

Le fondamental, l'universel, l'effectif et l'émergent

Gilles Cohen-Tannoudji

LARSIM CEA-Saclay

Les constantes universelles et les acquis de la physique du 20^{ème} siècle

- **La révolution scientifique du 20^{ème} 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 le **cadre général de la physique théorique**
- **Le « trépied » de la physique théorique**
 - Physique « **fondamentale** »
 - La théorie quantique des champs (h, c)
 - La relativité générale (G, c)
 - Physique « **émergente** »: La statistique quantique (h, k)

La théorie quantique des champs

- **Principes de limitation liés à \hbar et c**
 - L'existence d'un quantum élémentaire d'action, \hbar exclue toute subdivision des processus quantiques individuels, qui doivent être traités comme des **événements non prédictibles ni reproductibles individuellement**
 - La vitesse de la lumière dans le vide, c , est interprétée comme la constante universelle traduisant toujours et partout **l'impossibilité d'action instantanée à distance**

- **La théorie quantique des champs**

- Mariage de la relativité restreinte (prise en compte de c) et de la mécanique quantique (prise en compte de \hbar)
- Base théorique de la physique des particules élémentaires
- Champs quantiques
 - Champs **relativistes**, i.e. définis en chaque point de l'espace-temps de Minkowski
 - Champs **quantiques** i.e. champs d'**opérateurs** agissant dans un **espace de Hilbert** provoquant des **événements** d'émission ou d'absorption de **quanta d'énergie**
 - Les quanta d'énergie sont des **particules** ou des **antiparticules** (résolution du problème des énergies négatives)

- Champs quantiques **libres**: le cadre **cinématique** et **phénoménologique** de la physique des particules
 - Invariance de Poincaré: masse, spin, hélicité et chiralité des particules élémentaires
 - Théorème *PCT* et théorème de la connexion spin-statistique (Pauli)
 - Espace de Fock, amplitudes de transition et matrice *S*: phénoménologie des réactions entre particules à haute énergie
- Champs quantiques **en interaction** : la théorie des interactions fondamentales non gravitationnelles
 - **Relativité + causalité = localité des couplages entre champs quantiques** (principe de séparabilité d'Einstein ou « cluster decomposition principle » de Weinberg)
 - Problème des **infinis** lié à la localité des couplages

- L'intégrale de chemins (Feynman): **intégrale fonctionnelle** (i.e. à une infinité continue de variables d'intégration!) sur les champs de l'exponentielle de i fois l'action « classique » (intégrale sur l'espace-temps du **Lagrangien** de l'interaction exprimé en termes de c-nombres) en unités du quantum d'action \hbar
- **Le développement perturbatif** : développement des amplitudes de transition en séries de puissances de la **constante de couplage** (intéressant si cette constante est petite) dont les coefficients sont des **amplitudes de Feynman** (associées à des **diagrammes de Feynman**) ne faisant intervenir que des intégrales multiples ordinaires (i.e. à un nombre fini de variables d'intégration)
- Difficulté des infinis: **divergences** de ces intégrales rendant inutilisable ce développement perturbatif.

- **Le modèle standard de la physique des particules**

- Le paradigme de l'électrodynamique quantique (QED)

- Existence d'une limite classique
- Effets des corrections quantiques et relativistes mesurables en physique atomique
- Théorie à **invariance de jauge** (abélienne) locale
- Théorie **renormalisable** (voir plus bas)
- **Accord théorie/expérience excellent** (10^{-11})

- Généralisation aux autres interactions fondamentales non gravitationnelles: **théories à invariance de jauge non abéliennes, renormalisables**

- Le niveau sub-hadronique d'élémentarité: les **quarks** et les **gluons**
- La chromodynamique quantique (QCD), interaction forte des quarks et gluons
- La théorie électrofaible de Glashow, Salam et Weinberg, unification des interactions faible et électromagnétique
- Accord théorie/expérience très bon: 10^{-3} jusqu'à 200 GeV

La relativité générale

- **La relativité restreinte**
 - Équivalence des **référentiels inertiels** en mouvement relatif uniforme
 - Invariance de la vitesse de la lumière dans le vide
 - **Cinématique invariante de Lorentz dans l'espace-temps quadridimensionnel de Minkowski**
 - Élimination de l'éther
 - Promotion du concept de **champ** au rang de concept fondamental

- **Covariance générale et théorie géométrique de la gravitation**
 - Un **changement quelconque de référentiel** peut être remplacé, **localement**, par un **champ gravitationnel adéquat**
 - Le **champ gravitationnel** peut être remplacé, **localement**, par un **changement de référentiel adéquat**
 - Équation d'Einstein relie le tenseur de Ricci-Einstein lié à la **géométrie non euclidienne** de l'espace-temps au **tenseur énergie-impulsion** décrivant de manière **phénoménologique** les propriétés de la matière
 - La constante de proportionnalité entre ces deux tenseurs, est ajustée de façon à redonner la gravitation newtonienne à la limite non relativiste
 - La covariance générale implique que ne sont observables que des **événements de coïncidence spatio-temporelle** (par exemple des couplages locaux entre champs quantiques).

- **Relativité générale et cosmologie**

- L'univers statique d'Einstein

- La relativité générale devient la base théorique de la cosmologie scientifique
- La **constante cosmologique** introduite par Einstein: un terme compatible avec la covariance générale, lié à une propriété globale de l'univers (inverse du carré du « rayon » d'un **univers fini et sans bord**), et induisant une « pression négative » capable de contrebalancer l'action de la gravitation et de conduire à un **univers statique**.
- Des arguments **observationnels** (mouvement de **récession des galaxies lointaines** – **Hubble** – infirmant l'hypothèse du caractère statique de l'univers) et **théoriques** (**instabilité** de l'équilibre entre pression négative et gravitation, possibilité, avec l'équation d'Einstein sans constante cosmologique, d'obtenir un univers statique, ou en expansion ou en contraction – **Friedman** –) conduisent Einstein à abandonner la constante cosmologique.

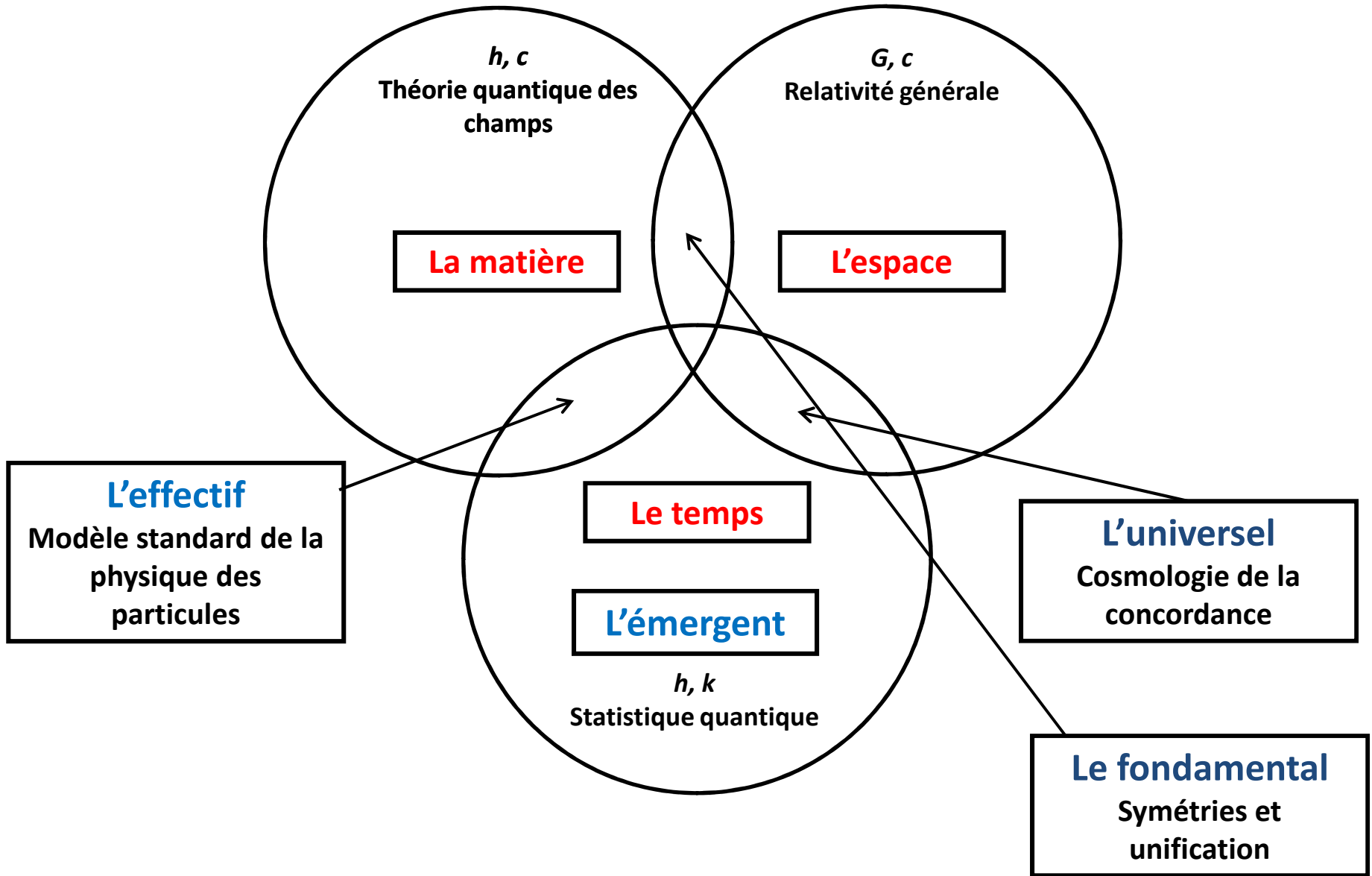
- **Le modèle cosmologique du « big bang »**
 - Le modèle « simple » du big bang (**Lemaître, Friedman, Robertson, Walker**)
 - Récession des galaxies lointaines, loi de Hubble
 - Abondance relative des éléments légers (nucléosynthèse primordiale)
 - Rayonnement diffus de fond cosmologique (RDFC) à environ 3 degrés Kelvin, détecté en 1965
 - Constante cosmologique mise à zéro
 - Les difficultés du modèle du big bang
 - Trop grande **homogénéité** du RDFC (problème d'**horizon**)
 - Problème de la **platitude spatiale** de l'univers (problème d'ajustement fin)
 - **Scénario de l'inflation** imaginé pour lever ces difficultés

- **Le modèle standard de la cosmologie, la « concordance »**
 - **Importants progrès observationnels au début des années 2000**
 - Mesure des distances à l'aide des **super novae de type 1A**
 - Détermination avec une grande précision de la carte du RDFC (**COBE, WMAP**, bientôt **Planck**)
 - **Dépassement du modèle du big bang**
 - Mise en **concordance** de toutes les données observationnelles
 - **Validation de l'hypothèse de l'inflation** expliquant la platitude spatiale observée
 - Détermination précise des paramètres fondamentaux de la cosmodynamique (**âge de l'univers, composantes de la densité d'énergie**)
 - Mise en évidence de composantes non standard inévitables de la densité d'énergie (**matière sombre et énergie sombre**)
 - **Interprétation** des fluctuations observées dans le RDFC comme le résultats de fluctuations intervenues dans l'ère de la **gravitation quantique, amplifiées par l'inflation**, pouvant produire les **grandes structures observées dans la distribution des galaxies** (filaments, vides, ...)
 - Retour de la constante cosmologique
 - **L'horizon de la gravitation quantique**
 - Le principe fondamental de limitation lié aux échelles de Planck
 - **Pour relever les défis théoriques que représentent la matière sombre et surtout l'énergie sombre faudra-t-il remettre en cause le cadre général de a physique théorique (théorie quantique des champs et/ou relativité générale)?**

La statistique quantique

- **Les méthodes statistiques, de la théorie cinétique de la matière à l'interprétation moderne de la physique quantique et à la théorie quantique de l'information**
 - Théorie cinétique de la matière et thermodynamique statistique: les probabilités et la statistique comme pis-aller
 - La constante de Boltzmann et ses interprétations successives
 - Interprétation informationnelle de l'entropie
- **L'interprétation moderne de la physique quantique (Gell-Mann, Hartle)**
 - Les insuffisances de l'interprétation de Copenhague
 - Décohérence et dépendance dans l'agraindissement (*coarse graining*)
 - Émergence d'un « royaume » quasi-classique (*quasi-classical realm*) à partir d'une cosmologie quantique
- **Théorie quantique de l'information et théorie informationnelle des quanta**
 - Vers l'**ordinateur quantique**
 - Reformulation de la physique quantique en termes d'information (**Grinbaum**)

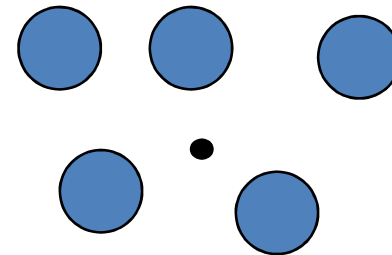
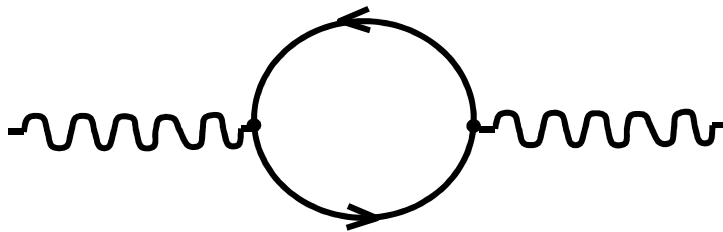
- **La statistique quantique, base théorique de la connaissance dans le domaine de l'émergence**
 - Il n'y a pas de modèle standard de l'émergence, mais tout un **réseau de modélisations et de simulations**
 - Possibilités ouvertes par les progrès fulgurants de **l'informatique**
 - Modélisations, simulations et **métrologie de haute précision** seront peut-être les seuls moyens d'exploration des domaines inaccessibles à l'observation ou l'expérimentation directes de la physique fondamentale à l'origine des phénomènes émergents.



L'universalité de l'émergence

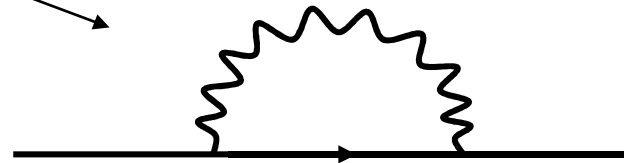
La renormalisation

- **Le vide quantique comme un diélectrique: image heuristique de la renormalisation**
 - Fluctuations quantiques et polarisation du vide.
 - Le vide de l'espace de Fock du champ quantique électromagnétique est l'état à 0 photon. D'après les inégalités de Heisenberg, quand le nombre de photons est déterminé (0 dans le vide), le champ électromagnétique est complètement indéterminé, il est fluctuant.
 - Une telle fluctuation correspond à **l'apparition suivie par la disparition d'une paire électron-antiélectron**
 - Ces fluctuations produisent un **effet d'écran**, conduisant à la notion de **charge effective dépendant de la résolution**



- Effet des interactions sur les paramètres de la théorie
 - La charge et la masse de l'électron (les paramètres de la théorie) sont **affectées par l'interaction avec le champ électromagnétique**.
 - Diagramme de "**self énergie**"

Un électron émet et réabsorbe un photon: le champ électronique est modifié par le champ électromagnétique qu'il produit



- Les paramètres de la théorie sont dédoublés en paramètres "**nus**" et paramètres "**renormalisés** par les interactions"
- Les paramètres renormalisés sont des **paramètres effectifs dépendant de la résolution**, on dit **renormalisés à l'échelle μ**

$$e \Rightarrow \begin{cases} e_0 \\ e_R(\mu) \end{cases}; m \Rightarrow \begin{cases} m_0 \\ m_R(\mu) \end{cases}$$

- **Les étapes de la renormalisation**

1. Régularisation

- On calcule la charge renormalisée, la masse renormalisée en fonction des paramètres nus (e_0 et m_0) et d'une énergie de coupure Λ , paramètre de régularisation.
- On inverse ces relations. Dans cette inversion on échange la charge nue avec **la charge renormalisée comme paramètre de développement**

$$e_0 = e_R(\mu) + \frac{1}{2} \beta_2 \text{Ln} \left(\frac{\Lambda}{\mu} \right) e_R^3(\mu) + \dots$$

$$m_0 = m_R(\mu) + \gamma_1 m_R(\mu) \text{Ln} \left(\frac{\Lambda}{\mu} \right) e_R^2(\mu) + \dots$$

2. Renormalisation

- Grâce à cette inversion, on exprime toutes les observables en termes de ces paramètres renormalisés.
- **Le miracle : dans ces expressions, si on fait tendre le paramètre de régularisation vers l'infini, on obtient une limite finie !**

3. Le groupe de renormalisation

- **Signification** du miracle: les infinis n'interviennent que lorsque l'on tente d'exprimer des observables physiques au moyen de paramètres qui ne sont pas physiques, les paramètres nus.
- **Relativisation** du miracle: les paramètres renormalisés sont certes plus physiques que les paramètres nus, mais ils dépendent d'un paramètre arbitraire, **l'échelle de renormalisation μ**
- **Invariance d'échelle**: si la masse nue de l'électron était nulle, la théorie ne dépendrait d'aucun paramètre dimensionné, elle serait complètement **invariante d'échelle**. Dans ce cas, la dépendance de la charge renormalisée dans l'échelle de renormalisation devrait alors être telle qu'aucune observable physique ne dépende de cette échelle. Cette contrainte s'exprime dans une équation différentielle, dite **équation du groupe de renormalisation**

$$\mu \frac{de_R^2(\mu)}{d\mu} = \beta(e_R^2(\mu)); \beta(e^2) = \beta_2 e^4 + O(e^6)$$

- La fonction $\beta(e^2)$ peut être calculée au moyen d'un développement perturbatif. β_2 est un coefficient numérique dont le signe contrôle le comportement asymptotique de la charge renormalisée. En QED, ce coefficient est positif, ce qui implique que **la charge croît à haute résolution (haute énergie)**, ce que suggère l'argument basé sur l'effet d'écran
- Lorsque la masse de l'électron n'est pas nulle, l'équation du groupe de renormalisation s'applique à l'approximation où l'énergie de renormalisation est très grande devant la masse de l'électron.
- **À basse énergie**, on peut prendre comme énergie de renormalisation la masse de l'électron.

$$e_R(\mu = m) = e$$

$$m_R(\mu = m) = m$$

- **La renormalisabilité de QED**

- Définition

- Une théorie est dite **renormalisable** si la technique de la renormalisation peut s'appliquer à toutes observables et à tous les ordres de la série de perturbation.
 - **QED est renormalisable**

- Conséquences

- Grâce à sa renormalisabilité, QED est une théorie prédictive.
 - Comme QED s'applique à basse énergie (en physique atomique) où des expériences de très haute précision peuvent être faites, on peut trouver des **observables mesurables et calculables avec des précisions comparables**.
 - **L'accord théorie/expérience est extraordinaire**

Par exemple, pour le moment magnétique de l'électron, on trouve

Exp: 2,00231930482+/- 40

Th: 2,00231930476+/- 52

- **Théorie quantique des champs et physique des phénomènes critiques**

- **Correspondance** entre l'intégrale de chemins en **TQC** et la moyenne sur les configurations en **physique statistique**

$$Z_{\text{TQC}} = \int \mathcal{D}\phi \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int d^4x \mathcal{L}(\phi(x)) \right\} \Leftrightarrow Z_{\text{Stat}} = \int \mathcal{D}S \exp \{ -\beta \mathbf{H}(S) \}$$

- **Transitions de phase du second ordre** (phénomènes critiques)
 - Longueur de corrélation tend vers l'infini
 - Fluctuations importantes à toutes les échelles, **auto-similarité**
 - Échec des méthodes analogues à la méthode perturbative en TQC (approximation du **champ moyen** comme analogue de l'approximation classique et traitement en perturbation des fluctuations).
- La méthode **des blocs de spins** (Kadanov)
 - Le système est modélisé à l'aide d'un **réseau discret de spins**
 - Les fluctuations sont moyennées par récurrence:
 - On moyenne les valeurs des spins sur chaque maille élémentaire du réseau
 - Sur un réseau de pas double, on attribue à chaque spin la valeur moyenne ainsi calculée
 - On **redimensionne** le réseau ainsi obtenu au même pas que le réseau initial
 - On **réitère la procédure indéfiniment** pour calculer la moyenne sur toutes les configurations

- Transformation du **groupe de renormalisation** (K. Wilson)
 - À chaque itération on effectue ainsi ce qu'on appelle **une opération du groupe de renormalisation**

$$\mathbf{H}_{2^n a}(S) = \mathfrak{T}(\mathbf{H}_{2^{n-1} a}(S))$$

- **L'auto-similarité** (ou fractalité) spécifique des phénomènes critiques se traduit dans le fait que quand le nombre d'opérations du groupe de renormalisation tend vers l'infini, on obtient **l'équation de point fixe du groupe de renormalisation**

$$\mathbf{H}_{2^n a}(S) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathbf{H}^*(S)$$

$$\mathbf{H}^*(S) = \mathfrak{T}(\mathbf{H}^*(S))$$

- Dans la correspondance entre la TQC et la physique statistique, **les équations de point fixe pour une transition de phase du second ordre sont équivalentes aux équations du groupe de renormalisation pour une TQC renormalisable**
- On dit de la TQC renormalisable et de la transition de phase du second ordre obéissant aux mêmes équations du groupe de renormalisation (GR), qu'elles appartiennent à la même **classe d'universalité**

- Le "miracle" de la renormalisabilité élucidé: **l'universalité de l'émergence**
- En physique statistique, la difficulté rencontrée dans les transitions de phase du second ordre est comparable aux divergences qui, en TQC, empêchent d'appliquer les méthodes perturbatives: la présence de fluctuations à toutes les échelles indique que le comportement du système semble dépendre des détails de l'interaction au niveau microscopique, de même que la régularisation en TQC semble faire dépendre la physique de paramètres arbitraires de très haute énergie.
 - Près d'un point fixe du GR, le phénomène critique (**émergent!**) "oublie" le pas du réseau, de même que dans une TQC renormalisable, on peut sans inconvénient faire tendre vers l'infini le paramètre de coupure nécessaire à la régularisation.
 - Les comportements **émergents** des deux systèmes en correspondance sont **universels**, en ce sens qu'ils ne dépendent que d'un petit nombre de **paramètres ou degrés de liberté dits pertinents**, tous les autres paramètres ou degrés de liberté pouvant être considérés comme **marginiaux**

Les théories quantiques des champs effectives

– Les théories effectives

- À toutes les échelles de distances, il y a des phénomènes physiques intéressants
- On peut diviser l'espace des paramètres en régions différentes dans chacune desquelles il y a une **théorie effective**, qui est une description **appropriée** de la physique **importante**
 - **Importante**: les processus physiques à considérer diffèrent d'une région à l'autre
 - **Appropriée** : il n'y a pas de description unique utile partout dans l'espace des paramètres
- **Idée de base des théories effectives**: s'il y a des paramètres très grands ou très petits par rapport aux quantités physique d'intérêt (de même dimension), **on peut obtenir une description approchée plus simple de la physique en mettant à zéro les paramètres très petits et à l'infini les paramètres très grands**. Les effets finis de ces paramètres sont alors traités en perturbation par rapport à ce point de départ approximatif
- En physique des particules, le paramètre pertinent est l'échelle de distance. La stratégie des théories quantiques des champs effectives (TQCE) consiste à mettre à zéro les aspects de la physique qui impliquent des distances petites devant l'échelle de distance considérée. **L'intérêt de cette stratégie réside dans le fait que parmi les aspects qui peuvent être ignorés, se trouvent les particules trop lourdes pour pouvoir être produites.**

– "Tours d'interactions"

- **Une théorie effective dépend de l' énergie E et d'un degré de précision ε**
- L'effet de la physique de haute énergie sur la physique à l'échelle E est décrit par une **"tour d'interactions" dont les couplages ont une dimension (en unité d'énergie ou de masse) k**
 - Il y a un **nombre fini d'interactions** à chaque dimension k
 - Les coefficients de ces termes d'interaction sont de l'ordre $1/M^k$ où M est une masse supérieure à E , indépendante de k
 - La contribution d'une interaction non renormalisable de dimension k est proportionnelle à $(E/M)^k$
 - Pour obtenir la précision ε on n'inclura que les interactions de dimension k_ε tel que

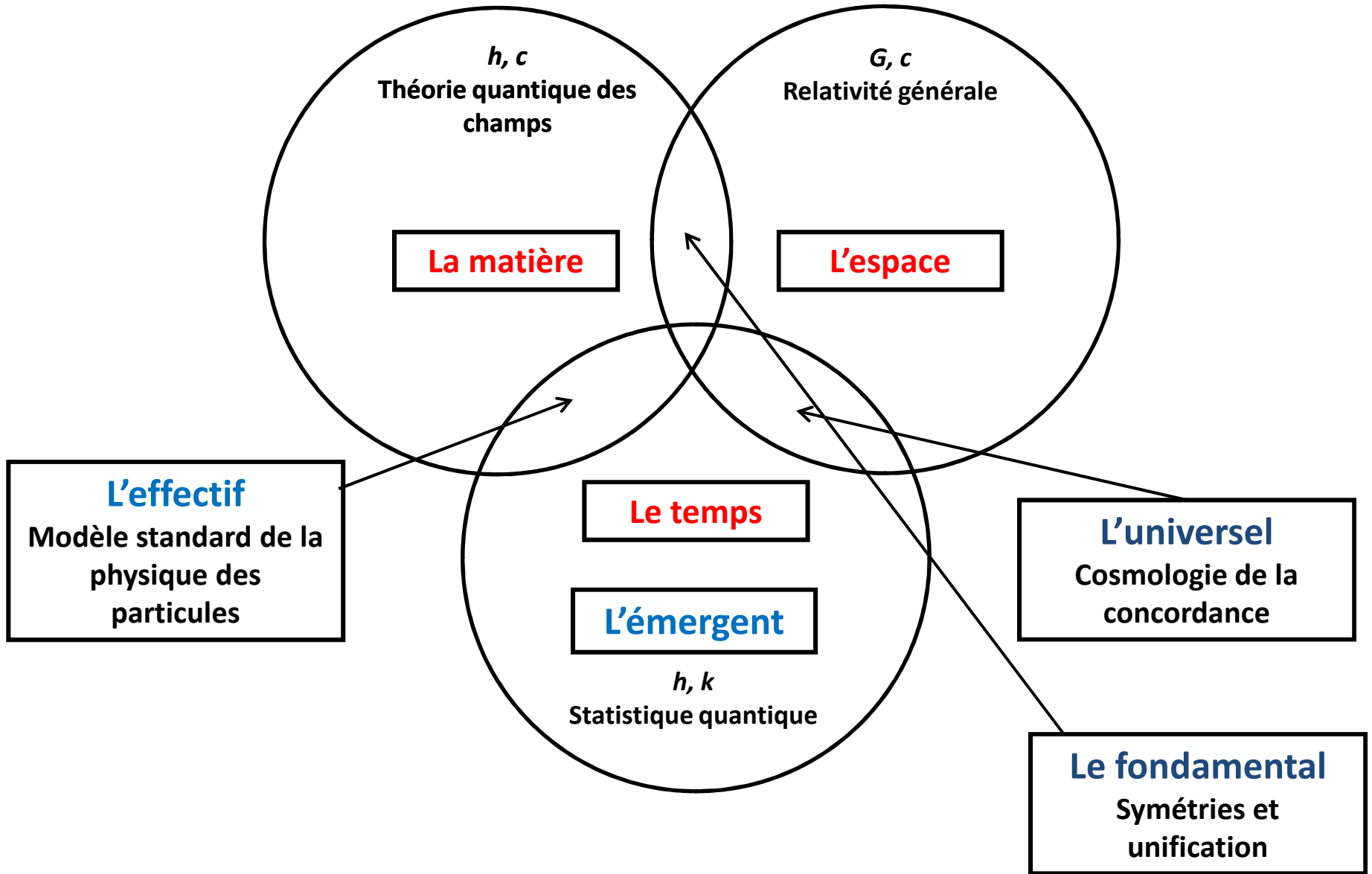
$$\left(\frac{E}{M}\right)^{k_\varepsilon} \sim \varepsilon \rightarrow k_\varepsilon \sim \frac{\text{Ln}(1/\varepsilon)}{\text{Ln}(M/E)}$$

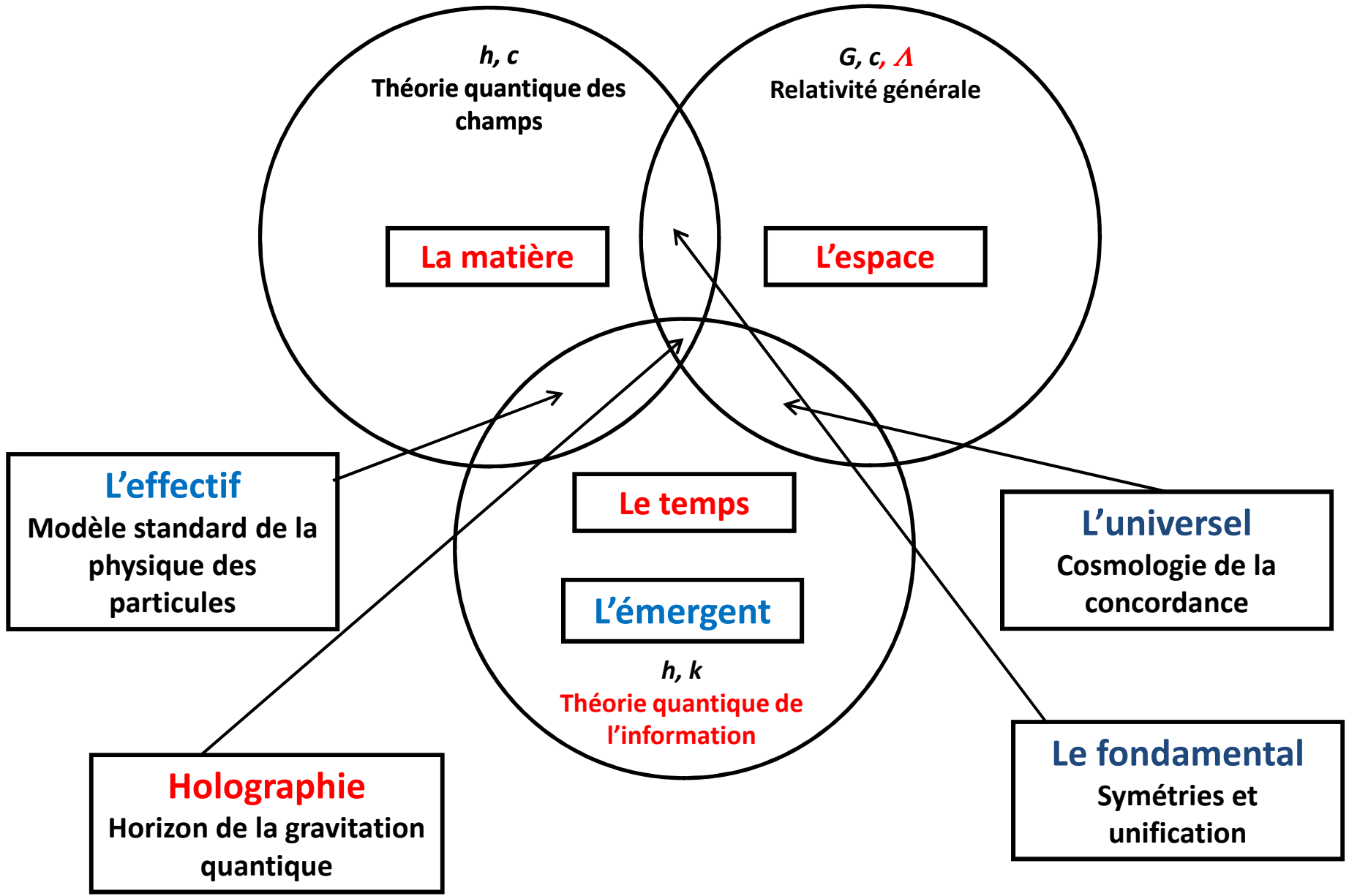
- Quand on monte en énergie, k_ε croît, **ce qui signale que l'on s'approche d'une nouvelle physique**, et qu'il va falloir changer de théorie effective.
- Dans la nouvelle théorie effective, impliquant une échelle de masse plus élevée M' , les interactions non-renormalisables de la première théorie effective auront disparu et apparaîtront comme renormalisables.
- Les théories effectives successives sont **raccordées l'une à l'autre grâce au équations du groupe de renormalisation**

- Comment une telle procédure peut-elle se terminer?
 - **Une première possibilité** est qu'au delà d'une certaine échelle très élevée, toutes les interactions non-renormalisables aient disparu et que l'on se retrouve avec **une bonne théorie renormalisable au sens usuel du terme**. Ceci semble peu probable compte tenu des difficultés liées à la gravitation
 - Une **autre possibilité** est que l'on soit amené à **changer radicalement de cadre théorique** (comme par exemple avec une théorie de cordes)
 - Il est aussi possible que le **processus** soit **sans fin**, avec toujours de nouvelles échelles d'énergies de plus en plus élevées.
 - « **Who knows? Who cares?** »
- « **Quoiqu'il en soit, les TQCE nous permettent de nous poser toutes les questions réellement scientifiques sans avoir à nous engager dans une description de ce qui peut survenir à des énergies arbitrairement élevées.** » (Georgi "Effective field theory" *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 1993, 43, 209-52)
- « The tendency of nature to form a hierarchical society of physical laws is much more than an academic debating point. It is why the world is knowable. It renders the most fundamental laws, whatever they are, irrelevant and protects us from being tyrannized by them. It is the reason why we can live without understanding the ultimate secrets of the universe. » (Laughlin *A different universe*)
- « The most striking observable feature of our indeterministic quantum universe is the wide range of time, place and scale on which the deterministic laws of classical physics hold to an excellent approximation. This essay describes how this domain of classical predictability of every day experience emerges from a quantum theory of the universe's state and dynamics. » James B. Hartle, *The quasiclassical realms of this quantum universe* arXiv:0806.3776v1 [quant-ph]

Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon ?

« All three principles – the conformability of nature to herself, the applicability of the criterion of simplicity, and the utility of certain parts of mathematics in describing physical reality – are thus consequences of the underlying law of the elementary particles and their interactions. **Those three principles need not be assumed as separate metaphysical postulates. Instead, they are emergent properties of the fundamental laws of physics.** » Murray Gell-Mann *Nature conformable to herself*
<http://www.santafe.edu/~mgm/nature.html>





Une route thermodynamique vers la gravitation quantique

« **Horizons** are an inevitable feature of any geometrical theory of gravity. **Thermal** nature of horizons cannot arise without the spacetime having a **microstructure**

Just as a solid cannot exhibit thermal phenomenon if it does not have microstructure, horizons cannot exhibit thermal behavior if spacetime has no microstructure

Just as thermodynamics provides a link between statistical mechanics and (zero temperature) dynamics of a solid, **horizons link certain aspects of microphysics with the bulk dynamics**

Gravity is an emergent phenomenon like elasticity and the field equations should be derivable from an alternative paradigm

The gravitation action is '**holographic**' with the same information being coded in both the bulk and the surface terms »

T. Padmanabhan *Gravity as an emergent phenomenon: A conceptual description* arXiv:0706.1654v1 [gr-qc]

- Deux questions à propos de l'**émergence en physique**
 - **Qu'est-ce qui émerge ?**
 - **Qu'est-ce que l'émergence ?**
- Les réponses que je propose
 - Ce qui émerge, ce sont certaines **propriétés des lois fondamentales de la physique**
 - L'émergence, c'est l'**affleurement du fondamental** à la surface des **horizons**