

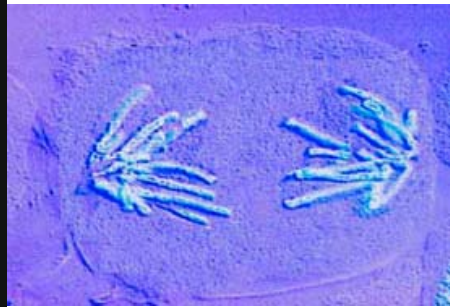
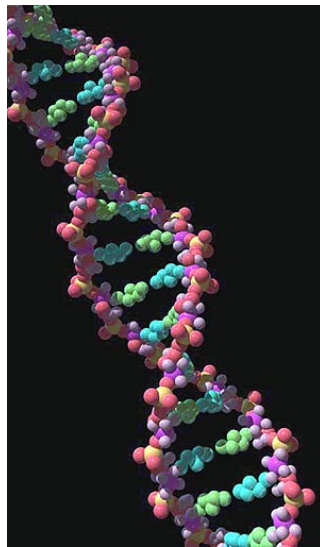
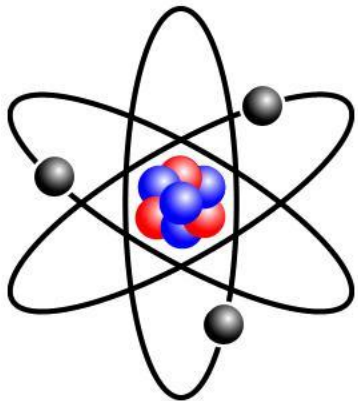
Emergence en physique

Jean-Philippe UZAN



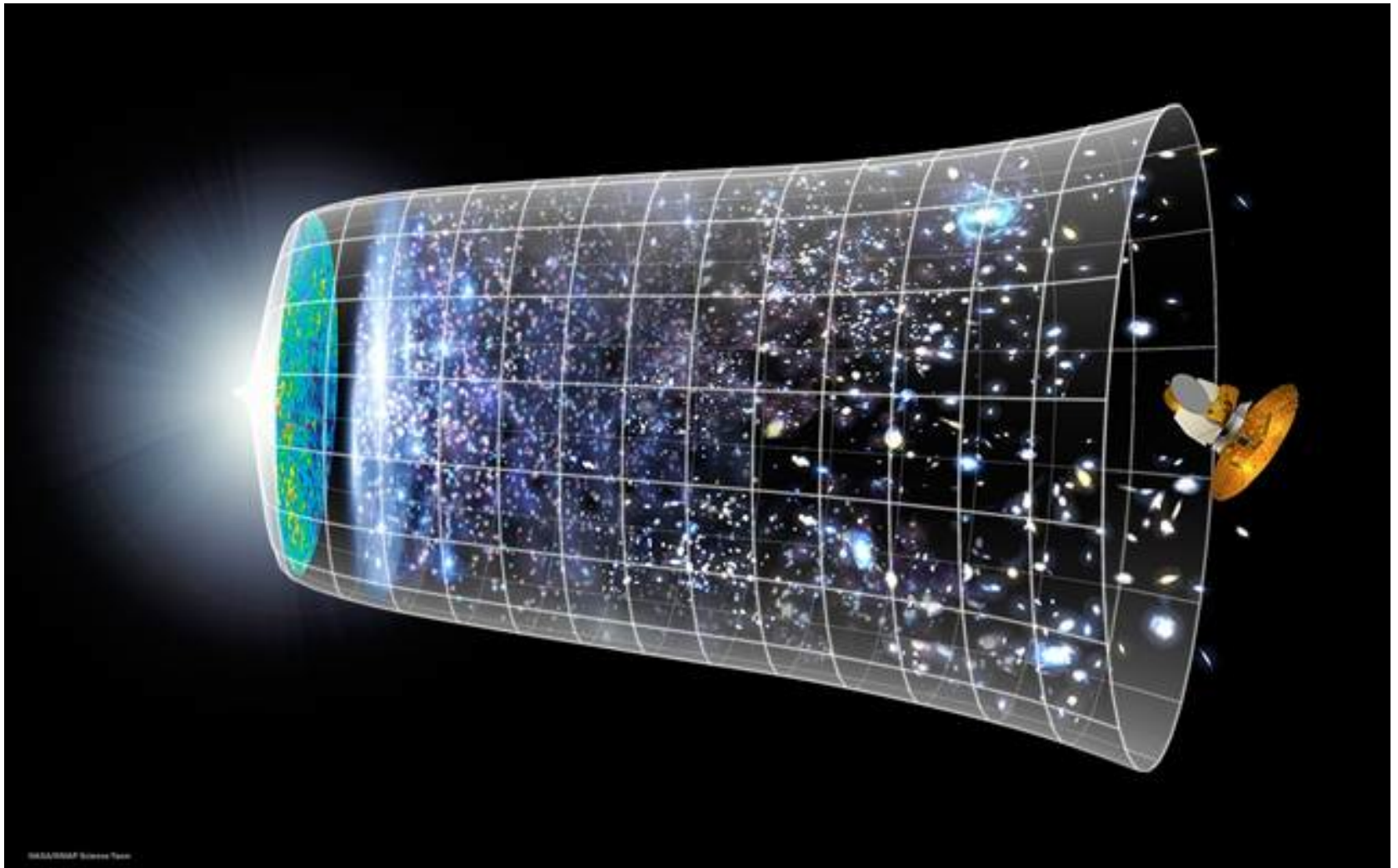


Nous observons un univers structuré à toutes les échelles.



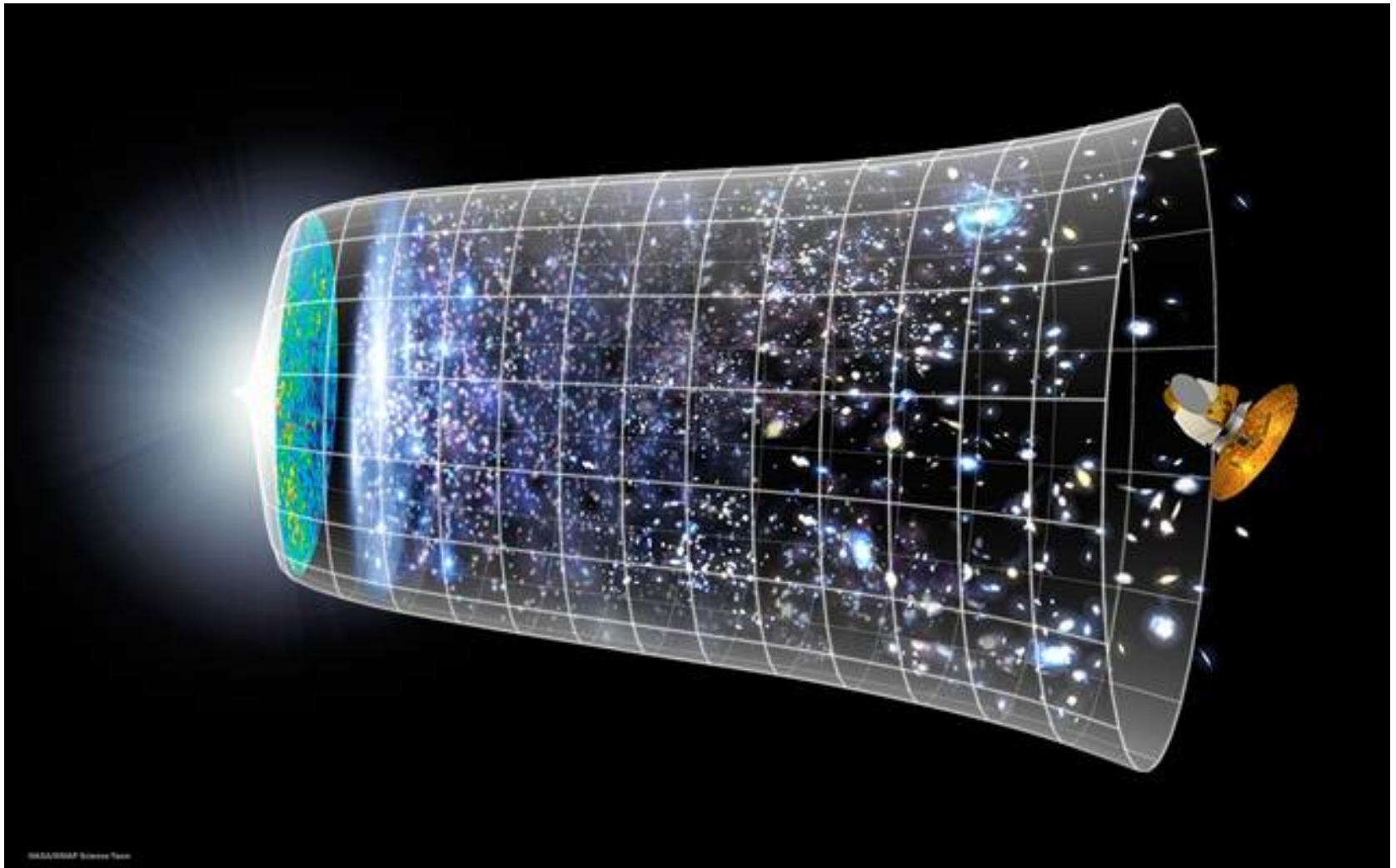
L'espace est en expansion et a une histoire

Modèle du *big bang*



L'observation de l'univers et sa représentation mathématique nous enseigne qu'il était initialement:

- *chaud*
- *homogène*
- *sans structure*



- Pourquoi les lois fondamentales de la nature permettent-elles l'émergence des structures complexes ?
- Comment ses structures sont-elles apparues au cours de l'histoire de l'univers ?

Pourquoi les lois fondamentales de la nature permettent-elles l'émergence des structures complexes ?

*La hiérarchie des théories physiques
&
la causalité*

Cosmologie

Sociologie/Economie/Politique

Astronomie

Psychologie

Science spatiale

Botanique/zoologie/physiologie

Géologie

Biologie cellulaire

Sciences des matériaux

Biochimie

Chimie physique

Chimie organique

Chimie

Physique atomique

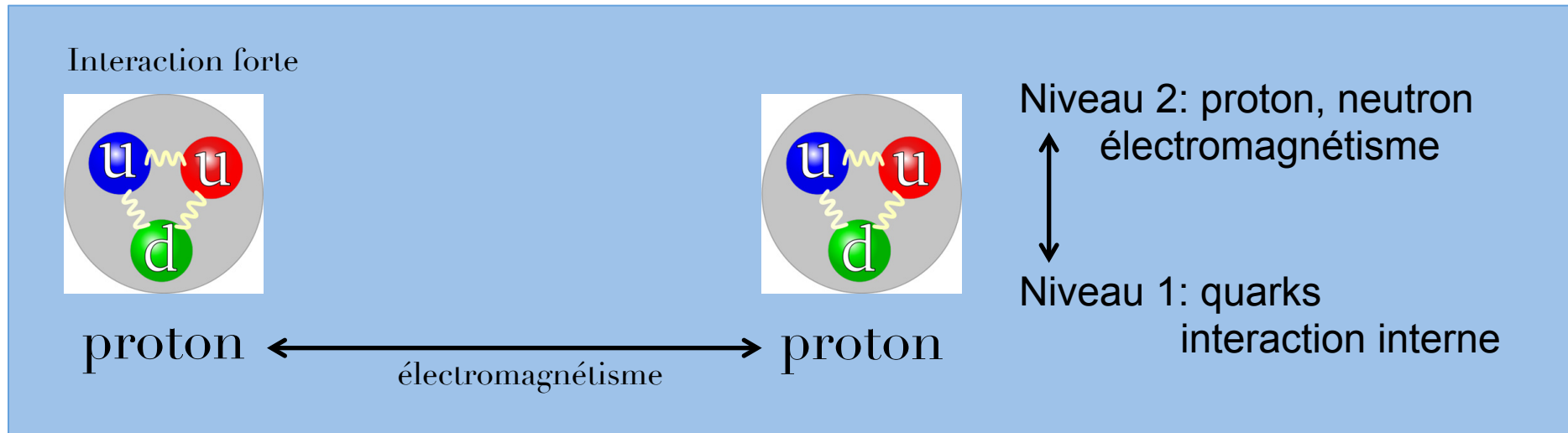
Physique nucléaire

Physique des particules

Physique fondamentale

Chaque niveau est constitué de modules en interaction.

- La dynamique interne de chaque module est à « haute » énergie et le module est fortement lié;
- l'interaction entre modules est à plus « basse » énergie.



Chaque niveau est caractérisé par une échelle d'énergie

Théorie effective: donne une bonne description des phénomènes dans un domaine donnée.

Domaine de validité.

- Chaque niveau a sa propre *ontologie*, ses propres concepts
 - Physique fondamentale: *quarks, gluons,....*
 - Physique nucléaire: *protons, neutrons,....*
 - Chimie: *molécules, liaisons,...*
 - Biologie: *cellule,...*
- On observe une *séparation d'échelle* et un *découplage* entre les différents niveaux:
 - La description de l'interaction électromagnétique entre un proton et un électron ne dépend pas du fait que l'on sache que le proton est constitué de quarks.
 - Les disciplines se sont développées de façon autonome et indépendante en forgeant leurs propres concepts.
 - Chaque discipline a des questions limites concernant l'origine de ses concepts
 - La nature ne serait probablement pas compréhensible sans cette propriété.

- La physique sous-tend toutes les disciplines.
Ceci est à la base d'une vision réductionniste du monde

« La chimie n'est qu'un exercice de mécanique quantique » (P. Dirac)

Le réductionnisme « explique » les propriétés d'un système à partir de ceux de ses composants.

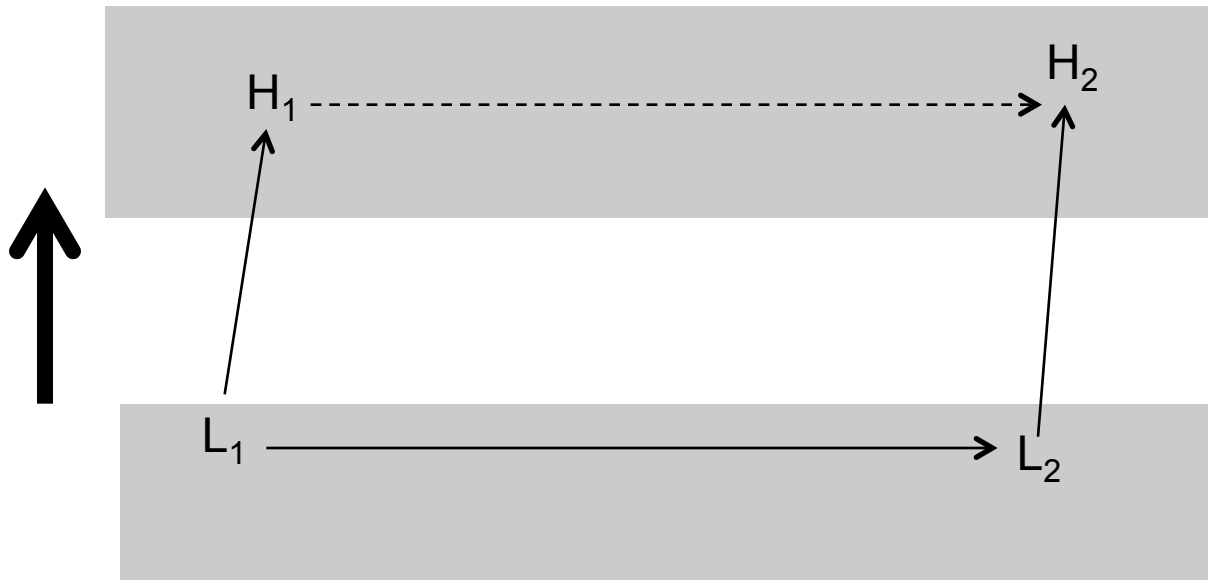
- Les concepts d'un niveau supérieur sont
en principe dérivables de ceux d'un niveau inférieur
en pratique, difficile voir impossible

Masse du proton = masse des constituants (quarks) + énergie de liaison (dépend de la structure de la QCD)

- Un niveau inférieur n'influence un niveau supérieur que par quelques nombres (constantes)

Dans cette vision la causalité est « **bottom-up** »

Ce qui se passe à un niveau supérieur dérive de l'action causale dans un niveau inférieur.



Exemple: l'homogénéisation des vitesses des particules aura pour effet d'homogénéiser la température

L'interaction entre niveau est en fait plus riche.

Il existe des concepts émergents

ces concepts ne peuvent pas être dérivés à partir de concepts d'un niveau inférieur.

exemple: l'information

L'interaction entre niveau est en fait plus riche.

Il existe des concepts émergents

ces concepts ne peuvent pas être dérivés à partir de concepts d'un niveau inférieur.

exemple: l'information

Différents états peuvent correspondre au même état d'un niveau supérieur.

Il y a ainsi des classes d'équivalence

Conséquences:

- *Entropie* (qui mesure la perte d'information lors de la description macroscopique)
- *Dissipation* (les degrés de liberté de la théorie microscopique peuvent être excités)

Parenthèse

La compréhension récente de la gravitation et de la thermodynamique nous incite à associer à chaque **trou noir**:

- *Une température* (associé à un phénomène quantique de rayonnement, dit de Hawking)

- *Une entropie* (un trou noir n'est caractérisé que par 3 nombres: masse/charge/moment angulaire – problème de l'information)

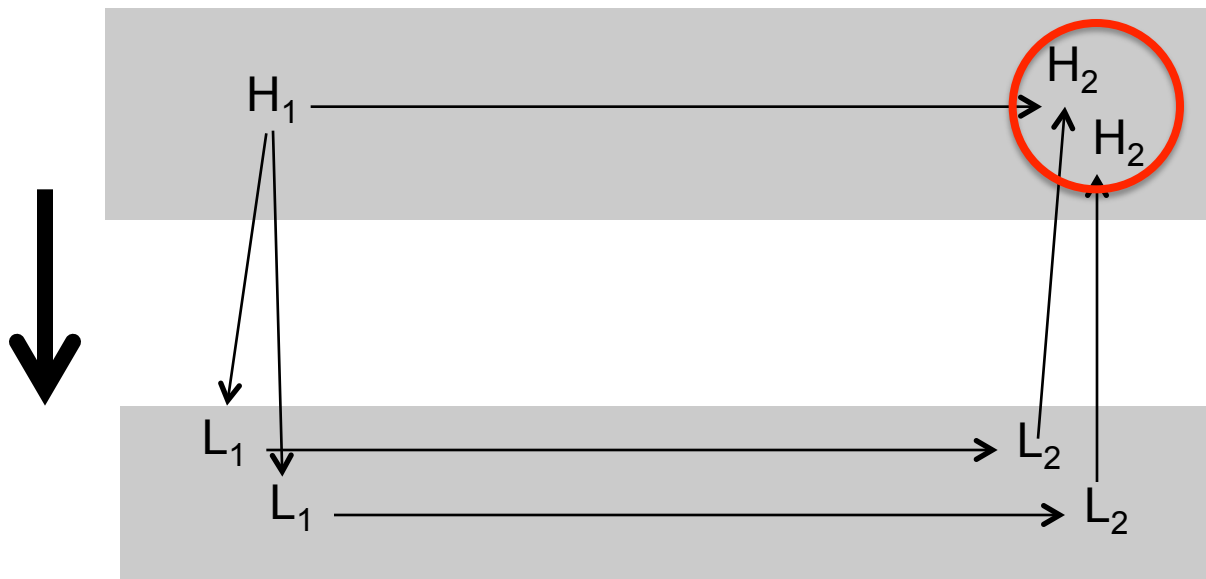
Cela laisse penser que la gravitation ne serait pas une force fondamentale mais un phénomène émergent.

C'est une voie de recherche actuelle (modèles entropiques) qui pourrait permettre de réconcilier gravitation et mécanique quantique.

Les niveaux supérieurs peuvent aussi avoir une influence causale sur les niveaux inférieurs: « **top-down** »

Le changement des conditions dans un niveau supérieur agit sur la séquence des processus dans les niveaux inférieurs.

Il intervient par le changement de contexte imposé par le niveau supérieur. Dans la réalité, *aucun système n'est isolé*.



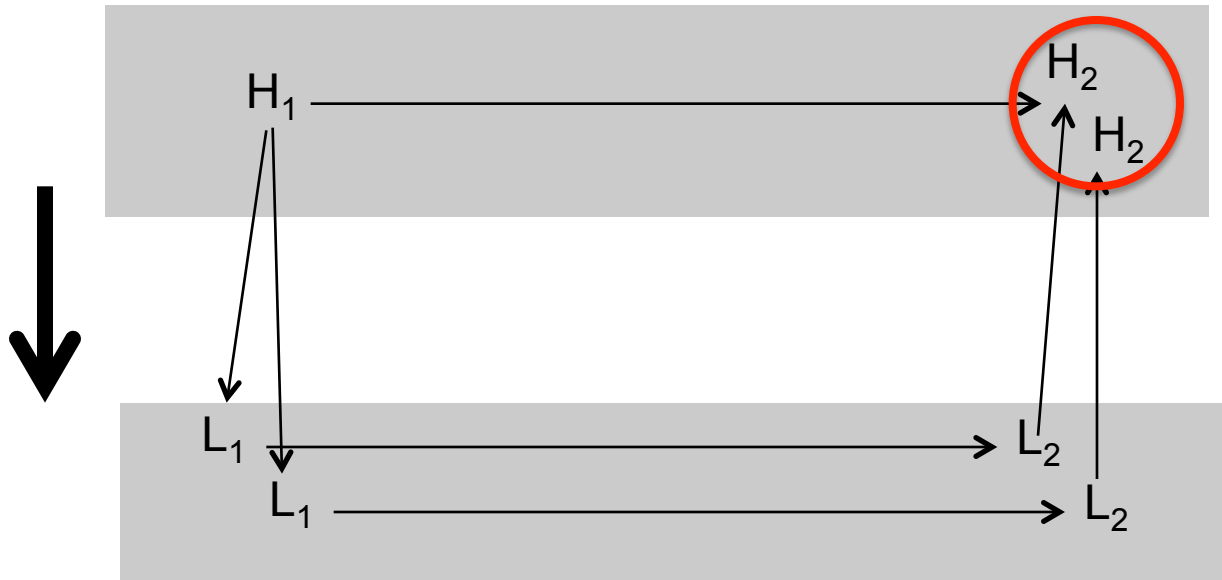
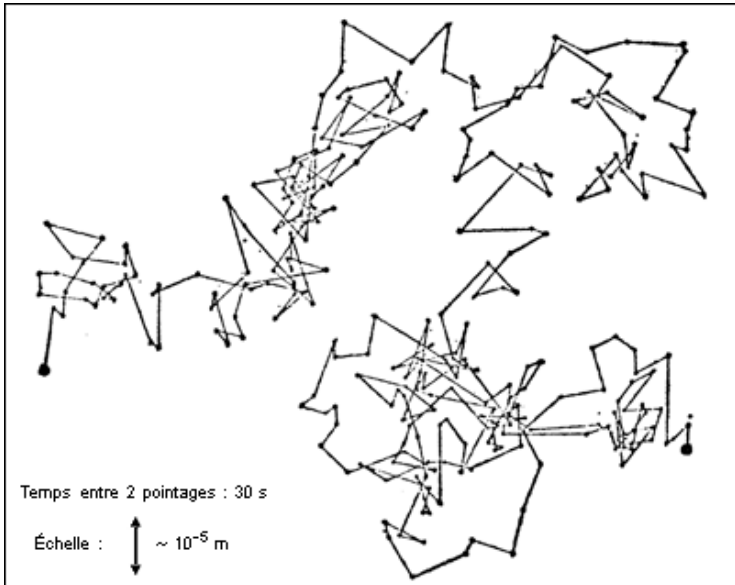


Diagram illustrating the ideal gas law. A thermometer is labeled "température" and a pressure gauge is labeled "pression". A cylinder with a piston is labeled "volume". The equation of state is given as $PV = nRT$, where P is "pression (Pa)", V is "volume (m^3)", n is "nombre de moles", and T is "température absolue (K)". The gas constant is $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$, labeled "constante des gaz parfaits".

At the bottom, there are three icons: a downward arrow labeled "PRESSION", a downward arrow labeled "TEMPÉRATURE", and a square icon labeled "VOLUME".



Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Nucléosynthèse en cosmologie: le taux de réactions nucléaires est déterminé par la densité moyenne de l'univers et de l'expansion cosmique.

Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Nucléosynthèse en cosmologie: le taux de réactions nucléaires est déterminé par la densité moyenne de l'univers et de l'expansion cosmique.

Mesure en mécanique quantique: L'expérimentateur choisit les détails de l'appareil de mesure, ce qui résulte dans la sélection des micro-états qui résultent de la mesure.

Expérience quantique. On manipule des objets quantiques à partir d'appareils classiques (tension, champ magnétique etc...)

Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Nucléosynthèse en cosmologie: le taux de réactions nucléaires est déterminé par la densité moyenne de l'univers et de l'expansion cosmique.

Mesure en mécanique quantique: L'expérimentateur choisit les détails de l'appareil de mesure, ce qui résulte dans la sélection des micro-états qui résultent de la mesure.

Expérience quantique. On manipule des objets quantiques à partir d'appareils classiques (tension, champ magnétique etc...)

Evolution stellaire: En principe, on peut modifier la durée de vie d'une étoile en agissant sur la distribution de la matière.

Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Nucléosynthèse en cosmologie: le taux de réactions nucléaires est déterminé par la densité moyenne de l'univers et de l'expansion cosmique.

Mesure en mécanique quantique: L'expérimentateur choisit les détails de l'appareil de mesure, ce qui résulte dans la sélection des micro-états qui résultent de la mesure.

Expérience quantique. On manipule des objets quantiques à partir d'appareils classiques (tension, champ magnétique etc...)

Evolution stellaire: En principe, on peut modifier la durée de vie d'une étoile en agissant sur la distribution de la matière.

Internet: un choix (lire une page web) modifie l'état de microprocesseurs parfois à l'autre bout de la planète. Action locale ayant des effets délocalisés.

Quelques exemples

Gaz dans un piston: La position du piston permet de contrôler la pression et la température du gaz. Ces deux concepts n'existent pas au niveau microscopique.

Nucléosynthèse en cosmologie: le taux de réactions nucléaires est déterminé par la densité moyenne de l'univers et de l'expansion cosmique.

Mesure en mécanique quantique: L'expérimentateur choisit les détails de l'appareil de mesure, ce qui résulte dans la sélection des micro-états qui résultent de la mesure.

Expérience quantique. On manipule des objets quantiques à partir d'appareils classiques (tension, champ magnétique etc...)

Evolution stellaire: En principe, on peut modifier la durée de vie d'une étoile en agissant sur la distribution de la matière.

Internet: un choix (lire une page web) modifie l'état de microprocesseurs parfois à l'autre bout de la planète. Action locale ayant des effets délocalisés.

Réchauffement global: L'action humaine modifie la dynamique du climat de la planète, qui ne peut être expliqué sans cet effet.

On peut ainsi distinguer 5 types d'action « **Top-down** »

- **Action algorithmique**

- *Le résultat dépend uniquement de la structure et des conditions initiales dans le niveau supérieur*
- **Ex: ordinateur.** L'état des portes et transistors dépend du programme exécuté.

On peut ainsi distinguer 5 types d'action « **Top-down** »

• **Action algorithmique**

- *Le résultat dépend uniquement de la structure et des conditions initiales dans le niveau supérieur*
- **Ex: ordinateur.** L'état des portes et transistors dépend du programme exécuté.

• **Action par contrôle d'information non-adaptative**

- *Le résultat est fixé par une contrainte (indépendance des conditions initiales)*
- **Ex: thermostat.** Le système s'adapte pour satisfaire la température choisie

On peut ainsi distinguer 5 types d'action « **Top-down** »

- **Action algorithmique**

- *Le résultat dépend uniquement de la structure et des conditions initiales dans le niveau supérieur*
- **Ex: ordinateur.** L'état des portes et transistors dépend du programme exécuté.

- **Action par contrôle d'information non-adaptative**

- *Le résultat est fixé par une contrainte (indépendance des conditions initiales)*
- **Ex: thermostat.** Le système s'adapte pour satisfaire la température choisie

- **Action par sélection adaptative**

- *Des variations dans le niveau inférieurs sont sélectionnées par un environnement.*
- **Ex: Evolution darwinienne. Neutrons.**

On peut ainsi distinguer 5 types d'action « **Top-down** »

• **Action algorithmique**

- *Le résultat dépend uniquement de la structure et des conditions initiales dans le niveau supérieur*
- **Ex: ordinateur.** L'état des portes et transistors dépend du programme exécuté.

• **Action par contrôle d'information non-adaptative**

- *Le résultat est fixé par une contrainte (indépendance des conditions initiales)*
- **Ex: thermostat.** Le système s'adapte pour satisfaire la température choisie

• **Action par sélection adaptative**

- *Des variations dans le niveau inférieurs sont sélectionnées par un environnement.*
- **Ex: Evolution darwinienne. Neutrons.**

• **Action par sélection d'information adaptative**

- *Sélection des buts dans un système de contrôle*
- **Ex: conditionnement pavlovien.**

On peut ainsi distinguer 5 types d'action « **Top-down** »

• **Action algorithmique**

- *Le résultat dépend uniquement de la structure et des conditions initiales dans le niveau supérieur*
- **Ex:** *ordinateur*. L'état des portes et transistors dépend du programme exécuté.

• **Action par contrôle d'information non-adaptative**

- *Le résultat est fixé par une contrainte (indépendance des conditions initiales)*
- **Ex:** *thermostat*. Le système s'adapte pour satisfaire la température choisie

• **Action par sélection adaptative**

- *Des variations dans le niveau inférieurs sont sélectionnées par un environnement.*
- **Ex:** *Evolution darwinienne. Neutrons.*

• **Action par sélection d'information adaptative**

- *Sélection des buts dans un système de contrôle*
- **Ex:** *conditionnement pavlovien.*

• **Action intelligente**

- *cas particulier où la sélection des buts implique l'utilisation de représentations symboliques permettant d'étudier le résultat de choix de but.*
- **Ex:** *design d'un outil, d'une expérience*

Nature de la causalité

Ceci modifie la façon de concevoir la causalité.

Traditionnellement, on ramène toute l'explication à un niveau donné:

Condition initiales + loi de ce niveau --> état final

Quand des effets top-down sont à l'oeuvre, le résultat peut:

- dépendre des conditions initiales dans le niveau considéré
- dépendre de ces conditions et initiales ET du contexte fixé par le niveau supérieur
- être complètement indépendant des conditions initiales du niveau considéré.

Nature de la causalité

Une formalisation de la notion de causalité à été proposée par Aristote dans *La Métaphysique*:

- **La cause matérielle** (*ce à partir de quoi*)
- **La cause formelle** (*ce qui rend définissable un objet*)
- **La cause efficiente** (*la source première de changement*)
- **La cause finale** (*le but, le sens*)

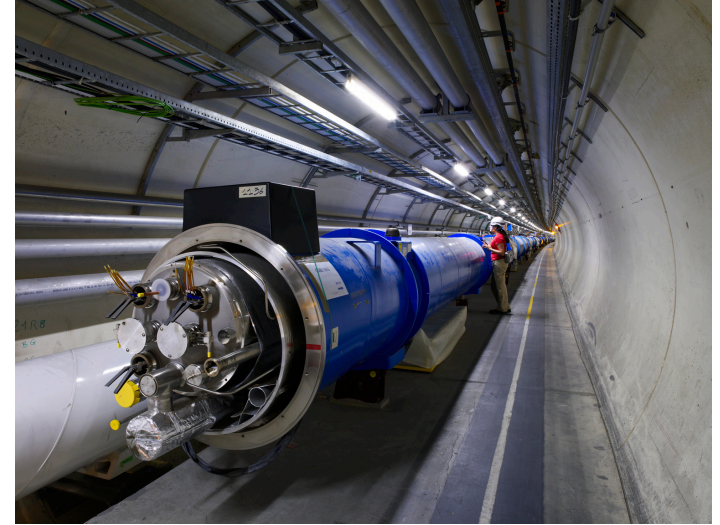
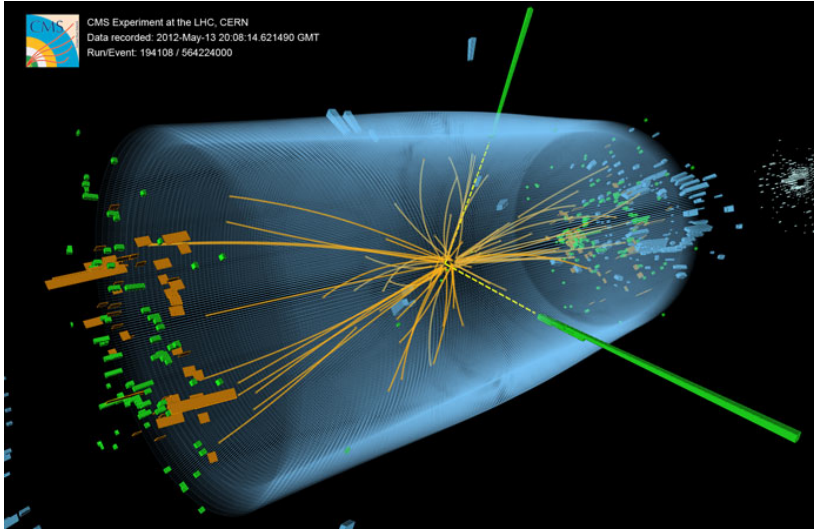
On peut proposer une nouvelle classification:

- **cause physique:** en terme de niveaux inférieurs
- **cause immédiate:** en terme du même niveau de description
- **cause contextuelle:** en terme d'un niveau supérieur
- **cause téléologique:** en terme du plus haut niveau

- **cause fondamentale:** en terme du niveau le plus fondamental.

(jamais accessible car on ne peut pas prouver qu'une théorie est fondamentale)

Expérience au LHC

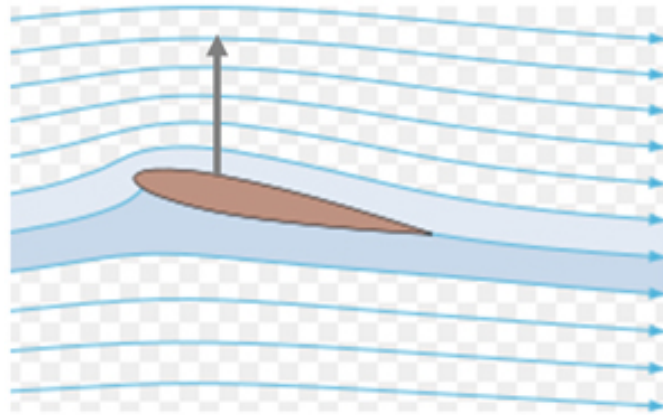


- **cause physique:** interactions des particules
- **cause immédiate:** les expérimentateurs manipulent les instruments de mesure (potentiomètres, interrupteurs...) au bon moment
- **cause contextuelle:** l'accélérateur a été pensé pour que les collisions puissent avoir lieu et être observées
- **cause téléologique:** des physiciens veulent comprendre la matière ou simplement recevoir le prix Nobel

Pourquoi un avion vole-t-il?



- Bottom-up:**
- dynamique des molécules d'air
 - dépression sur l'aile (Bernoulli) / force



- Même niveau:**
- pilote (entraînement/savoir)
 - suivant les plans de la compagnie (horaire/ligne)

- Top-down:**
- il a été conçu pour cela (ingénieurs travaillant dans un contexte historique) [*sélection naturelle*]
 - contexte économique d'une société
 - profit

Un avion ne volerait pas si toutes ces explications n'étaient pas vraies en même temps.

La description de la réalité nécessite une hiérarchie de niveaux de description

- *autonomes*
- *modulaires*
- *qui interagissent entre eux de façons variées*

La physique sous-tend tout.

Elle détermine l'espace des possibilités dans lequel les autres niveaux peuvent se développer

e.g. toute construction doit satisfaire le second principe de la thermodynamique, les lois de Maxwell, etc...

Il y a une limite dans ce que peut expliquer une théorie

- *contexte*
- *système isolé est une abstraction*
- *domaine de validité*

Comment les structures sont-elles apparues au cours de l'histoire de l'univers ?

*Emergence de la complexité
dans le cosmos*

Notre description de l'univers repose sur un modèle, le modèle du **big bang**.

Il repose sur:

- la relativité générale et l'existence d'une géométrie pour l'espace-temps
- des hypothèses de symétrie justifiées a posteriori par l'observation de l'univers.

On en déduit:

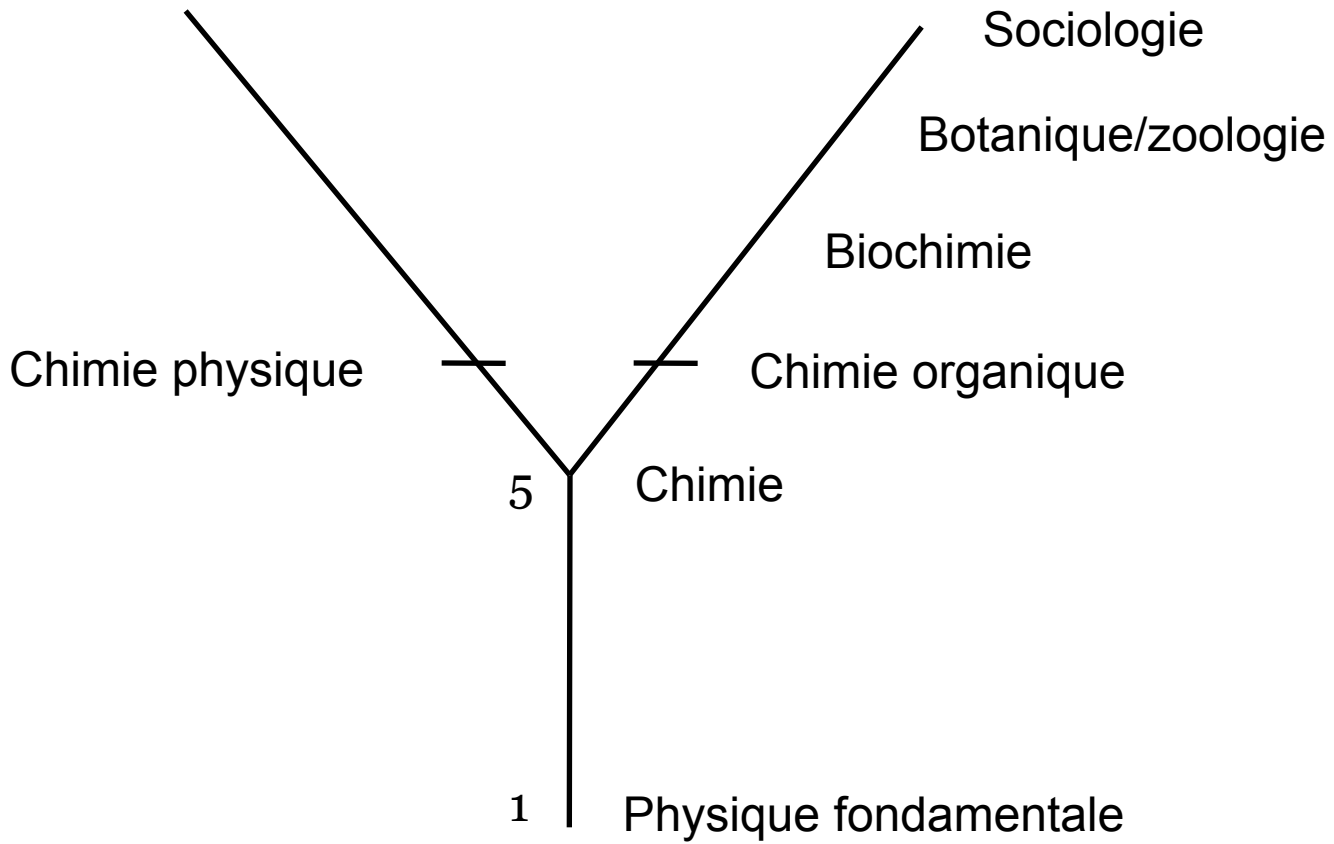
- que l'univers est en expansion
- il a une histoire thermique et émerge d'une phase dense et chaude à l'équilibre thermodynamique.

Toutes les observations permettent de contrôler ce modèles de 0.1 seconde après le big bang à aujourd'hui:

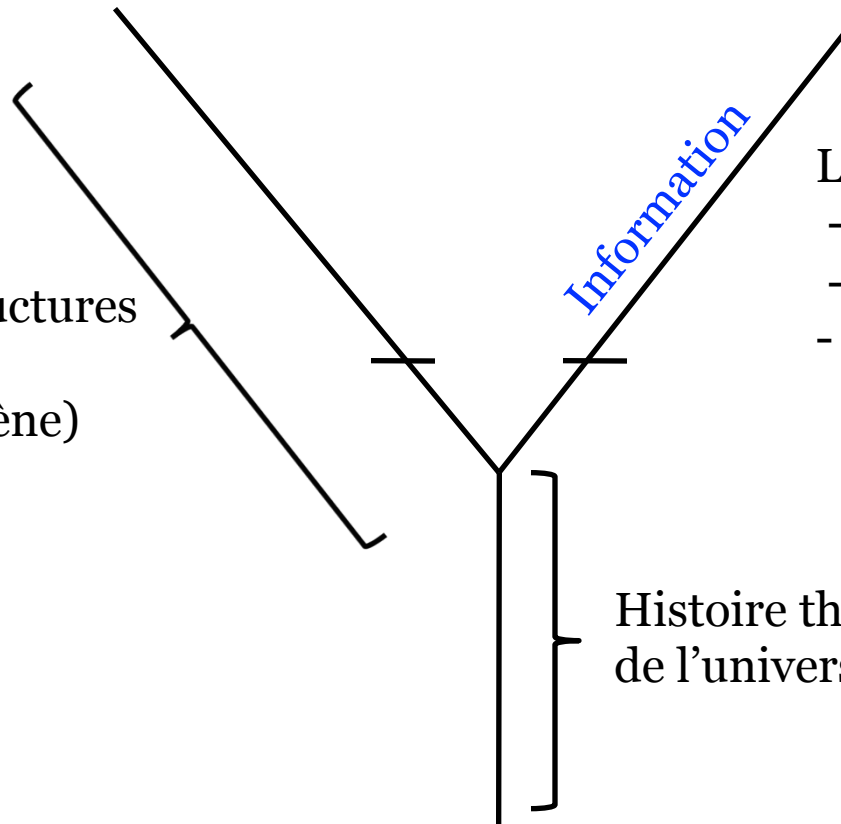
- *cela correspond à des énergies inférieures au MeV, i.e. à de la physique bien contrôlée en laboratoire et en accélérateur*
- *robuste vis à vis des inconnus de la physique fondamentale.*

A une température donnée certaines structures ne peuvent pas émerger car elles sont trop fragiles. Elle doivent donc apparaître au cours de l'histoire de l'univers

Exemples: nucléosynthèse et formation des noyaux légers / atomes



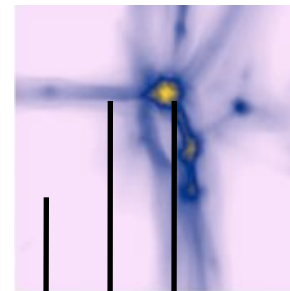
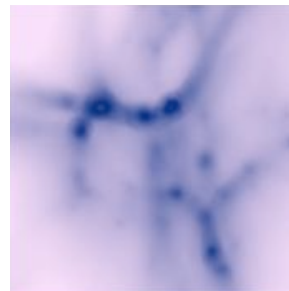
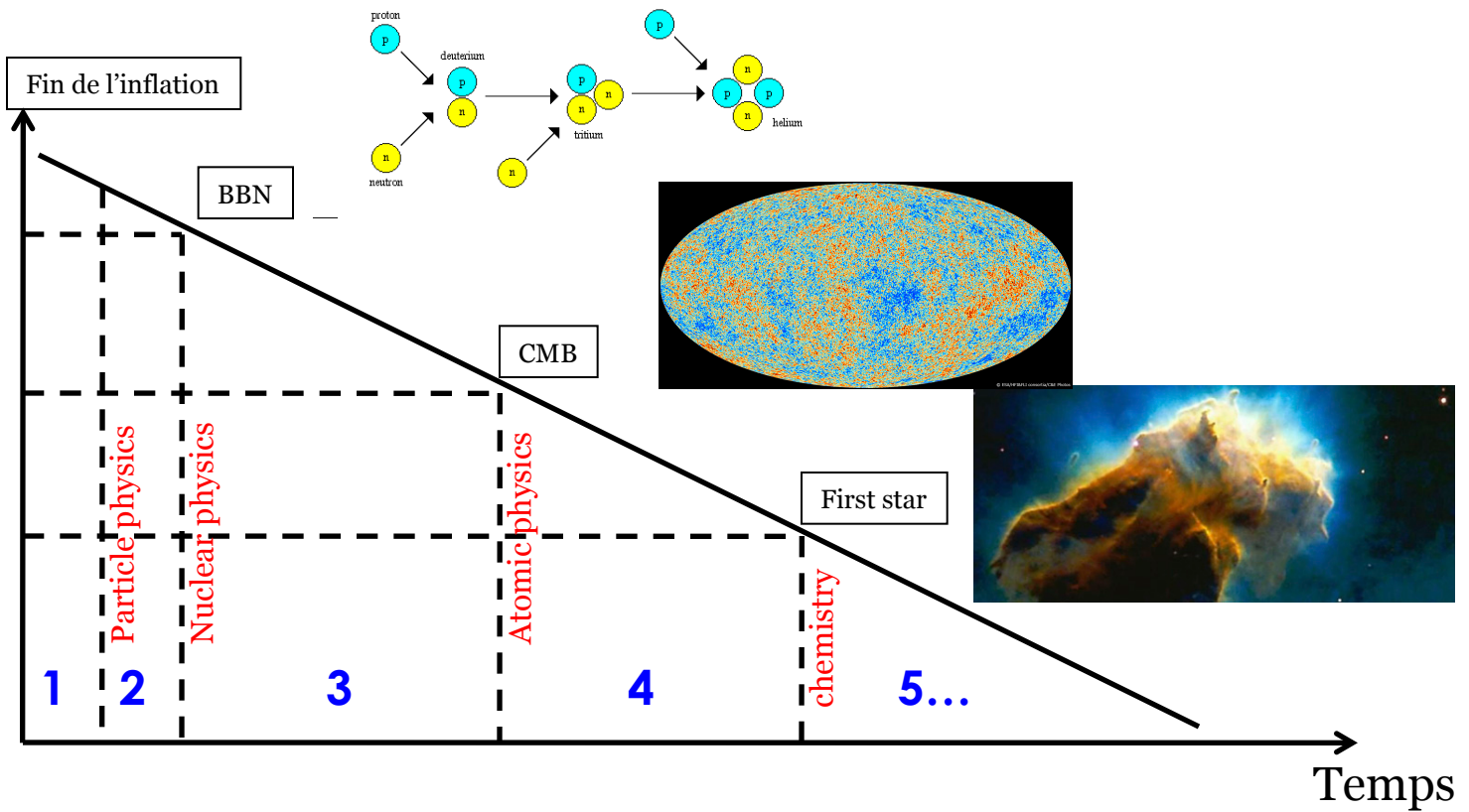
Il faut que des structures
se forment
(univers inhomogène)



La complexité demande:
- basse température
- basse densité
- « matter does not matter »

Histoire thermique
de l'univers

Température



↓ 4

↓ 2 - 10

↓ 4, 5a, 5b

La physique sous-tend tout

- *le modèle cosmologique et la possibilité de ce scénario dépend des lois de la nature*

L'univers et ses lois semblent finement ajustés pour qu'une forme de complexité puisse apparaître.

valeurs des constantes ?

Question actuellement sans réponse:

- *dessein ?*

- *nécessité mathématiques ?*

- *multivers et effet de sélection observationnelle?*

En guise de conclusion

- La description de la réalité demande d'utiliser une hiérarchie de théorie effectives
- Cette hiérarchie est modulaire
- Il y a une séparation d'échelle entre les différents niveaux
 - *Robustesse, indépendance*
- On ne peut pas se limiter à une approche strictement réductionniste:
 - *Top-down*
 - *Émergence*
 - *Plusieurs explication causales sont nécessaire en même temps*
- L'univers est initialement chaud et dense et a évolué pour se structurer.
C'est seulement localement que les conditions permettent l'apparition des niveaux supérieurs
- Les lois de la physique fondamentale offrent cette potentialité. Pourquoi?
- Approche en terme de **multivers**. Mais elle est très controversée.