

# Les Temps de la Physique

## Introduction,

- les temps de la physique opère :
    - le temps de la physique fondamentale : celui du monde des particules élémentaires ; celui de l'Univers ( dualité entre l'infiniment petit et l'infiniment grand). Beaucoup diront qu'à cette échelle, le temps n'existe pas ... même ni la durée peut avoir un sens.
    - le temps de la physique macroscopique : celui du monde à notre échelle, le monde du vivant qui subit la loi du temps qui passe. A cette échelle, on ne peut pas dire que le temps existe et qu'il a une direction, une flèche. Dans ce monde, le mouvement perpétuel n'existe pas et aucun objet à l'usage du temps ...
  - Cette ambiguïté de la nature du temps pose de fait des questions fondamentales :
    - la physique a-t-elle besoin du temps pour se formuler ? Quel est ce temps macroscopique ?
    - comment émerge la flèche du temps ? Quelle est sa nature ? Surtout n'est-ce pas la physique macroscopique est le résultat des interactions fondamentales.
  - On n'apportera pas de réponse précise, seulement des éléments de réponse ... en attendant, on l'espère, des interrogations qui vous amèneront à aller plus loin ...
- Ring: quand le temps existe, il vient par définition avec sa flèche.

② . Ce sont sûrement les échelles du temps, leur diversité, qui illustrent le plus vivement la richesse et le mystère de cette notion :

- âge de l'univers : 13,7 milliards d'années d'après WMAP
- Résumé en une seule année de la durée de l'univers :

de janvier  
à  
novembre

- Big bang : 01/01
- 02/01 : premières galaxies
- 01/04 : voie lactée
- 13/09 : système solaire (→ Terre : 5<sup>e</sup> années)
- 20/09 : cellules de vie
- 09/10 : bactéries
- 15/10 : premiers fossiles
- 01/11 : micro-organismes vivants
- 12/11 : début de la photosynthèse

décembre

- 03 : atmosphère O<sub>2</sub> / N<sub>2</sub>
- 19 : poisons
- 21 : premiers animaux quittent les océans
- 23 : arbres
- 24 : dinosaures
- 26 : mammifères
- 27 : oiseaux
- 28 : morts des dinosaures / premiers fleurs / les continents se séparent
- 31 : premiers humains (→ Homo habilis : 5 M d'années)  
Homo sapiens : 0,5 M d'années)

31 décembre

- 14h : le 1<sup>er</sup> homme descend des arbres
- 21h30 : premiers humains
- 23h00 : âge de pierre
- 23h46 : contrôle du feu
- 23h50 : art / premiers navigateurs
- 23h59'50" : pyramides d'Egypte
- 51" : alphabet
- 55" : Bouddha
- 56" : Christ
- 59" : déclaration d'indépendance des USA → la lune

I. De la physique fondamentale à celle des systèmes complexes

On ne peut comprendre les différents visages du temps sans comprendre les différents visages de la physique.

Dans l'idée de comprendre le temps, il est naturel de distinguer la physique fondamentale de la physique des systèmes complexes (par complexe, on entend un grand nombre de dd)

Malgré l'idée qu'il existerait une théorie unifiée à partir de laquelle tout serait déduit, ces 2 physiques ne se parlent que très peu et leurs relations restent à bien des égards mystérieuses. La notion de temps qui émerge dans ces contextes est une part du mystère ...

~~de la physique des particules et de~~

a) la physique du monde infiniment petit

Il s'agit du monde des particules élémentaires dont la taille est de l'ordre de grandeur de l'Å:  $10^{-10}$  m.

Ce monde est régi avant tout par les lois de la mécanique quantique.

(i) la mécanique quantique

Encore plus que la relativité générale, la mécanique quantique a suscité et suscite encore des débats et polémiques dans un interprétatif et se rapporte à décrire le monde élémentaire.

→ Elle s'appuie sur des lois fortement intuitives dont certains illustrations célèbres sont :

- (1) • les relations d'incertitude d'Heisenberg : une particule est partout à la fois, l'effet tunnel;
- (2) • la dualité onde / particule : les objets quantiques sont à la fois des ondes et des particules;

- (4) (3). le principe de superposition : le chat de Schrödinger est à la fois mort et vivant ;
- (4). la mesure : l'influence de la mesure et de l'observateur dans un processus physique. Cette notion va être d'extrême importance dans l'interprétation du temps en mécanique quantique.
- (5). la nature probabiliste d'un état quantique : la fonction d'onde  
 → L'histoire de la mécanique quantique a été relativement longue à se mettre en place et cette théorie est le fruit de surement les plus grands génies de l'histoire de la physique.

- Max Planck (1858-1947) : physicien Allemand qui introduit la notion de quanta ainsi que la constante de Planck  $h$  en 1899.
- Erwin Schrödinger (1887-1961) : physicien Autrichien qui découvre l'équation de la fonction d'onde en mécanique quantique.
- Paul Dirac (1902-1984) : physicien Britannique qui prédit en particulier l'existence de l'antimatière.
- Werner Heisenberg (1901-1976) : physicien Allemand qui établit en particulier les relations d'incertitude.
- Albert Einstein (1879-1955) : physicien Américain - Allemand - Suisse qui n'a jamais eu à la mécanique et qui a écrit l'un des articles (EPR) qui a soulevé un des problèmes les plus importants de la mécanique quantique.
- Louis de Broglie (1892-1987) : physicien français qui a établi la dualité onde / particule.

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ SI}$  : gouverne la loi de la physique quantique

↳ la longueur d'onde de Compton :

$\lambda_c = \frac{h}{mc}$  est la limite entre les mondes classique et quantique. →  $e^-$  ;  $\lambda_e = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

⑤ (ii) la relativité restreinte

Cette théorie a réellement brisé la conception fondamentale du temps. Elle est également fondamentale dans la compréhension des particules élémentaires.

→ Cette théorie est née de la volonté d'unifier la mécanique de Newton (subéquivalente au relativisme) et la théorie de l'électromagnétisme (lumière et autres ondes du même électromagnétisme).

→ Malgré la controverse sur la contribution de Poincaré à cette théorie, c'est vraiment Einstein qui en 1905 établit la théorie de la relativité restreinte et comprend les conséquences physiques immenses de son approche. Le génie d'Einstein a été d'aller à contre courant de la pensée de ses contemporains: il fallait modifier la mécanique et non pas l'électromagnétisme.

→ La règle fondamentale de la relativité est que la vitesse de la lumière dans le vide est constante pour tous les observateurs. Aujourd'hui, cette constante est fixée à la valeur:

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  → gouverne le monde de la relativité

Les conséquences de ce principe de base sur notre conception de l'espace et du temps sont bouleversantes:

- Plus une particule va vite, plus elle est ralentie
- le temps s'écoule moins vite pour les observateurs en mouvement;
- l'espace est perçu différemment et se contracte pour les observateurs en mouvement.

Une conséquence importante est que aucune particule ne peut aller plus vite que la lumière.

La relativité restreinte est essentielle pour la compréhension du monde infiniment petit car les particules élémentaires sont relativistes: leur vitesse est proche de  $c$ .

⑥ (iii) la mécanique quantique relativiste ou la théorie quantique des champs

C'est le cadre de la physique des particules élémentaires dont la théorie est celle dite du modèle standard.

la causalité est centrale de l'établissement des particules monde microscopique

Toute la beauté de cette théorie est qu'elle s'appuie sur des notions mathématiques et a prévu l'existence théorique d'un grand nombre de particules. Aujourd'hui, le modèle standard propose que le monde microscopique est régi par :

- des particules élémentaires : 6 quarks (u, d) (t, b) (c, s) et 6 leptons dont fait partie l'électron ;
- des interactions fondamentales : l'interaction électromagnétique ; les interactions faibles et fortes responsables en particulier de certains types de radioactivité et aussi de la cohésion du noyau.
- la théorie prévoit également l'existence d'une particule supplémentaire, le boson de Higgs (du nom d'un physicien britannique (1929)) dont l'existence doit être démontrée (invalider ?) dans le prochain accélérateur de particules. Cette particule est essentielle pour comprendre la masse des autres particules.

De nombreux succès de cette théorie ont été établis dans le but d'introduire la gravitation dans le schéma et ainsi de combiner une théorie unifiée de la physique.

Il est troublant de noter que seuls 3 de ces particules élémentaires suffisent pour composer toute la matière présente sur Terre. Par ailleurs, c'est véritablement l'interaction électromagnétique qui régit le monde du vivant et une grande partie du monde microscopique, même inerte (cohésion, élasticité etc...).

## (7) b/ la physique du monde infiniment grand

Les grandes structures de l'univers sont régies par l'interaction gravitationnelle qui domine toutes les autres interactions :

- les corps célestes sont globalement neutres et ne sont donc pas le siège d'interaction électromagnétique;
- comme leur nom l'indique, les interactions fortes et faibles sont à courte portée et ne peuvent en aucun cas influencer la trajectoire d'autres. Leur portée n'est que de  $10^{-15}$  m (1 fm).

Cette interaction est très différente des interactions de l'infiniment petit car elle est intimement liée à l'espace-temps qui devient grâce à Einstein une entité dynamique qui influence et est influencé par la matière et l'énergie présentes dans l'espace-temps.

- Isaac Newton (1643-1727) est un scientifique britannique qui comprend en particulier la loi universelle de la gravitation et introduit la constante de Newton :

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

Les travaux de Newton ont permis un bon décollage en astronomie et en physique en général. On peut mentionner pour anecdote l'expérience de Cavendish.

- Albert Einstein introduit la relativité générale dans le but d'incorporer la gravitation dans sa théorie de la relativité restreinte. Dans cette théorie, l'espace-temps devient une entité dynamique et élastique qui s'étire tellement à nos yeux que personne ne s'y intéresse véritablement. Ce n'est qu'après la mort d'Einstein via la découverte du CM 13 que l'étude de la relativité générale se met

⑤ à préciser :

→ 1919 : premières confirmations <sup>supernovales</sup> théoriques de la relativité générale (monées par Sir Arthur Eddington)

→ 1916 : Schwarzschild découvre le trou noir

→ prédiction du big-bang et observations par Penzias et Wilson (1961) : le monde est en expansion accélérée.

→ Découverte des trous noirs (en 1995) etc...

### c) Le monde à notre échelle

De manière a priori surprenante, le monde à notre échelle est à bien des égards bien plus complexe à étudier que les mondes infiniment petit et infiniment grand.

La clef de ce paradoxe réside dans le fait que le monde à notre échelle est bien plus complexe dans le sens où il contient un nombre considérable de degrés de liberté :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

Hypothèse  
atomiste

• Il est impossible de déduire les lois du monde macroscopique à partir de la connaissance des lois régissant ses constituants élémentaires.

• Il est nécessaire de développer une approche phénoménologique et/ou une approche statistique où la connaissance des systèmes se cache derrière des grandeurs moyennes ou des probabilités. Cette connaissance et cette moyennisation de l'information vont avoir des conséquences fondamentales dans notre conception du temps macroscopique.

Encore aujourd'hui, derrière ce processus mathématique se cache le problème de la flèche du temps.

⑦ → C'est le physicien Ludwig Boltzmann (1844-1906) qui est le père de la physique statistique. Boltzmann voté en l'hypothèse de "Démocratie": "la matière peut être considérée comme un ensemble d'entités individuelles"...

Ainsi aujourd'hui le monde macroscopique est régi par un ensemble de théories, de modèles dont le lien avec les constituants élémentaires n'est pas clair. Les théories ne sont dans ce sens pas fondamentales et ne sont valables qu'à une certaine échelle, que dans un certain cadre.

C'est parce que les systèmes sont microscopiques!

D'une importance capitale est la remarque que ces phénomènes sont régis par des équations microscopiques la loi du temps, ils se dissipent et donc vieillissent à la différence de la physique microscopique.

Parmi toutes ces théories on étudiera tout particulièrement la thermodynamique qui est le cadre dans lequel la question du temps macroscopique se pose en des termes plutôt précis.

Dans ces théories, plutôt que de considérer  $N_A$ , on introduit la constante de Boltzmann  $k_B$ :

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Elle est intrinsèquement liée à la température et l'approche probabiliste pour observer le monde macroscopique.

- 1<sup>o</sup> principe de la Ad
  - 2<sup>nd</sup> principe de la Ad
- Le 2<sup>o</sup> principe sera le principe de la complexité.
- traiter le cas de la Ad d'un gaz:

- Pression :  $\langle \text{interaction} \rangle$
  - Température :  $\langle \text{agitation} \rangle$
- C'est ce qu'on connaît en moyenne.

## 10) d. / Mesure la physique

Se pose la question du temps en physique soulève elle de sa mesure et plus généralement celle de la mesure de tous les phénomènes physiques :

### (i) les unités de la physique

Toutes les grandeurs physiques de l'univers s'expriment en terme de 5 unités seulement :

- le temps : la seconde
- l'espace : le mètre
- la masse : le kg
- l'intensité du courant : 1A
- la température : K

### (ii) l'interprétation de ces grandeurs

- espace / temps : le monde de lequel on vit
- la masse et la charge : responsable des interactions fondamentales. Elles permettent de quantifier ces interactions

• la température est pour nous la + importante : c'est la seule unité qui n'est pas fondamentale et contient quelque part la mesure humaine ou le marque d'information du monde macroscopique. La température n'est pas une véritable unité.

Selon certains physiciens, la température est la mesure de la vitesse du temps : c'est l'hypothèse du temps thermodynamique.

### (iii) la mesure des grandeurs physiques

Il faut trouver des processus stables dans le temps et de l'espace, reproductible avec une précision en quasi-infinie. On doit alors définir des étalons de mesure.

(11) Un étalon de mesure et une grandeur de référence qui sert à définir ou à matérialiser l'unité de mesure. Celui-ci doit être précis, exact, reproductible et universel.

Parmi toutes les unités fondamentales, seul le kilogramme est représenté matériellement par un étalon unique. Le prototype réalisé en 1889 et conservé au Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres est un cylindre de 39 mm de  $\phi$  et de hauteur en platine iridié à 10%.

→ Etalon de mesure du temps ;

la seconde est définie par la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins  $F=3$  et  $F=4$  de l'état fondamental  $^6S_{1/2}$  de l'atome de Césium 133.

→ C'est le temps atomique international obtenu principalement à partir d'horloges atomiques. On dispose aujourd'hui d'une exactitude allant jusqu'à la 14<sup>ème</sup> décimale.

## (12) II. Le temps de la physique fondamentale

- le temps, un objet, qui jusqu'à Newton a plus été au centre du discours philosophique que du discours physique;
- C'est en partie avec Newton que le temps acquiert son sens mathématique et commence donc à avoir une interprétation physique.
- Einstein va définitivement briser l'usage ramant du temps à la Newton...

### a/ Les visages du temps jusqu'à Newton

(1) Zénon (-335/-262) : le temps n'existe pas

(2) Aristote ( ) : le temps est une mesure du mouvement ; il est lié au changement

(3) ~~Paracelsus~~

(4) Galilée va poser la pierre la plus précieuse pour définir le temps physique : il introduit le concept de relativité, en plus de toutes les grandes découvertes qu'il fera (lenteur de Galilée et relation d'équivalence). Il montre que le temps s'écoule exactement de la même façon pour une certaine classe d'observateur ; les lois de la physique sont inchangées pour un homme au fond de sa cave ou un bâtiment en mouvement ou pour un homme resté à quai... C'est lors d'une expérience sur les 2 individus. Par exemple, la trajectoire d'une balle pour les 2 individus.

(5) Newton a donné au temps les attributs de Dieu : il est absolu en ce sens qu'il existe indépendamment de la matière et du mouvement.

"Le temps (est) absolu, vrai, mathématique, sans relation au rien avec l'extérieur..." Il s'écoule de la même façon à toutes les échelles, pour tous les observateurs → Base de la mécanique classique qui

(13)

accompagnera dans son développement les révolutions industrielles et qui aura donc un impact politique, économique et social considérable !

b/ Le temps de la mécanique classique

± Le point de vue de ses fondateurs apparaît de manière formalisée dans le principe fondamental de la mécanique :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \Rightarrow \boxed{m \frac{d^2x}{dt^2} = F}$$

- c'est la loi la plus simple qui permet de rendre compte du lien entre le mouvement et l'action ;
- si la force  $F$  est constante dans le temps, cette équation est invariante sous les transformations de Galilée. En particulier, elle ne dépend pas du choix d'une origine du temps. Par ailleurs, elle n'a pas de flèche du temps.

↳ si la solution  $x(t)$  est possible alors la solution  $x(-t)$  est également possible  
ceci est le critère d'irréversibilité de Prigogine.

- la solution ne dépend que des conditions initiales et tout système classique est fondamentalement déterminé  $\Rightarrow$  c'est le déterminisme classique. Le déterminisme est au fond relié à la réversibilité des équations du mouvement : c'est parce que je suis capable de connaître  $x(t)$  pour  $t > 0$  ou  $t < 0$  que la physique est déterministe.

Ex de ~~l'optique~~ Laplace

- Le point de vue a des limites profondes : théorie du chaos (Poincaré avec le pb à 3 corps) le système n'est pas prédictif qui n'a pu connaître parfaitement les conditions initiales...

(14) (iii) La mécanique classique et l'irréversibilité

DM la mécanique classique a modelé 3 siècles pour elle reflétait avec une précision extraordinaire la physique de tous les jours qui était à cette époque la physique à notre échelle.

Or notre monde est sujet à une flèche du temps. Cette flèche se rencontre dans l'expression de la force  $F(t)$  !

- ↳ ces expressions sont phénoménologiques
- ↳ le lien avec la physique fondamentale n'est pas clair.

Au fond, on ne comprend pas la nature du temps car on cherche la fonction  $F(t)$  adaptée aux différentes situations : on ne voit pas l'émergence du temps, on le met à la main de ses équations.

- Sans ces termes de dissipation, le temps n'existe pas : la durée, la période a un sens mais pas le temps;
  - le terme de dissipation permet de distinguer le passé du présent et permet de compter le temps qui s'est écoulé ...
- C'est dans ce sens que le temps de la physique fondamentale n'existe pas !

Exemple 1: de manière formelle :

- $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$  : réversible  $t \rightarrow -t$   
↳ contient une durée mais pas un temps :  $\omega_0$  introduit une échelle de temps
- $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\gamma}{\tau} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$  : irréversible  
↳ le terme de dissipation introduit une flèche du temps.

(15)

Exemple 2 : les phénomènes ondulatoires vs les phénomènes  
classiques.  $s(x, t)$  : phénomènes spatiaux / temporel

• équation des ondes :  $\frac{\partial^2 s}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = 0$

• équation de la chaleur  $\frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = 0$

Une onde n'introduit pas de flèche de temps mais  
la diffusion de la chaleur le fait.

La grande question que va résoudre Boltzmann est  
de savoir comment le monde microscopique régit  
par des équations réversibles (ce invariant par  
renversement du temps) peut donner naissance à des  
phénomènes irréversibles à notre échelle. La réponse est  
contenue dans la complexité du monde macroscopique.

e) le temps de la ~~relativité~~ mécanique quantique

La mécanique quantique est mystérieuse à bien  
des égards mais ne change rien sur notre conception  
du temps.

En effet :

• mécanique quantique est une théorie bien plus  
fondamentale que la mécanique classique et  
le cas où elle contient cette dernière ;

• Mais on ne sait pas construire la mécanique  
quantique sans la mécanique classique. Il  
existe des principes de correspondance qui permettent  
de passer du monde classique au monde quantique  
mais la nature des objets changeant, il y a des  
corrections importantes mais peu ce qui est du  
temps, la mécanique quantique prend tout  
simplement celui de la mécanique classique :

- Principe de correspondance ;  
 Monde classique → Monde quantique  
 position / instant ↔ opérateurs agissant sur des états  
 le temps ↔ le temps : paramètre absolu
- Principe d'évolution régit par l'équation de Schrödinger !

$$i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x) \psi(x)$$

$\psi(x)$  est la fonction d'onde.

La présence du terme complexe change radicalement l'analyse précédente sur la nature réversible ou non de cette équation.

- le principe d'équivalence s'étend au cas où on veut faire une théorie quantique relativiste.

d/ Le temps de la relativité

C'est le grand bouleversement né en 1905 par Einstein.

(i) Principes de la relativité restreinte

- la vitesse de la lumière dans le vide est constante,  $\forall$  le référentiel ;
- l'univers est homogène et isotrope : les lois de la physique sont les mêmes quelque soit la position ds l'espace ou la dir ecteur ds laquelle je regarde.

⇒ continuation des lois de la relativité restreinte sur l'espace et le temps se mêlant.

Lois de Lorentz

$$O(x, t) \xrightarrow{v} O(x', t')$$

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \end{cases} \text{ où } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Le temps n'écoule différent selon les observateurs, il n'est plus absolu, il dépend physiquement de l'indici du et du mouvement de l'indici du.

(ii) Conséquences importantes : on parle d'espace-temps (non euclidien).

- Caractère relatif de la dilatation du temps et contraction des longueurs : O voit le temps de O' ralentir et vice versa.
- Principe de causalité et causalité : liés au fait que rien ne va plus vite que c.
- La simultanéité n'existe plus : pas possible de synchroniser les horloges.

→ ~~le n'est pas possible~~  
 La paradoxe des jumeaux de Langevin : illustration du ralentissement du temps et solution le paradoxe de la brisure de symétrie.

Expériences :

- Voyage avec des horloges atomiques dans des sous-marins
- Temps de vie des particules augmenté dans les accélérateurs.

(iii) l'espace-temps de la relativité générale

Le trouble induit dans notre conception de l'espace-temps dans cette approche théorique est encore plus profond. De manière simple, ni le temps ni l'espace n'existe ; ils sont complètement mélangés et retrouvent un semblant de sens dans la limite de faibles champs gravitationnels.

→ Si en relativité restreinte, les différents temps des différents observateurs sont liés par des formules simples, en relativité générale le temps peut être n'importe quelle fonction a priori. Le principe de causalité n'est pas violé.

→ L'espace-temps en relativité devient une entité dynamique qui évolue et fluctue au même titre que les champs de matière et d'énergie qui s'y développent. Le temps n'est non seulement plus absolu mais en plus il se traite au même titre que la matière.

→ L'espace-temps n'existe plus en tant que tel : il devient un fait relationnel : il n'existe qu'à travers les relations spatiales / temporelles entre les systèmes matériels.

- Argument du trou d'existence
- Notion d'observable en physique

→ Exemple du temps aux abords d'un trou noir :

} métrique de Schwarzschild  
 { singularité d'espace-temps où le temps semble

n'arrêter.

→ Au delà : le temps de Planck

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$