la philosophie analytique des sciences dans ses années de formation, c'est un fait historique pour la philosophie, ce courant s'est maintenant beaucoup nuancée voire transformé par son recours plus net à l'épistémologie et l'histoire des sciences

La seconde raison de ce développement est dû à la nature des développements de la physique qui en est venue à poser de façon de plus en plus explicite des questions philosophique, épistémologique et ontologique

La physique a eu une énorme influence sur les premiers développements de la philosophie analytique de l'empirisme logique et du positivisme logique. Pour une part ce phénomène est dû au fait que pour les empiristes logiques et les positivistes logiques la physique est le paradigme de toute connaissance empirique. Mais il ya plus (cf. Butterfield) chacun des trois piliers de la physique moderne, thermodynamique, théorie quantique, relativité présentent des arguments spécifiques dans le débat philosophique.

La thermodynamique et les controverses scientifiques sur l'existence de l'atome ont eu des effets certains sur le débat philosophique entre réalisme et instrumentalisme, la naissance de la mécanique statistique a alimenté la philosophie des probabilités. en ce qui touche à la MQ son influence la plus forte s'est traduite dans le fait que les philsofes ont dû envisager qu'une théorie physique puisse être d'une façon ou d'une autre indéterministe. cf. p. e. Levu i-Leblond F Balibar. Cette influence est elle-même problématique puisuq'elle cette question ne touche qu'à une partie de la physique quantique " la réduction du paquet d'onde".

En tout cas les difficultés de l'interprétation de TQ ont déconcerté non seulement les philosophes mais aussi les géants de la physique comme Einstein ou Bohr. qui se sont jetés dans des débats non seulement sur l'indéterminisme mais aussi sur l'objectivité

Les RR et RR ont révolutionné la philosophie de l'espace et du temps et ont secoué la doctrine kantienne et même néo-kantienne de la géométrie. (Russell, Reichenbach, Cassirer etc.)

Cette influence signifie que quand la philosophie analytique est devenue un courant dominant dans la philosophie anglo-saxonne, la philosophie de la physique s'est établie comme une sous-discipline dominante dans la philosophie des sciences. Le développement de la philosophie est suspendu à celui de la philosophie de la physique

A partir des années soixante la philosophie de la physique s'est développée pour des raisons externes à la philosophie. Dans le corps même de la physique des problèmes fondationnelles se sont posés avec des répercussions sur leur mode d'enregistrement philosophique. Ils ont vu des développements variés en physique et une influence décisive sur la philosophie. Une remarque sur la notion d'influence.

Il s'est trouvé, on a pu le dire dans les années 1990-2000 que les questions fondationnelles ont eu des effets importants sur les théories de physique fondamentale, et ont fourni les problèmes qui ont suscité le plus d'intérêt de la part des philosophes. ce sont les thèmes que je vais passer en revue (Butterfield et Earman) que je vais passer en revue avec vous

Je vais reprendre rapidement la question de physique thermique, de théorie quantique et de relativité et de combinaisons de celles-ci.

La physique thermique

Les controverses de la physique thermique se sont poursuivies depuis les pères fondateurs Maxwell et Boltzmann spécialement en ce qui concerne les approches de l'équilibre. Ces controverses se retrouvent dans les débats modernes, et mais ces controverses ont été transformées par les développements de champs différents

- ▶ la mécanique classique et ses dérivées comme la théorie ergodique et la théorie du chaos

- ▶ La physique thermal quantique

- ▶ La cosmologie qui fournit un contexte détaillé et fécond (B E) pour le développement et l'évaluation de l'idée de Boltzmann que l'origine ultime de la flèche du temps est cosmologique

La théorie quantique

depuis les années 60 la communauté physique a témoigné d'un regain d'activités par les débats sur l'interprétation de la physique quantique qui ont fait fureur parmi les pères fondateurs. Le théoricien le plus influent a été John Bell non seulement par son théorème de non localité mais aussi par les expériences qu'il a entraînées et sa critique de l'ontologie de l'École de Copenhague et sa sympathie à l'égard de l'onde pilote et les effondrements dynamiques hétérodoxes.

Les physiciens ont développé une profonde compréhension des relations entre théorie quantique et théorie classique. Depuis 1970 on a progressé dans la compréhension de la décohérence et tout le monde admet qu'elle joue un rôle crucial dans l'émergence du monde classique du monde quantique. Et depuis les années 90 différents champs de recherche ont émergé information et calcul quantiques ont fait exploser les débats interprétatifs sur l'analyse de la non-localité quantique

La théorie de la relativité

Les décades depuis les années 60 ont vu un développement spectaculaire de la théorie de la relativité expérience, RG et cosmologie. Avec un développement des réflexions fondationnelles et philosophiques. Les relativistes mathématiques ont continué à approfondir notre compréhension des fondements de la théorie de la relativité générale, question cruciale depuis les années 20 pour a philosophie de l'espace et du temps. La cosmologie récent et sa transformation pour une part en une science expérimentale a rapproché des questions philosophiques variées de la révolution scientifique et rendu d'autres questions philosophiques de méthode et d'explication en cosmologie, plus pressantes.

Ces piliers fondamentaux se sont combinés posant les questions de l'unité de la physique.

Je ne ferai que des allusions à ces domaines immenses qui se sont ouverts. Le cadre le plus important combinant la théorie quantique la RR est la théorie quantique des champs. Les questions fondationnelles issues de la TQC diffèrent des problèmes traditionnels d'interprétation de la théorie quantique comme la mesure et la non-localité

quoique la TQC illustre tout autant la les problèmes précédents que la théorie quantique élémentaire elle ne peut donner aucune solution à ceux-ci. Les problèmes de la mesure et les énigmes de la non localité proviennent directement de l'unitrité et des caractéristiques du produit tensoriel de ces théories quantiques. Et elles sont de ce fait pas touchées par les structures extra mathématiques et les idées physiques venues de la TQC.

Par ailleurs il y a des problèmes fondationnels (ou vus comme tels) comme la nature des particules (avec les questions de non localité), l'interprétation de la renormalisation, l'interprétation des structures de jauge, et l'existence de représentations équivalentes unitaires des relations canoniques de commutation.

A quoi s'ajoute le champ immense de la gravité quantique

Remarque après cette introduction. La frontière séparant la physique de la philosophie est étroite. Physiciens philosophes généralités. Travail contemporain qui est plus proche de la physique que de la philosophie (à voir).
Heuristiques pour la physique. Importance des succès incroyable!

Introduction

Pourquoi ce thème? Thème transverse : susceptible d'analyse
philosophie analytique, métaphysique, mathématique et
ontologique

Significations anciennes. Beauté, harmonie, correspondance entre parties, équilibre, égalité, proportion, régularité. Commentaire sur chacune de ces thématiques . P. e. la régularité qu'est-ce?

Exercice relier ces sens les uns aux autres

Le concept de symétrie en physique est né de cette famille d'idées.
D'abord les symétries des objets physiques qui nous entourent.
symétries bilatérales du visage humain
symétries rotationnelle d'un flocon de neige tourné de 60

Symétrie d'une figure géométrique comme l'invariance de cette figure quand des parties égales de cette figure sont changées sous une opération spécifique.

Le développement du concept algébrique de groupe au XIX^e siècle a permis une généralisation et un raffinement de cette idée

Une notion de symétrie a émergé au XIX^e siècle qui s'applique à la physique et aux objets mathématiques mais aussi aux équations mathématiques et donc aux lois physiques exprimées par des équations algébriques

C'est une approche simpliste de la question mais elle soulève
nombre de questions intéressantes des rapports géométrie algèbre
physique

La notion théorique de groupe de symétrie est la notion d'invariance sous un groupe spécifique de transformations. Délégation d'agents de transformation toute une analyse devrait être faite de ces actions. pourquoi et comment la science s'est-elle développée en structurant, construisant des formes d'invariance sous des concepts qui sont à même de retranscrire cette invariance ?

Une réponse simplifiée tient à la nature du concept (structure) de groupe qui établit les formes de possibilité de l'invariance (stabilité) et la loi de composition. L'invariance dessine les conditions d'existence des formes de la matière.

Je vais essayer de reprendre des distinctions que l'on trouve chez K
Brading et E. Castellani *Symmetries and invariance in classical
physics* En gros donc
symétries des objets et symétries des lois, symétries des principes
et symétries des arguments. Analyse rapide des principes de Curie.

Relations entre les symétries étudiées en physique et les techniques
de la théorie des groupes
puis symétries en physique une classification des différentes
symétries de la physique
application des symétries en physique classique
RR et RG d'Einstein

Les théorèmes de Noether
on va rester centrés sur la physique classique

Symétries des objets et symétries des lois

Symétries géométriques de certains objets tq la symétrie de rotation de 60° d'un flocon de neige, la symétrie bilatérale du visage humains et les asymétries d'objets comme l'échec d'une chaise à être rotationnellement symétrique.

Autre question : celle de la symétrie des lois qui gouvernent l'évolution temporelle de ces objets. On peut appliquer les lois de la mécanique à l'évolution de notre chaise, considée comme un système isolé , ces lois sont rotationnellement invariante (on n'a pas choisir une orientation temporelle) même si la chaise elle-même n'est ne l'est pas. Il faut distinguer entre symétries des états ou des solutions et symétries des lois et relations entre elles.

Principes de symétries et arguments de symétrie

L'application des principes de symétrie aux lois fut d'une importance centrale pour la physique du XX^e siècle (cf. below RS et RR) L'exigence que les lois quelles que soient les formes qu'elle revêtent répondent à des propriétés de symétries a été un outil méthodologique des physiciens théoriciens dans le processus selon lequel ils parviennent à obtenir les formes détaillées de diverses lois.

Les arguments de symétrie consistent à tirer des conséquences spécifiques de phénomènes particuliers sur la base de leurs propriétés de symétrie. ce type d'usage de la symétrie a une longue histoire: argument d'Anaximandre pour l'immobilité de la Terre. L'argument de la balance d'Archimède l'âne de Buridan.

L'argument associé peut être vu comme une application du principe leibnizien de raison suffisante. (PSR) s'il n'y a pas de raisons pour qu'une chose se produise plutôt qu'une autre alors rien ne se produit. Il y a cependant quelque chose de plus dans les cas ci-dessus. PSR est appliqué sur la base que les conditions initiales possèdent une certaine symétrie. La symétrie de la situation initiale implique une complète équivalence entre les alternatives offertes.

Dans ces conditions il n'y a pas de raison suffisante entre les alternatives et la situation initiale reste inchangée.

Forme commune de l'argument: une situation avec une certaine symétrie évolue de sorte qu'en l'absence de cause asymétrique la situation initiale est préservée. En d'autres termes, la brisure de symétrie des conditions initiales ne peut se produire sans raison: une asymétrie ne peut se produire spontanément. D'où les discussions récentes du Principe de Curie

Le principe de Curie

P. Curie a dû réfléchir sur la question des relations entre les propriétés physiques et les propriétés de symétries des systèmes physiques. sur la base de ses études des propriétés thermiques, électriques et magnétiques des cristaux puisque ces propriétés sont directement liées à la structure et donc à la symétrie des cristaux étudiés.

La question de Curie est la suivante : dans un milieu physique, p. e. un milieu cristallin ayant des propriétés spécifiques de symétrie, quels phénomènes physiques sont ont le droit de se produire. ses conclusions sont résumées dans son travail de 1804 " Sur la symétrie dans les phénomènes physiques". En voici le résumé

(a_1) si certaines causes produisent certains effets les éléments de symétrie dans les causes doivent se retrouver dans leurs effets
(a_2) si certains effets manifestent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se trouver dans les causes qui leur donnent naissance

a_3 en pratique la converse de ces deux propositions n'est pas vraie, i. e. les effets peuvent être plus symétriques que leurs causes
(b) un phénomène peut exister dans un milieu ayant les mêmes symétries caractéristiques ou la symétrie d'un sous-groupe de sa symétrie caractéristique. Certains éléments de symétrie peuvent coexister avec avec certains phénomènes mais non nécessairement. Ce qui est nécessaire est que certains éléments de symétrie n'existent pas. La dissymétrie est ce qui crée le phénomène.

Remarque. Curie use du terme de dissymétrie courant à l'époque c'est le sens de brisure de symétrie qui est souvent aujourd'hui identifié avec asymétrie. Il faut distinguer entre le résultat d'une brisure de symétrie (symétrie brisée), l'absence et l'une des symétries possibles compatibles avec la situation considérée (dissymétrie) comme on l'appelait dans la littérature du XIX^e siècle, en particulier chez Louis Pasteur dans ses travaux sur la dissymétrie moléculaire et enfin l'absence de toutes les symétries possibles compatibles avec la situation considérée. (asymétrie).

La conclusion a_1 est appelée couramment *principe de Curie*. a_2 est logiquement équivalente à a_1 . On affirme que les symétries sont transférées de la cause à l'effet alors que les dissymétries ne le sont pas. La conclusion a_3 clarifie cette affirmation soulignant que puisque les dissymétries n'ont pas besoin d'être transférées de la cause à l'effet, les effets peuvent être plus symétriques que leurs causes.

L'affirmation b) fait appel à une distinction trouvée dans les écrits de Curie entre le "milieu" et le "phénomène". Nous avons un milieu avec des propriétés de symétrie et le principe de Curie concerne les relations entre les phénomènes qui peuvent se produire dans le milieu et les propriétés de symétrie, en fait de dissymétrie du milieu. Cette proposition montre que Curie reconnaissait le rôle important joué par le concept de dissymétrie, symétries brisées en physique.

Pour que le principe de Curie soit applicable des conditions doivent être satisfaites.

- ▶ La cause et l'effet doivent être bien définis

Pour que le principe de Curie soit applicable des conditions doivent être satisfaites.

- ▶ la connexion causale entre eux doit être bien établie

Pour que le principe de Curie soit applicable des conditions doivent être satisfaites.

- ▶ les symétries de la cause et de l'effet doivent être bien définies cela concerne à la fois les propriétés physiques et géométriques des systèmes physiques considérés

Commentaire. Le principe de Curie fournit un critère nécessaire pour qu'un phénomène se produise les seuls phénomènes qui sont compatibles avec les conditions de symétrie établies par le principe peuvent se produire. Il possède une fonction méthodologique importante: il fournit une sorte de règle de sélection: donnée une situation initiale avec une certaine symétrie, seuls se produisent certains phénomènes, il fournit une sorte de critère de falsification pour les théories physiques (une violation du principe de Curie indique que quelque chose est faux dans la description physique de la situation).

Question épistémologique. L'application du principe de Curie dépend de notre acception de sa vérité, ce qui a été beaucoup questionné dans la littérature spécialement avec la question de la brisure spontanée de symétrie. On a justifié le principe de différentes manières. Curie lui-même semble l'avoir considéré comme une sorte de principe de causalité. Dans la littérature plus récente on s'est demandé si le principe ne pouvait pas être démontré à partir de prémisses incluant une définition de la cause et de l'effet.

Il est admis d'interpréter ce principe comme une forme du principe de causalité, et on s'est demandé si on pouvait le démontrer à partir de prémisses incluant une définition de la cause et de l'effet. Il est admis de comprendre ce principe comme conséquence de propriétés d'invariance de lois physiques déterministes.

Commentaires

C'est le cas de l'article de Chalmers. BJP 21 1970 qui donne une formulation du principe de Curie en termes de relations entre les symétries d'état antérieurs et postérieurs d'un système et des lois les reliant. La critique essentielle adressée à cette interprétation tient dans l'introduction qu'elle fait de la temporalité. Si la cause et l'effet sont ordonnés dans le temps si nous introduisons une analyse diachronique et dynamique on dénature les intentions initiales de Curie qui s'est concentré sur les relations synchroniques de phénomènes différents se produisant en même temps. cf. les exemples qu'il donne et le fait que la discussion sur les lois est absente de l'analyse de Curie

Diachronicité et principe de Curie

On peut voir cette question comme une application du PSR dans lequel nous accordons une attention particulière au fait de savoir si les lois fournissent une raison suffisante pour une brisure de symétrie d'un système qui évolue d'un état initial à un état final à travers ces lois

reformulation synchronique par J Earman Curi's principles and spontaneous symmetry breaking International Studies in the Philosophy of Science 18 173-199 2004 cette reformulation présente les avantages de présenter une preuve que si l'état initial possède une symétrie donnée et que les lois préservnt de manière déterminée les symétries, alors l'état final possède également cette symétrie.

Les choses sont plus compliquées Spécifier les symétries d'un état requiert de recourir à la structure de fond tq l'espace et l'espace temps ou l'espace des solutions. Et donc en général la dynamique du système ne sera pas indépendante de cette structure(exemple, l'espace, l'espace temps, l'espace des solutions).

La réponse à la question de savoir si la structure diachronique est importante dépend de l'examen de ce manque d'indépendance et ce cela n'a pas été fait dans la littérature. La version originale du PC et sa version diachronique commencent par la symétrie des états des systèmes physiques. Dans la physique contemporaine le regard s'est tourné vers la symétrie des lois et la connexion entre symétries des systèmes physiques et symétries des lois n'est pas lié à la symétrie des états de ces systèmes, mais à la symétrie de l'ensemble des solutions. solution = histoire du système étendu dans le temps, état d'un système = solution à un instant

les solutions d'une équation dynamique ne sont pas en général les symétries des solutions individuelles mais plutôt les symétries de l'ensemble des solutions, en ce sens qu'une symétrie d'une équation dynamique transforme une solution donnée en une autre solution

Si on considère les liens entre lois et solutions on obtient une autre version de PC

La relation avec la version diachronique implique une formulation comme celle-ci: Deux ingrédients

- 1) la motivation de PC : quels phénomènes sont physiquement possibles? et il suggère d'utiliser des symétries pour répondre comme un guide
- 2) aller au-delà de PC usant des symétries des lois que Curie n'utilise pas mais qui est devenu central en physique contemporaine

Formulation : les symétries des lois (équation) doit être trouvée dans l'ensemble de ses solutions.

La version de cette formulation moderne exprime le fait que l'idée de base de Curie que la symétrie ne peut se perdre (perdre une symétrie) sans raison, en vertu du fait que la symétrie des lois doit se retrouver dans l'ensemble des solutions

Le fait que ce soit la manière dont nous définissons la relation entre symétries et lois n'invalide pas la motivation de PC. Nous pouvons user des symétries de la loi pour trouver les solutions i.e. pour trouver quels phénomènes sont physiquement possibles quand toutes les solutions ne sont pas connues. Une proposition définitionnelle (les symétries de la loi doivent se trouver dans l'ensemble des solutions) acquiert une fonction épistémique quand nous ne connaissons pas toutes les solutions.

Un groupe est un système de concepts au moyen duquel les propriétés de symétrie des théories sont étudiées. Définition d'un groupe et son application à la géométrie et à la physique.

un groupe est une famille \mathcal{G} d'éléments g_1, g_2, \dots, g_k pour laquelle on définit une loi interne, à toute paire d'éléments g_i, g_j du groupe en assigne un troisième $g_i \cdot g_j = g_k \in \mathcal{G}$. Avec les réquisits suivants

► $(g_i g_j) g_k = g_i (g_j g_k)$

- ▶ il existe un élément identité e t q $g_1 e = e g_1$ pour tout $g_i \in \mathcal{G}$

- ▶ pour tout $g_i \in \mathcal{G}$ il existe un élément inverse $g_i^{-1} \in \mathcal{G}$ t q
 $g_i g_i^{-1} = g_i^{-1} g_i = e$

Quelques remarques historiques

Galois, Lagrange *Réflexions sur la résolution algébrique des équations* texte le plus important. sur la théorie des permutations, preuve de Ruffini, 1799) L. Cauchy, Abel, Galois. Galois a caractérisé les racines d'une équation par l'ensemble des permutations qu'elles peuvent subir. Il caractérise une équation en termes de ses degrés de symétrie, déterminé par l'ensemble des permutations qu'elles peuvent subir qui préservent leurs relations algébriques. Il transforme le problème de la résolution des équations en un problème de l'étude de leurs permutations et donc du groupe de celles-ci.

La résolution de la quintique importance de la théorie de Galois

Joseph Liouville, Camille Jordan

Contributions de Klein et Lie

Lie et Klein ont écrit un article examinant les propriétés de certaines courbes en termes de transformations projectives les laissant invariantes. Ils ont été attirés à Paris par leurs intérêts pour la géométrie projective, Poncelet qui étudie les propriétés des figures conservées par projections centrales

La géométrie projective est devenue un instrument fécond pour étudier les objets d'un champ de recherches où l'on combine les méthodes algébriques et géométriques pour étudier les invariants. La théorie des invariants : branche florissante des mathématiques centrée sur l'étude systématique des invariants des "formes algébriques". A. Cayley a clarifié les relations entre géométrie projective et géométrie euclidienne l'aide de la théorie des invariants. (GE cas particulier de GP)

Klein avait essayé de définir une distance (une "métrique" en termes de forme quadratique définie sur l'espace projectif pour le cas des géométries non- euclidiennes.
relations avec G Darboux.

Le programme d'Erlangen

Klein combine a) l'application de la théorie des invariants à l'étude des propriétés géométriques

b) l'idée (lui et Lie) d'appliquer la théorie algébrique des groupes au traitement des transformations géométriques

La nouvelle conception groupe théorique de la géométrie qui en résulte fut annoncé lors e son fameux programme d'Erlangen comme il est b nommé à la suite de la conférence " Considérations comparatives sur les recherches récentes en géométrie". que F Klein agé de 23 ans a donnée lors de son entrée comme professeur à l'Université d'Erlangen

La géométrie est unité : il faut caractériser la théorie géométrique en usant de la catégorie générale d'invariance sous un groupe de transformations (c'est la notion de symétries) Une géométrie est alors définie par rapport à un domaine (plan espace, variété) et un groupe de transformation agissant sur eux. c'est la science qui étudie les transformations sous l'action d'un groupe.

Chaque géométrie est donc déterminée par le groupe de symétries le caractérisant, (la géométrie du plan est caractérisée par les transformations affines agissant sur le plan) et les relations entre les géométries doivent être étudiées à travers les relations entre les groupes qui les définissent. (isomorphismes entre deux géométries revient à l'isomorphisme entre leurs géométrie).

Remarque rapide sur la structure euclidienne: l'espace euclidien est le seul qui admette un système triple orthogonal formé de surface totalement géodésique. Il est de tous les espaces le plus dégénéré, celui qui a le plus fort groupe d'automorphismes, c'est donc par rapport à lui que les autres se détermineront Helmholtz corps rigides et libre mobilité 1868

Avec la définition de Klein d'une géométrie les propriétés géométriques et symétriques sont très proches, la symétrie d'une figure qui est définie sur un espace donné, dont les propriétés géométriques sont préservés par les transformations d'un groupe \mathcal{G} est déterminée par le sous-groupe de \mathcal{G} laissant la figure invariante. les conceptions et les techniques groupe théorétiques a induit une transition d'une approche inductive (venu des classifications du XIX è siècle des formes cristallines en termes de leurs propriétés de symétrie) a une approche plus abstraite et déductive.

la classe des propriétés projectives forme un groupe et toute propriété invariante par le groupe des transformations projectives demeure invariante par le groupe des similitudes qui est l'un des sous-groupes du groupe projectif. Le groupe des similitudes caractérise la géométrie euclidienne. Les métriques non euclidiennes apparues au XIX^e siècle en opposition à la géométrie euclidienne en vertu de l'indépendance du V^e postulat correspondent à un autre sous-groupe du groupe projectif, celui qui laisse invariante un conique réelle ou imaginaire

cf. Weyl *Symmetry* 1952

Quoi que vous ayez à faire avec une entité pourvue d'une structure Σ essayez de déterminer son groupe d'automorphismes, le groupe des transformations éléments par élément qui laissent toutes les relations structuralles inchangées. Après quoi vous pouvez commencer à explorer les configurations symétriques des éléments, les configurations qui sont invariantes sous un certain sous-groupe du groupe de tous les automorphismes.

Les classifications des groupes de symétries peuvent être étendues à des espaces différents du plan et de l'espace de l'expérience commune.

cf. Klein Classification des groupes discrets, groupe de transformations liées aux polyèdres réguliers qui sont pertinentes pour la recherche des solutions des équations algébriques par radicaux.

Lie *Theorie der Transformationsgruppen* équa dif et théorie de Galois.

Quelques remarques sur la variété des symétries en physique.

nombre de variétés différentes
global local,
interne externe
continues discontinues

Les plus connues sont les symétries globales de l'espace temps , invariance galiléenne de la mécanique Newtonienne, l'invariance de Lorentz de RR, . Les symétries globales de l'espace temps sont valides pour toutes les lois de la nature, pour tous les processus qui se déroulent dans l'espace temps. Wigner les appelle 'géométriques.

Ce caractère universel n'est pas partagé par certaines des symétries introduites en physique au cours du XX^e siècle. La plupart sont d'un genre entièrement nouveau sans racines dans l'histoire des sciences et dans certains cas expressément introduites pour décrire certaines formes d'interactions d'où le nom de symétries dynamiques introduites par Wigner. *Symmetries and reflections* Indiana University Press 1967.

Distinction global local.

Différentes signification de cette distinction.

On va l'utiliser en distinguant les symétries qui dépendent de paramètres constants (global) et symétries qui dépendent de fonctions lisses arbitraires de l'espace et du temps (local). tandis que l'invariance de Lorentz est une symétrie globale, la symétrie de jauge de l'électromagnétisme classique (symétrie interne) et l'invariance sous difféomorphisme de la RG (symétrie d'espace temps) sont des exemples de symétries locales puisqu'elles dépendent de fonctions arbitraires de l'espace et du temps. Si l'on reprend la distinction de Wigner on dira que l'invariance de Lorentz est une symétrie géométrique, s'appliquant à toutes les interactions, tandis que la symétrie de jauge de l'électromagnétisme concerne l'interaction électromagnétique spécifiquement et est donc une symétrie dynamique.

La symétrie de jauge de l'électromagnétisme classique est une symétrie interne car les transformations du potentiel vectoriel se produisent dans l'espace interne du système plutôt que dans l'espace temps.

La symétrie de jauge de l'électromagnétisme classique peut être vue comme une simple curiosité mathématique spécifique à cette théorie. Mais avec l'intervention de la théorie quantique l'usage de degrés de liberté internes et les symétries internes deviennent fondamentales

Imaginons un fil selon une direction nord-sud sous une boussole. L'aiguille de la boussole est parallèle au fil et point vers le nord. Faisons passer dans le fil un courant d'électrons qui va du sud au nord. L'aiguille tourne immédiatement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et indique l'ouest. Si on inverse le sens du courant, l'aiguille fait volte-face et indique l'est.

Les physiciens du XIX^e siècle supposaient que ce phénomène dénotait quelque mystérieuse asymétrie des lois de la nature. L'expérience n'est pas superposable à son image dans un miroir puisque dans le miroir l'extrémité nord de l'aiguille de la boussole ne pointerait pas dans la bonne direction.

Le grand physicien allemand Ernst Mach explique dans sa classique *Mécanique*, le choc "intellectuel" que cette expérience produisit sur lui. Elle nous donne dit-il, une importante leçon : nous devrions toujours nous méfier de notre intuition quand nous tentons de prévoir quel sera le comportement de la nature

E. Mach *La Mécanique*, exposé historique et critique de son développement

Toute connaissance instinctive, fût-elle d'une grande force logique aussi grande que le principe de symétrie employé par Archimède peut nous induire en erreur. Maint lecteur se souviendra peut-être de l'émotion intellectuelle qu'il ressentit lorsqu'on lui dit pour la première fois

que l'aiguille aimantée placée dans le méridien magnétique était déviée dans un sens déterminé hors de celui-ci par un courant électrique parallèle situé au-dessus d'elle. La connaissance instinctive est aussi sujette à l'erreur que la connaissance consciemment acquise. Elle n'a somme toute de valeur que dans dans les domaines qui nous sont très familiers

*Un homme dit à l'univers
"Monsieur j'existe!"
" Pour autant " répond l'univers,
Je n'en ressens aucune obligation"*

Stephen Crane *War Is Kind and other Lines* Knopf 1899

Ozma La Princesse d'Oz

Dans l'expérience de l'aiguille notre intuition nous faisait prévoir que les champs magnétiques et électriques, comme bien d'autres champs de force physiques symétriques ne marqueraient aucune préférence pour la droite ou pour la gauche. Et pourtant une rotation asymétrique semble jouer un rôle essentiel dans l'expérience du fil et de la boussole

Comment transmettre 'a une autre planète la différence gauche /droite? Il nous suffit de demander à nos amis de la planète X de réaliser l'expérience et on sera d'accord pour dire que la "gauche" est la direction vers laquelle se dirige l'aiguille de la boussole quand un courant passe sous elle en s'éloignant de nous

Pas bon; aucun critère n'existe pour distinguer le pôle nord du pôle sud. Au cours des cinquante dernières années il s'est trouvé de temps à autre un physicien qui croyait avoir découvert quelque caractère intrinsèque capable de différencier l'un des pôles de l'aimant de l'autre sans l'éprouver à l'aide d'un champ magnétique externe, toujours on a trouvé une erreur

l'extrémité nord de l'aiguille d'une boussole est en général peinte en noir pour la distinguer de son extrémité sud. comment on sait que c'est l'extrémité nord qu'il faut noircir? En la comparant avec un autre aimant. Le pôle nord est celui qui repoussé par les pôles nord des autres aimants. Comment on reconnaît les extrémités nord des autres aimants?

Ce sont les extrémités repoussées par les pôles nord d' autres aimans encore. C'est le champ magnétique de la Terre elle-même qui sert de base ultime à la définition du pôle " nord" . Le pôle nord de l'aimant est celui qui est attiré par vers le pôle nord magnétique de la Terre

A proprement parler le pôle magnétique nord de la Terre est son pôle "sud". Par convention on a décidé d'appeler "Nord magnétique" le pôle sud magnétique de la Terre à cause de sa proximité avec le pôle nord géographique

Une ambigüité gauche-droite se retrouve dans tous les phénomènes magnétiques liés au magnétisme et à l'électricité. Tout comme les charges en mouvement créent des champs magnétiques dans lesquels les aimants prennent une orientation asymétrique, les aimants créent les champs dans lesquels les courants ont tendance à se comporter de façon asymétrique

Une expérience bien connue consiste à faire décrire des cercles autour du pôle d'un aimant à un fil électrique vertical dont une extrémité plonge dans du mercure : la rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre ou en sens inverse

Dans tous les phénomènes de ce genre le sens de rotation dépend du pôle de l'aimant utilisé. On ne peut donc pas utiliser cette rotation pour communiquer la droite et la gauche à la planète X car nous ne pouvons pas lui faire savoir comment distinguer les pôles nord et sud

Les physiciens expriment ceci en disant que : la distinction entre les pôles nord et sud d'un champ magnétique est une *convention*. Les pôles se repoussent s'ils sont de même nom et s'attirent sinon. Le pôle nord est nord parce qu'il est attiré par le pôle Nord terrestre (magnétiquement sud en réalité). Ces noms n'ont été introduits que par commodité. Le champ magnétiques d'un barreau est parfaitement symétrique par rapport au plan qui coupe l'axe polaire en son milieu

S'il arrivait soudain que tous les pôles nord des aimants de l'univers deviennent des pôles sud et inversement, aucun changement ne pourrait être détecté expérimentalement. Le cosmos a été changé de haut en bas aucun sens. Événement en 1957

Après tout une aiguille magnétique réagit bel et bien de façon étrangement asymétrique quand on la place au-dessus ou en dessous d'un courant. Il est clair qu'il existe quelque différence entre ces deux pôles pourquoi les pôles de même nom se repousseraient et les pôles opposés s'attireraient-ils? Si nous peignons en rouge le pôle d'une aiguille aimantée c'est toujours ce pôle rouge qui indiquera la gauche quand on placera l'aiguille au-dessus d'un courant d'électrons qui s'éloignent de nous

La réponse connue seulement quand on découvre que les propriétés d'un aimant n'étaient que les conséquences des mouvements de rotation qui se trouvent à l'intérieur.

Le modèle atomique de Bohr. Comme la structure de l'atome est en gros sphérique il est commode de se le représenter comme une boule " pour certains professeurs l'atome est toujours sphérique "

Goudsmit, Daniel Lang The man in the Thick Lead Suit 1954

Modèles grossiers.

L'électron gravite autour du noyau d'un atome = charge d'électricité négative en mouvement. Champ perpendiculaire au plan de l'orbite de l'électron = moment orbital + spin il crée également un petit champ magnétique axe = axe de rotation.
Moment magnétique de spin de l'électron

Tout ceci est bien connu. De tous les atomes c'est celui du fer qui a le champ magnétique le plus intense. Il le doit à un déséquilibre important du spin de ses électrons. Chaque atome d'un barreau de fer représenté petit aimant sphérique avec ses pôles nord et sud.

Aimenter un barreau de fer revient à faire tourner ses atomes jusqu' à ce qu'il y en ait le plus grand nombre possible dont les axes magnétiques soient arallèles. Comme les moments magnétiques parallèles se composent en se renforçant le barreau acquiert un champ magnétique intense

Imaginons une rangée de soldats rangés en réseau carré sur une grande place. Chaque soldat est fermement enraciné au sol au point où il se trouve mais libre de se tourner dans toutes les directions. Une formation de 18 soldats alignés sur trois rangs fait face au nord. Derrière eux un autre groupe de 18 soldats également sur trois rangs fait face au sud

Chacun de ces groupes représente un domaine des atomes de fer
(domaine = à définir)

Imaginons que nous persuadions le domaine des sudistes de se tourner face au nord. Au lieu de tourner en bloc cependant, le rang situé le plus au nord tourne le premier, puis suivant et ce jusqu'à ce que les soldats se trouvent tous face au nord

A mesure que les rangs pivotent la "paroi" du domaine la ligne qui sépare les deux formations se déplace progressivement vers le sud jusqu'à ce que les deux domaines se combinent en un grand domaine tourné vers le nord

La question des monopoles cf. la théorie du magnétisme. Il serait aussi difficile de réaliser un aimant en disque avec un pôle nord de chaque côté que de faire tourner une roue de telle façon qu'on la voie d'un côté comme de l'autre aller dans le sens des aiguilles d'une montre. De même pour la division en deux

Les actions symétriques du champ magnétique ne comportent aucune asymétrie fondamentale. Imaginons tous les champs magnétiques de l'univers comme des cylindres tournants dont la taille varie de celle de l'électron à celle d'une galaxie, chacun portant des flèches peintes indiquant son sens de rotation

Comment se comporte un tel cylindre placé devant un miroir? Il peut être superposé à son image. Il suffit de tourner le cylindre image et ses flèches coïncideront avec celles du cylindre réel. Si l'une des extrémités du cylindre différait de l'autre ce ne serait pas possible.

Ces symétries des cylindres tournants ne les empêchent pas de se voir en contact par leurs extrémités par deux façons différentes. S'ils se rapprochent de façon que leur rotation (sens des flèches) soit de même sens il y a rencontre des deux pôles opposés. Les rotations se renforcent mutuellement et forte attraction entre elles

S'ils se rapprochent en tournant en sens inverse ce sont les deux pôles identiques qui se rencontrent. Les rotations s'opposent et il y a une forte répulsion.

D'où expérience du fil et de l'aiguille inutilisable pour communiquer à la planète X ce que nous entendons par la droite et la gauche. Barreau magnétique au-dessus d'un courant, le barreau se comportant comme un cylindre portant des flèches peintes et tournant de telle façon que que les flèches les plus proches du fil aille dans le sens du courant d'électrons

Comme les deux extrémités du cylindre sont exactement semblables elles sont images l'une de l'autre dans un miroir nous n'avons aucun moyen de communiquer 'a la planète X celle que nous avons décidé d'appeler nord. Ce qui apparaissait à Mach, Pasteur, comme un cas d'asymétrie des lois naturelles se révèle être une pseudo- asymétrie quand on considère les théories du magnétisme. Exemple des hamsters trotinant sur un tapis roulant un moteur entraîne la courroie de tapis.

Les intuitions de Mach meilleures qu'il le croyait, le champ magnétique se révèle symétrique asymétrie apparente inutilisable pour communiquer avec les extra terrestres

Philosophie : symétrie absolue qu'est-ce?

Si en 1950 on avait demandé à un physicien quelle était la solution du problème d'Ozema: réponse : il n'y en a pas. Il n'y a aucun moyen de communiquer la signification que nous donnons à droite et gauche aux êtres intelligents de la planète X sans attirer leur attention sur une structure asymétrique particulière une configuration d'étoiles ou un faisceau de lumière polarisée, p. e. qu'ils pourraient observer en même temps que nous. Il n'existe aucune expérience quelle que soit la loi de la nature sur laquelle elle serait fondée, qui puisse fournir une définition opérationnelle de la droite et de la gauche

La loi de conservation qui énonce la symétrie fondamentale de l'univers invariant par réflexion dans un miroir, le fait que la nature ne manifeste aucune préférence pour la gauche ou la droite = *la loi de conservation de la parité*

Je rappelle le choc de Mach. Le fait que quand nous faisons passer un courant électrique dans un fil orienté nord sud laiguille d'une boussole qui est parallèle cette orientation tourne immédiatement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et indique la direction ouest. On a cru au XIX^e siècle que ce phénomène dénotait une mystérieuse asymétrie de la nature.

L'extrémité nord de l'aiguille est en général peinte en noir pour la distinguer de son extrémité sud. Comment le fabricant de boussole sait-il quelle extrémité il lui faut noircir? En le comparant avec un autre aimant. Le pôle nord est celui qui est repoussé par les pôles nord des autres aimants. C'est le champ magnétique de la Terre elle-même qui sert de base ultime à la définition du pôle "nord". Le pôle nord de l'aimant est celui qui est attiré vers le pôle Nord magnétique de la Terre.

Par convention on a décidé d'appeler "Nord magnétique" le pôle sud magnétique de la Terre à cause de sa proximité avec le pôle Nord géographique. Nous n'avons aucun moyen de dire à la planète X quelle est l'extrémité de l'aiguille aimantée que nous appelons nord, car nous n'avons aucun moyen de lui dire quelle est l'extrémité de l'axe de rotation de la Terre qui porte ce nom! [MG]

Il reste à savoir si nous avons bien eu une chute de la parité en 1957, expériences dans les interactions faibles Cheng Ning Yang et Tsung Lao Lee. cf. La question de la conservation de la parité dans les interactions faibles.

"pour décider sans équivoque si la parité se conserve dans les interactions faibles, il faut tenter une expérience qui permettra de savoir si les interactions faibles font une différence entre la droite et la gauche. Nous étudierons quelques-unes des expériences possibles". *Physical Review* octobre 1956.

Le chapitre 22 de MG raconte de façon détaillée l'histoire de cette expérience qui a réalisé la chute de la parité. Un monde presque parfait. De Galilée à Kepler.
Chesterton *Orthodoxie*

Feynman *Cours de Physique* chapitre 52 Inter Editions 1979

Pourquoi la nature est-elle si proche d'une symétrie totale? Personne n'a idée du pourquoi. La seule chose que nous pouvons suggérer est quelque chose qui ressemble à ceci : il existe une porte au Japon, une porte à Neiko qui est quelquefois appelée par les Japonais la plus belle porte de tout le Japon; elle fut construite à un moment où l'art chinois avait une grande influence

Cette porte est très compliquée, avec beaucoup de gâbles, de belles sculptures, beaucoup de colonnes, de têtes de dragons et de princes sculptés dans les piliers, etc. Mais lorsqu'on regarde de plus près, on voit que dans le dessin complexe élaboré sur un des piliers, un des petits éléments du dessin est sculpté l'envers; part ceci la chose est complètement symétrique. Si on demande le pourquoi l'histoire tes que ce fut sculpté l'envers, de telle sorte que les dieux ne soient pas jaloux de la perfection de l'homme. Nous aimerions renverser l'idée et penser peut-être que la véritable explication de la quasi-symétrie de la nature est celle-ci: Dieu a rendu les lois seulement presque symétrique, de telle sorte que nous ne soyons pas jaloux de Sa perfection