

Constantes universelles et limites du possible en physique

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Larsim CEA Saclay)

Deux limites du possible, celles liées aux constantes k et c , selon Einstein

« J'avais devant les yeux le modèle de la thermodynamique dont le principe général s'énonçait ainsi: les lois de la nature sont ainsi faites **qu'il est impossible de construire un *perpetuum mobile*** (du premier ou du second type). Mais comment trouver un principe général de ce genre? Au bout de dix ans de réflexion, ce principe émergea d'un paradoxe auquel je m'étais heurté à l'âge de seize ans. Si je poursuis un rayon lumineux à la vitesse c (vitesse de la lumière dans le vide), je devrais percevoir ce rayon de lumière comme un champ électromagnétique oscillant sur place dans l'espace; or il semble bien qu'il n'existe rien de tel ni dans le domaine de l'expérience, ni selon les équations de Maxwell. (...) Le principe général de la théorie de la relativité restreinte est contenu dans le postulat suivant: **les lois de la physique sont invariantes par les transformations de Lorentz** (lors du passage d'un système inertiel à n'importe quel autre système inertiel). **Il s'agit, pour les lois de la nature, d'un principe restrictif comparable au principe de non-existence d'un *perpetuum mobile* qui est à la base de la thermodynamique.**

A. Einstein, *Autobiographie scientifique*, in Albert Einstein, Physique, philosophie, politique Seuil, Points sciences, p. 192 et 196

“The characteristically new feature of atomic physics due to the finiteness of the quantum of action – which excludes a subdivision of individual quantum processes – **is the impossibility of taking into account by determinable corrections the entire influence of the measuring instruments on the measured objects.**”

W. Pauli, *Editorial* in the special issue of the review *Dialectica*, devoted to the idea on complementarity

Il est **impossible**, à l'observateur humain, de connaître le déroulement de la « réalité objective ». Il ne peut en acquérir qu'une connaissance discontinue, limitée aux processus d'observation. Chaque observation est une intervention qui altère ce déroulement.

Ces aspects négatifs de la physique quantique ne doivent pas nous étonner. Tous les grands principes de la physique se présentent à l'esprit humain sous forme d'actes de renoncement :

Principe de conservation de l'énergie : il est **impossible** de créer de l'énergie. On ne peut que changer sa forme.

Principe de Carnot : il est **impossible** de transformer de la chaleur en travail si l'on ne dispose pas de milieux physiques à des températures différentes.

Principe de symétrie de Pierre Curie : il est **impossible** de créer une dissymétrie dans la nature. Le nombre d'éléments de symétrie des effets est égal ou supérieur à celui des causes.

Alfred Kastler, *Cette étrange matière*, pp.156 157 Paris: Stock 1976

The basic principle of constructor theory is that

I. All other laws of physics are expressible entirely in terms of statements about which physical transformations are possible and which are impossible, and why. This is in contrast with the *prevailing conception* of fundamental physics, which seeks to explain the world in terms of initial conditions and laws of motion, and whose basic dichotomy is therefore between what happens and what does not.

That individual physical systems (and not just the entire physical world) have states, attributes and variables in this sense is guaranteed by Einstein's (1949) **principle of locality** (Einstein 1949), which has a precise expression in constructor-theoretic form:

II. There exists a mode of description such that the state of the combined system $S1 \oplus S2$ of any two substrates $S1$ and $S2$ is the ordered pair (a,b) of the states a of $S1$ and b of $S2$, and any construction undergone by $S1$ and not $S2$ can change only a and not b .

D. Deutsch & C. Marletto, *Constructor theory of information* ArXiv:1405.5563

Et ce qui apparaît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des « parties différentes de l'espace ». **Sans cette hypothèse d'existence autonome (un « être ainsi ») des choses spatialement distantes – hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours –, la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible.** On ne voit pas non plus comment, sans cette disjonction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. La théorie du champ a développé à l'extrême ce principe, dans la mesure même où les choses élémentaires, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits.

L'idée qui caractérise l'indépendance relative des choses distantes spatialement (A et B) est la suivante : toute influence extérieure s'exerçant sur A n'a aucun effet sur B qui ne soit médiatisé. Ce principe est appelé « principe des actions par contiguïté » et **seule la théorie du champ en a fait une application conséquente. L'abolition complète de ce principe fondamental rendrait impensable l'existence de systèmes (quasi) fermés et donc l'établissement de lois empiriquement vérifiables, au sens habituel du terme.**

A. Einstein, *Mécanique quantique et réalité*, Contribution au numéro de Dialectica sur la complémentarité, traduit en français dans Albert Einstein, œuvres choisies, Tome 1 Quanta, pp.244-247, Seuil CNRS

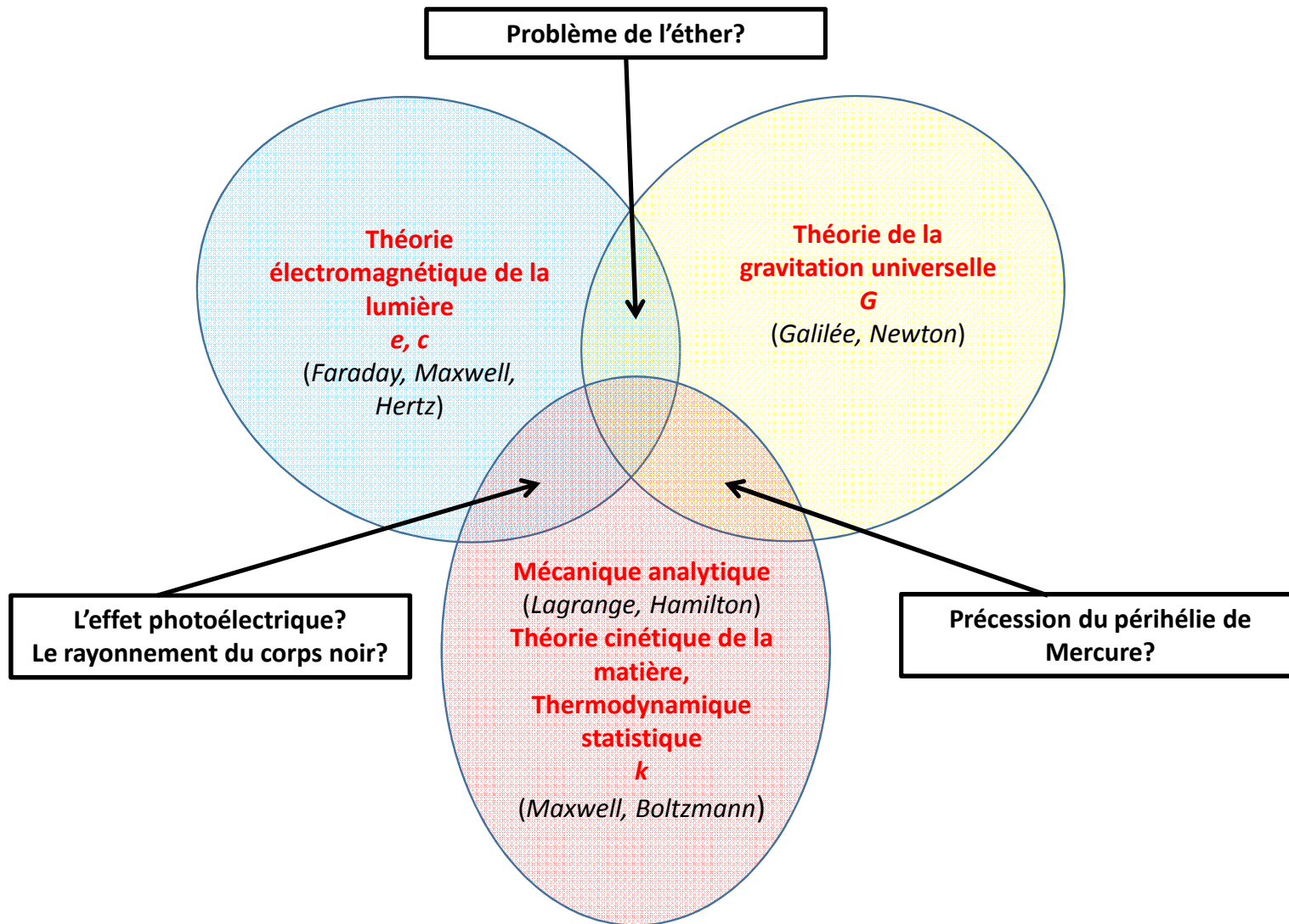
Les constantes universelles vues par Einstein

« La vitesse de la lumière c est une grandeur qui intervient en tant que ‘constante universelle’ dans les équations de la physique. Mais si on prend comme unité de temps, non plus la seconde, mais le temps que met la lumière pour parcourir 1 cm, c n’apparaît plus dans les équations. **En ce sens on peut dire que la constante c n’est qu’une constante universelle apparente.** Il est manifeste, et universellement admis, que l’on pourrait aussi éliminer deux autres constantes universelles en introduisant à la place du gramme et du centimètre, des unités ‘naturelles’ choisies de manière adéquate (par exemple, la masse et le rayon de l’électron).

Imaginons que cela ait été réalisé; alors n’apparaissent plus, dans les équations fondamentales de la physique que des constantes ‘sans dimensions’. Au sujet de ces dernières, j’aimerais énoncer un principe qui, provisoirement, ne peut être fondé sur rien d’autre que sur ma confiance en la simplicité, ou plutôt l’intelligibilité, de la nature: il n’existe pas de constantes *arbitraires* de ce type. Autrement dit: la nature est ainsi faite qu’il est logiquement possible d’établir des lois si fortement définies que seules des constantes susceptibles d’une détermination rationnelle complète apparaissent dans ces lois **(il n’y a donc pas de constantes dont les valeurs numériques puissent être modifiées sans que la théorie soit détruite).** »

A. Einstein, *Autobiographie scientifique (1949)* in Albert Einstein, physique, philosophie, politique (op. cit.) pp. 199-200

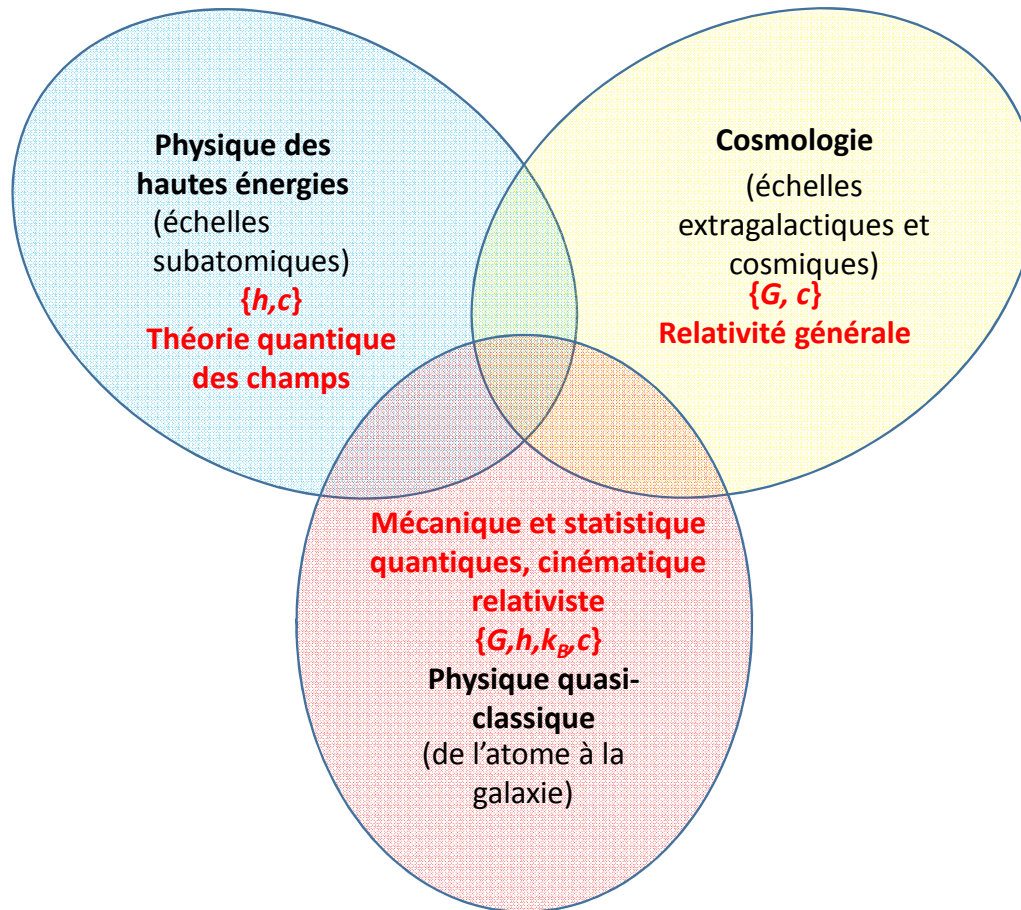
Apogée et crise de la physique classique au début du xx^e siècle



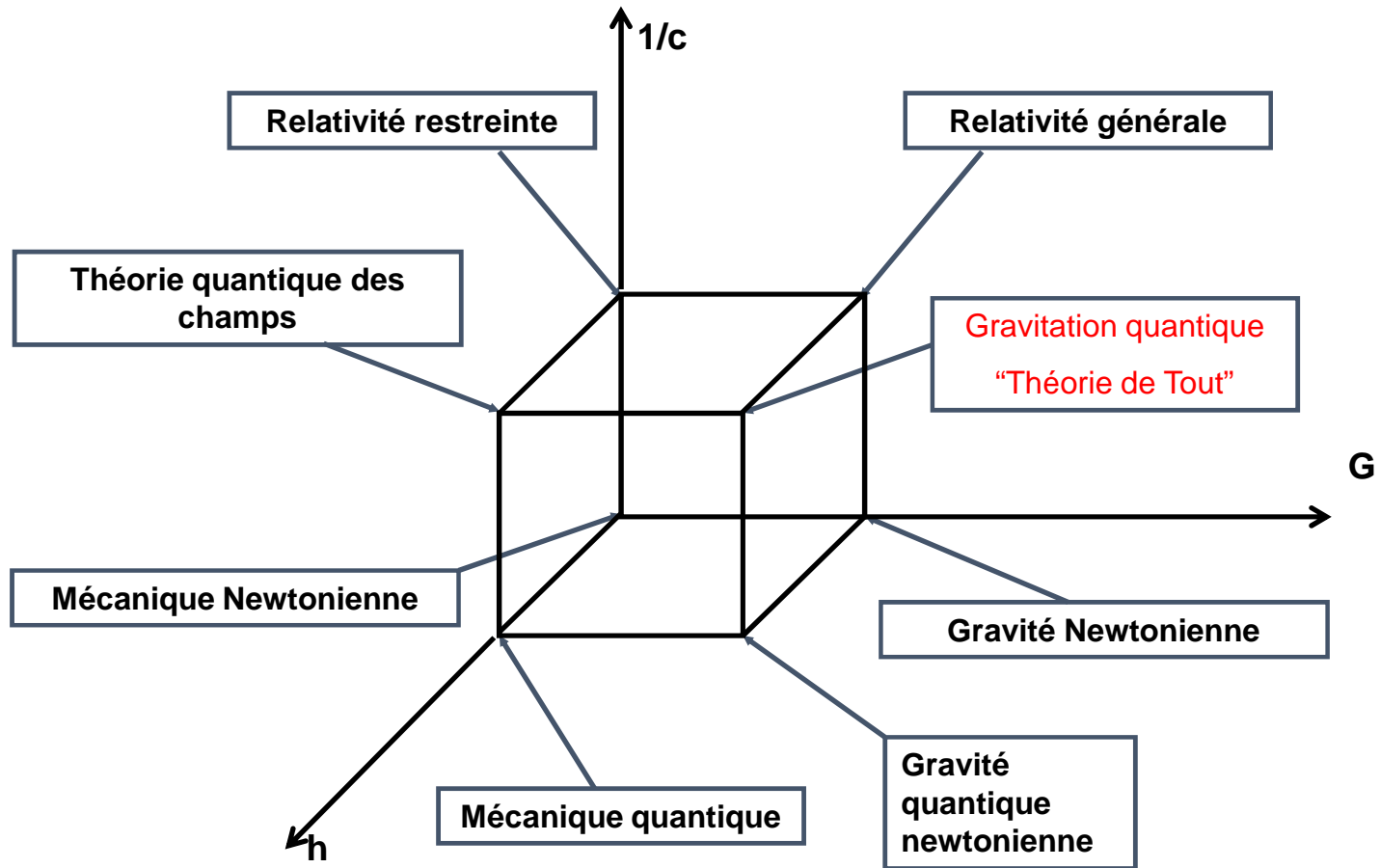
Les constantes universelles et la révolution scientifique du xx^e siècle

- ❑ **G, c, k, h : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20^{ème} siècle**
 - ❑ Définissent les **unités fondamentales**
 - ❑ Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
 - ❑ Structurent, par leur prise en compte séparément ou par paires, le **cadre général de la physique théorique qui répond à la crise de la physique classique**
- ❑ **Les horizons de la mécanique : les théories à une constante (h), (c), (k)**
 - ❑ L'horizon **quantique (h)**
 - ❑ L'horizon **relativiste (c)**
 - ❑ L'horizon **statistique ou informationnel (k)**
- ❑ **Le nouveau trépied de la physique, trois théories à deux constantes (h,c), (c,G), (h,k)**
 - ❑ La **théorie quantique des champs (h,c)**
 - ❑ La **relativité générale (c,G)**
 - ❑ La **statistique quantique (h,k)**

Dates	Cadre théorique	Gravitation	Électro magnétisme	Interaction faible	Interaction forte
17 ^{ème} siècle	Galilée, Newton	<u>Newton</u>			
19 ^{ème} siècle	Mécanique analytique, thermodynamique statistique		<u>Maxwell</u>		
1895-1898			Rayons X, électron, radioactivité		
1900-1930	Mécanique quantique				
1905-1915	Relativité	<u>Einstein</u>			
1930-1970	Théorie quantique des champs	<u>Big bang</u>	<u>QED</u>	<u>Fermi</u>	Yukawa
1970-2012	Théories de jauge	<u>ΛCDM</u>	<u>Théorie électrofaible de Glashow, Salam, Weinberg et Brout, Englert et Higgs</u>		<u>QCD</u>
2012- ...	Décohérence, théorie quantique de l'information, Holographie		<u>Grande unification? Supersymétrie? Matière sombre? Inflation? Gravitation quantique?</u>		



Le cube des théories



Constantes universelles et transitions limites

Gamow, Ivanenko, Landau (1928)

J.P Uzan, R. Lehoucq *Les constantes
fondamentales* p. 133 Belin 2005

Les échelles de Planck

- Les échelles de Planck (1899) Quatre constantes universelles dimensionnées: h, k, G, c , à partir desquelles Planck détermine des grandeurs fondamentales, appelées **échelles de Planck**

$$l_P = \sqrt{\hbar G / c^3} \approx 10^{-35} m$$

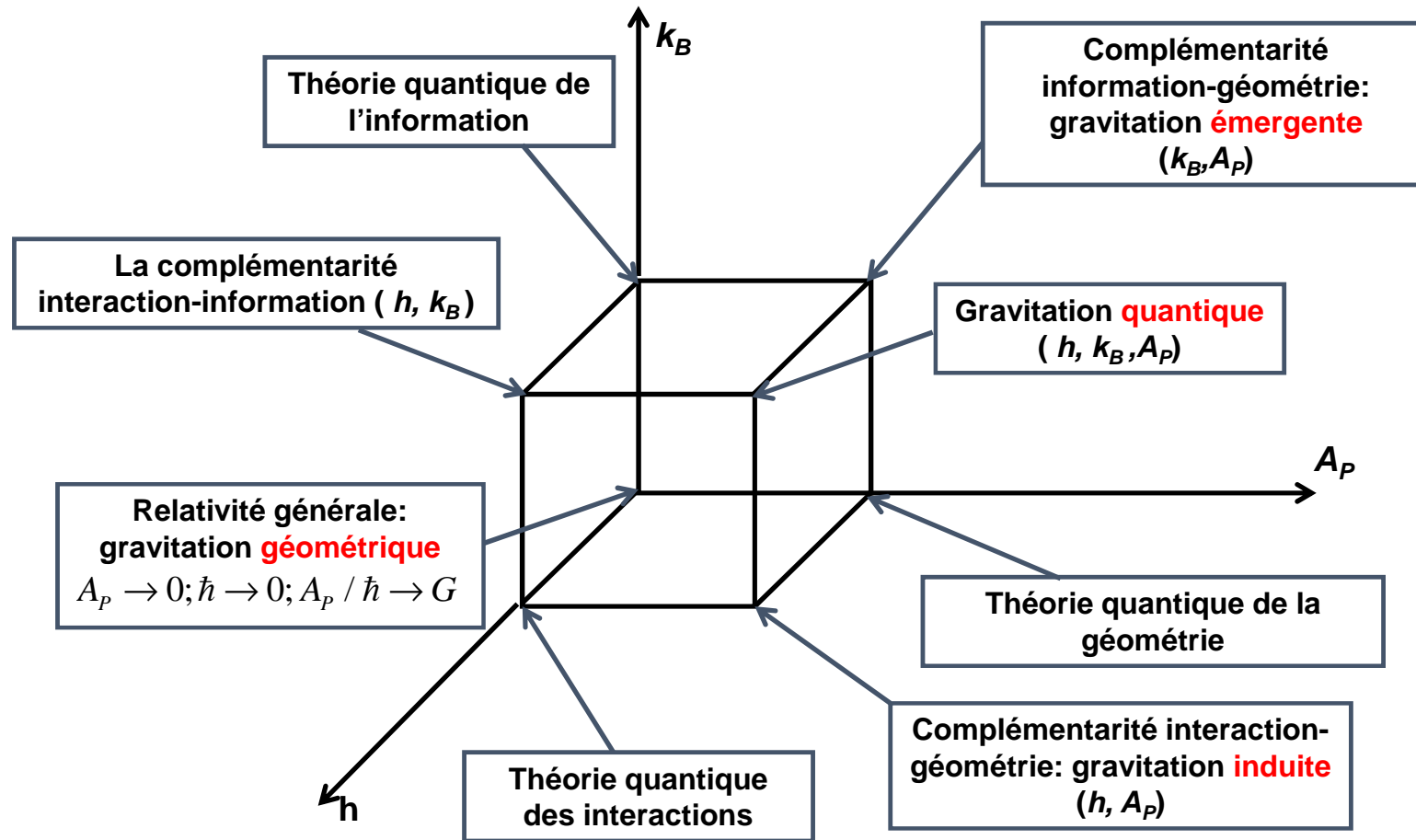
$$t_P = \sqrt{\hbar G / c^5} \approx 10^{-43} s$$

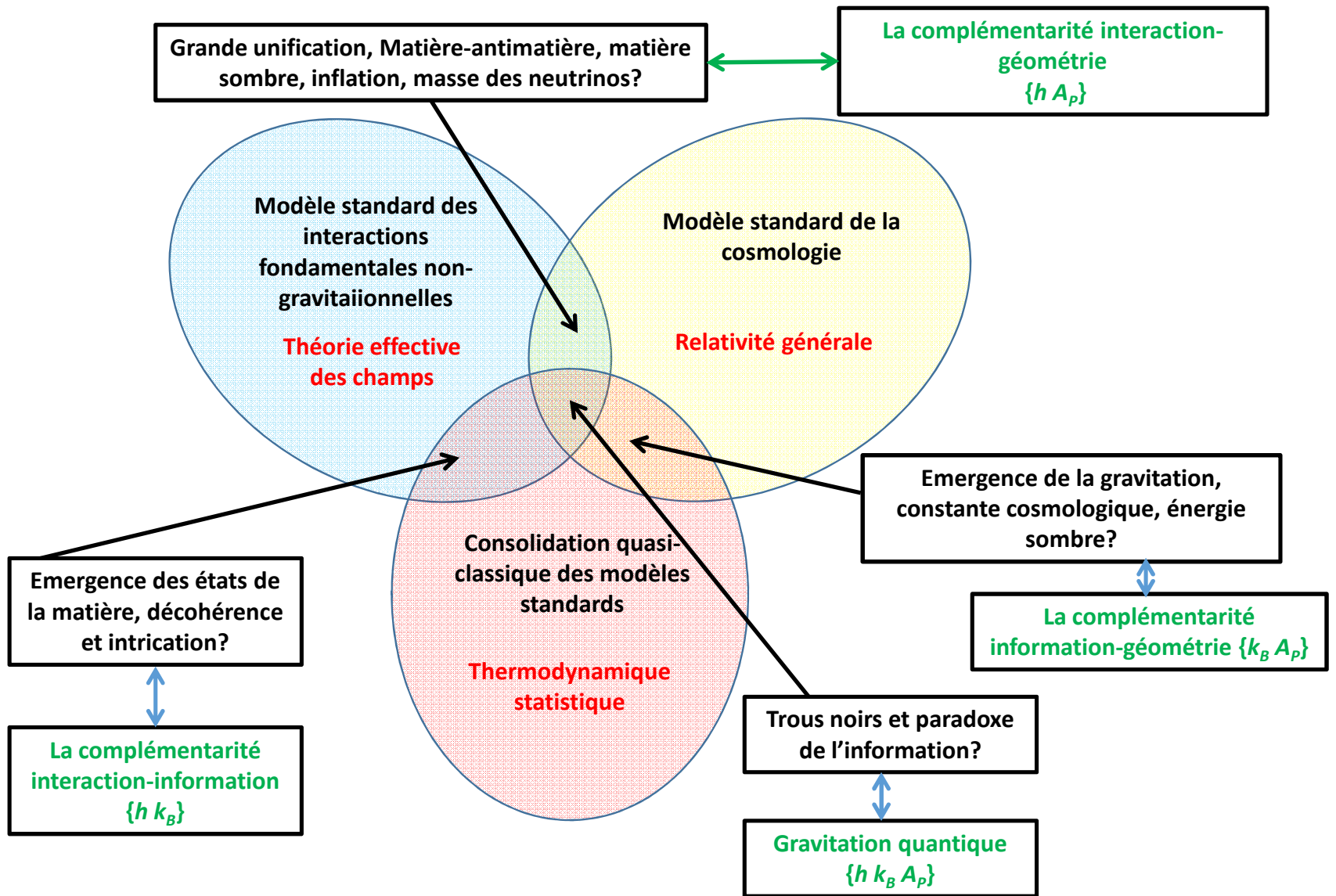
$$E_P = \sqrt{\hbar c^5 / G} \approx 10^{19} GeV$$

$$T_P = E_P / k$$

$$A_P = l_P t_P = \hbar G / c^4$$

Le cube de la triple quantification





Réserve

Le cube de la triple quantification

