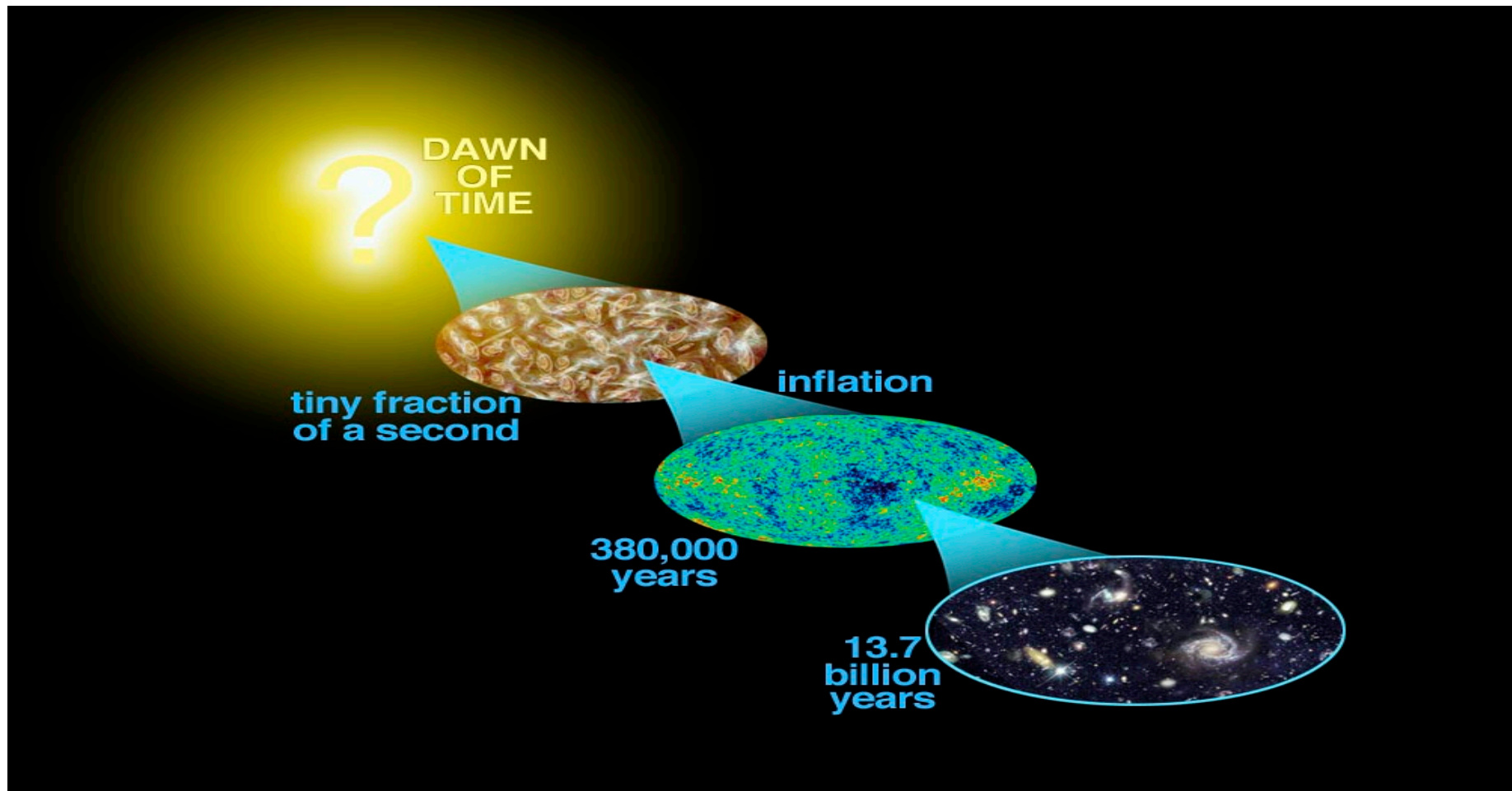


# Plan

- I. Qu'est-ce que l'Univers ?
- II. Historique de la cosmologie
- III. Les grandes étapes de l'évolution de l'Univers**
- IV. L'avenir de l'Univers
- V. Annexes

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

- Une multitude d'événements se succèdent durant la première seconde après le big bang car les phénomènes quantiques sont extrêmement rapides !



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère de Planck

### L'ÈRE DE PLANCK $t < 10^{-43}s$

- $t = 10^{-44}s$  'le temps de Planck' => limite théorique en-deçà de laquelle le temps perd toute sa signification.
- De manière plus générale, la limite de Planck représente la limite au-delà de laquelle les notions – matière, énergie, espace et temps – perdent la signification qu'on leur donne usuellement.
- **On ne sait pas ce qui s'est passé en-deçà de cette limite.**  
Nos concepts actuels sont incapables de décrire ce qui se trame à des échelles de moins de  $10^{-35}$  centimètre en dimension,  $10^{-43}$  seconde en temps ou bien  $10^{28}$  électrons-volts en énergie. Ce système d'unités naturelles marque la frontière du monde de la gravitation quantique. Le temps et la longueur de Planck représentent les tailles des fluctuations de l'espace-temps liées à la relativité et à la mécanique quantique. On leur associe la masse et l'énergie correspondantes.
- Cette partie **nécessite un traitement de la relativité générale incluant les concepts de la mécanique quantique**. Cette théorie 'couplée' n'est pas découverte à ce jour mais sera peut-être issue de la théorie des cordes.
- Ce domaine de la cosmologie est appelé "**la cosmologie quantique**"

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère de Planck

### L'ÈRE DE PLANCK $t < 10^{-44}s$

La limite de Planck :

- la masse  $M_p = \sqrt{hc/G} = 55$  microgrammes  $\approx$  poids d'un grain de sable fin
- la longueur  $l_p = \sqrt{Gh/c^3} = 4,1 \cdot 10^{-35}$  mètre
- le temps  $t_p = L_p/c = 1,4 \cdot 10^{-43}$  seconde
- l'énergie  $E_p = M_p c^2 = 3,1 \cdot 10^{19}$  milliards d'électrons-volts
- la température  $T_p = E_p/k = 3,6 \cdot 10^{32}$  degrés

Pour rappel :

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide = 299 792 458 mètre/seconde.

$G$  est la constante de gravitation universelle de Newton

$G = 6,6742 \cdot 10^{-11}$  mètre<sup>3</sup>/kilogramme/seconde<sup>2</sup>

$h$  est la « constante de Planck » =  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Joule/seconde.

$k$  est la constante de Boltzmann des gaz parfaits =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Joule/degré.

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère de Planck

### L'ÈRE DE PLANCK $t < 10^{-44}s$

EXTRAIT D'UN ARTICLE FNRS: *le rêve d'Einstein, marier gravitation et mécanique quantique*

*John Schwarz de l'institut de technologie de Californie et Joël Scherk de l'École Normale Supérieure de Paris marchent dans les pas de l'Italien Gabriele Veneziano, aujourd'hui au Collège de France. Ils proposent une nouvelle interprétation dans laquelle les objets clefs ne sont plus des particules sans dimension mais de minuscules cordes élastiques, longues de peut-être 10-35 mètre la longueur de Planck. Dès lors, l'Univers se ramènerait aux états d'excitations-vibrations de cordes assimilées à celles d'un violon ou d'un piano. Une vision riche et prometteuse. Elle englobe la relativité et les interactions électromagnétique ou nucléaires. Ainsi, le rêve d'Einstein – marier gravitation et mécanique quantique – semblerait sur le point de s'accomplir. Ces développements soulèvent les espoirs. Fidèles au principe de l'unité du monde, les chercheurs se sentent à l'aube de réunir deux théories incompatibles et filles du XXe siècle. Mais, les difficultés sont à la mesure du défi. Un cortège de prédictions à vérifier par l'expérience se profilent à l'horizon. Parmi elles : l'existence supposée du graviton, corpuscule vecteur de la gravité, et celle subodorée des ondes gravitationnelles ; l'extension de l'espace à de nouvelles dimensions insoupçonnées, supplémentaires ou cachées, qui échappent à nos sens ; d'éventuelles variations des constantes fondamentales ; la mise en défaut de la loi de Newton sur de courtes distances, inférieures au millimètre. Bref, un bouleversement serait à venir. Se confirmera-t-il ? Parions que les prochaines années se montreront généreuses en surprises excitantes.*

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

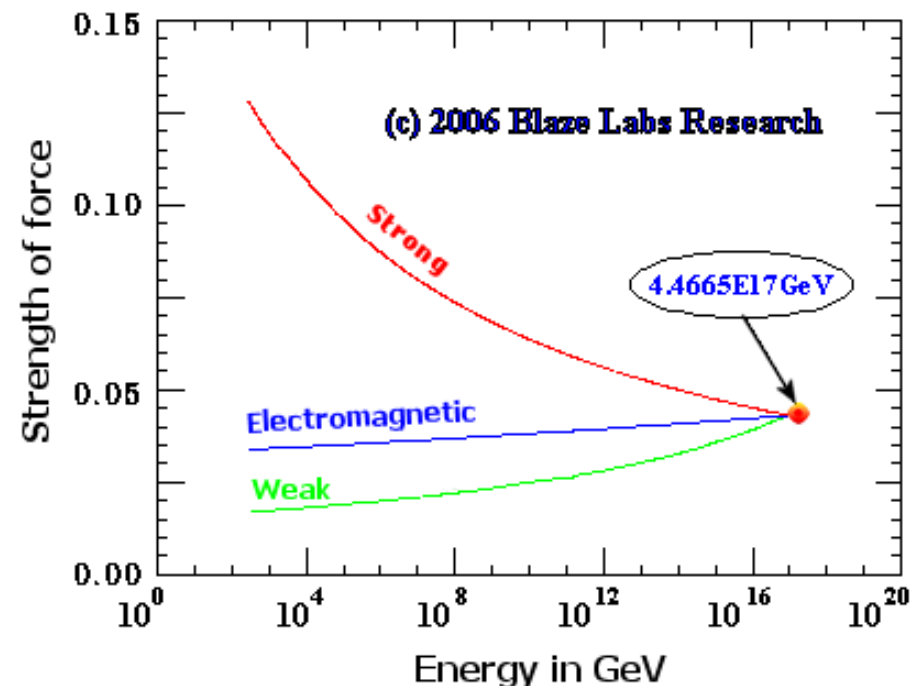
### De $t = 10^{-44}s$ à $t = 10^{-35}s$ : LA PÉRIODE DE GRANDE UNIFICATION

- **TGU** (les théories de Grande Unification) **GUT** (pour Grand Unified Theory en anglais)
- **Hypothèse** : à l'origine de l'univers, les conditions extrêmes de température et de pression étaient telles que 3 des interactions fondamentales(\*) étaient réunies en une seule. (cette explication est schématique et très simplifiée)

(\*) Les 3 interactions fondamentales du 'GUT'

- L'interaction forte
- L'interaction faible
- L'interaction électromagnétique

#### Merging of forces at high energy levels



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### Illustration complémentaire sur les 4 interactions fondamentales

(\*) Les 4 interactions fondamentales

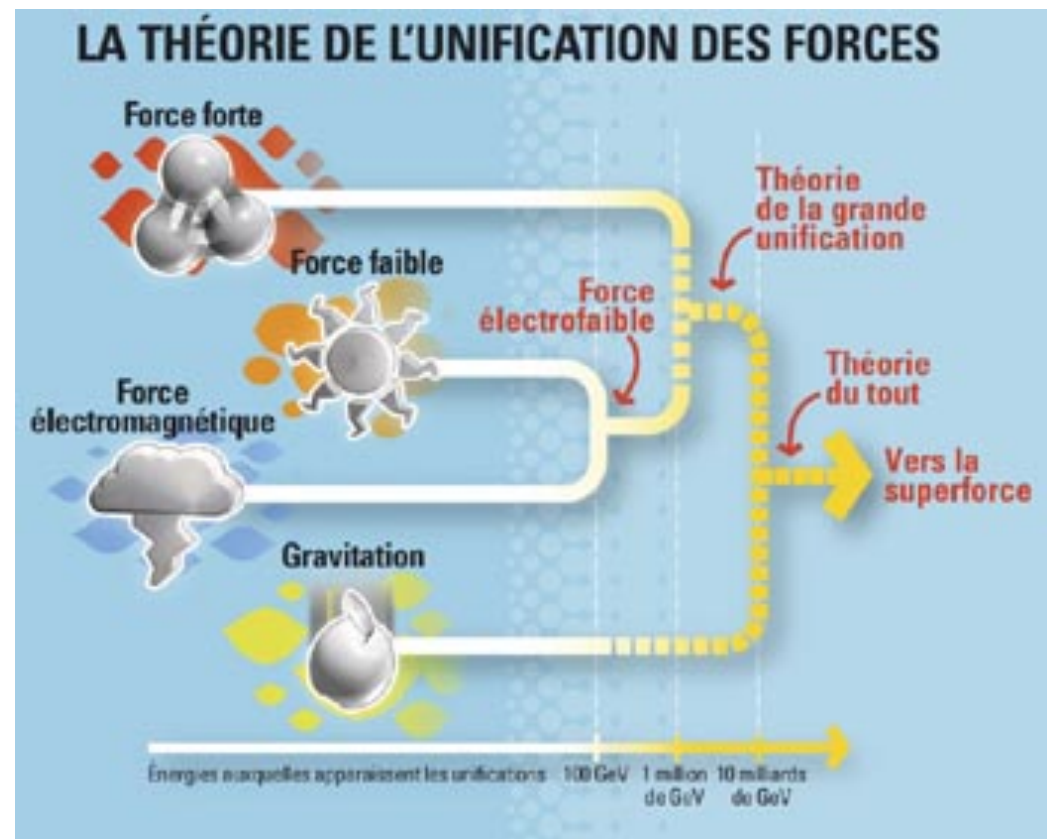
- Force forte
- Force faible
- Force électromagnétique
- Force de gravitation

La force électro-faible, regroupement de :

- Force faible
- Force électromagnétique

Schéma ci-contre:

Source : CNRS

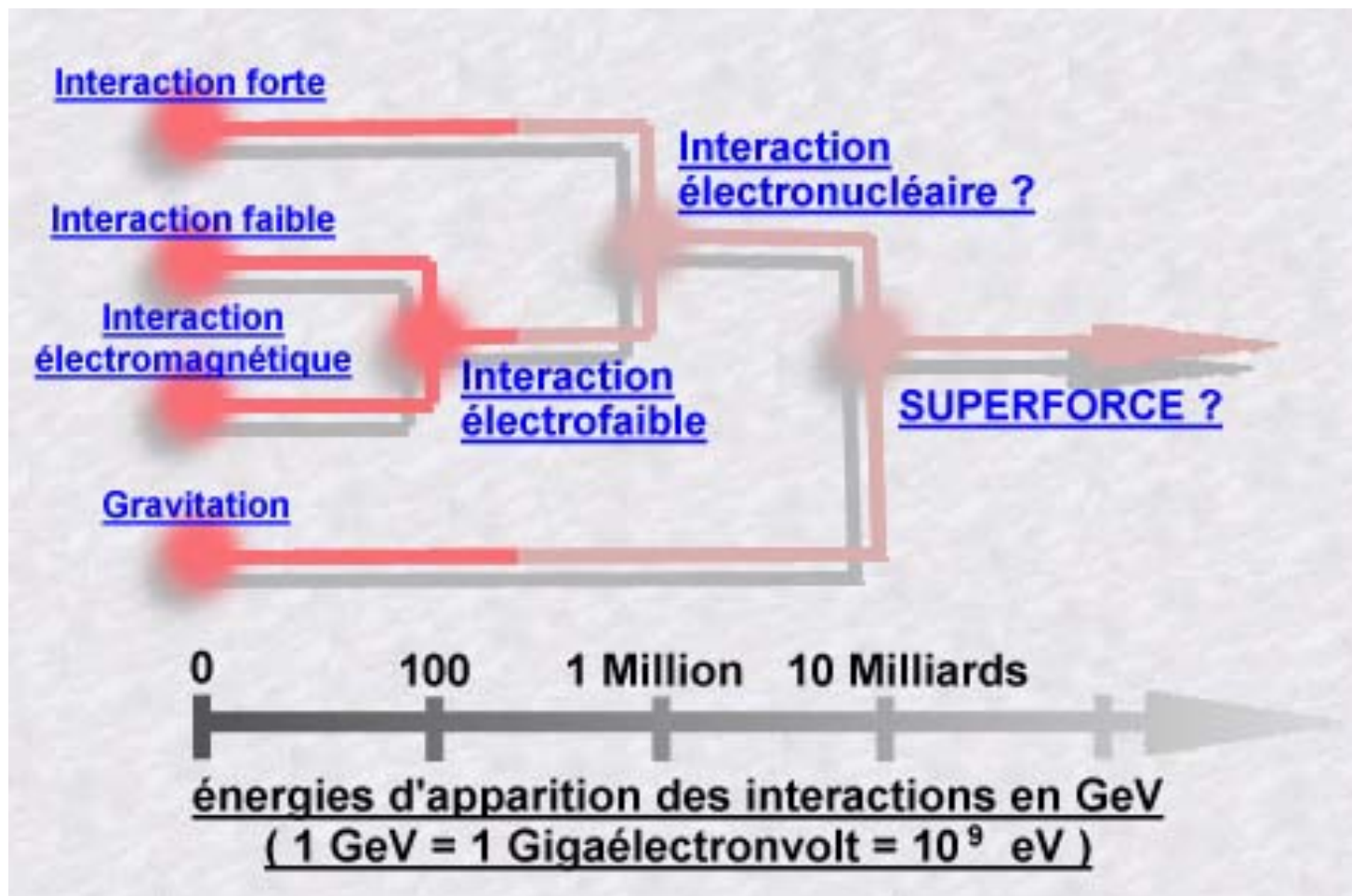


■ A chaque fois qu'il y a libération d'une forme d'interaction, on dit qu'il y a une '**brisure de symétrie**'.

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### Illustration complémentaire sur les 4 interactions fondamentales





# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### De $t = 10^{-35}s$ à $t = 10^{-33}s$ : LA PÉRIODE D'INFLATION

- **l'interaction forte prend son autonomie.** C'est la fin de la grande unification.
- INFLATION : Dilatation fulgurante de l'univers :
  - volume augmente de manière exponentielle en une fraction de seconde
  - => à une vitesse bien plus grande que  $c$
- Avant cette dilatation, la concentration de l'univers était telle qu'elle a permis les échanges thermiques entre les différents constituants de l'univers qui font que l'univers est isotrope.
- A ce stade de l'évolution de l'univers celui ci devait être constitué d'une multitude de particules et antiparticules dont probablement certaines qui nous sont inconnues. ('soupe' de quarks, leptons, radiation, particules inconnues)

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### A partir de $t = 10^{-33}s$

- Depuis la fin de l'inflation, l'Univers poursuit son expansion à un rythme beaucoup plus raisonnable. Les quarks, futurs constituants des protons et des neutrons dans les noyaux d'atomes, cohabitent et s'annihilent avec leurs antiquarks.
- Principalement : formation de protons et neutrons à partir de 3 quarks respectivement, mais totalement instables ( $T^\circ$  trop élevée)

### A partir de $t = 10^{-11}s$ : DÉDOUBLEMENT DE LA FORCE ÉLECTROFAIBLE

- **brisure de symétrie:**
  - distinction entre :
    - la **force électromagnétique**
    - la **force nucléaire faible**

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

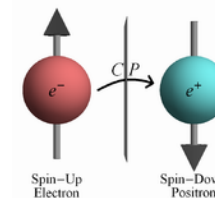
## L'ère opaque du rayonnement

### A partir de $t = 10^{-5}s$ ( $T^\circ = 3000$ milliards K ) BARYOGENÈSE

- Formation de **protons et de neutrons stables**
- IMPORTANT: car à cette période **s'est formé un léger excès de matière (par rapport à l'antimatière)**
- Observations actuelles : dans l'univers observable, les particules d'antimatière ne représenteraient qu'au plus un millionième du nombre de particules de matière.
- Cette asymétrie peut être expliquée par une **violation de la symétrie CP**.

Cfr. Physique des particules

Schéma ci-contre: La fonction de symétrie  $CP$  inverse l'axe dans l'espace d'une particule et donne une antiparticule.  
Ici, un électron de spin-up devient un positron de spin down.



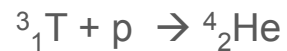
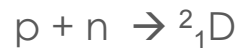
# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### A partir de $t = 3$ min : LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE

- À pd 15s  $\rightarrow T^\circ \approx 3$  milliards K  $\rightarrow$  noyaux deutérium (1p, 1n) mais durée de vie très brève
- À pd 3 min  $\rightarrow T^\circ \approx 1$  milliard K  $\rightarrow$  noyaux tritium (1p, 2n) et d'hélium (2p, 2n) stables  
mais pas en grande quantité puisque formés à pd D.

On a :



Rem. Pq pas l'H ?

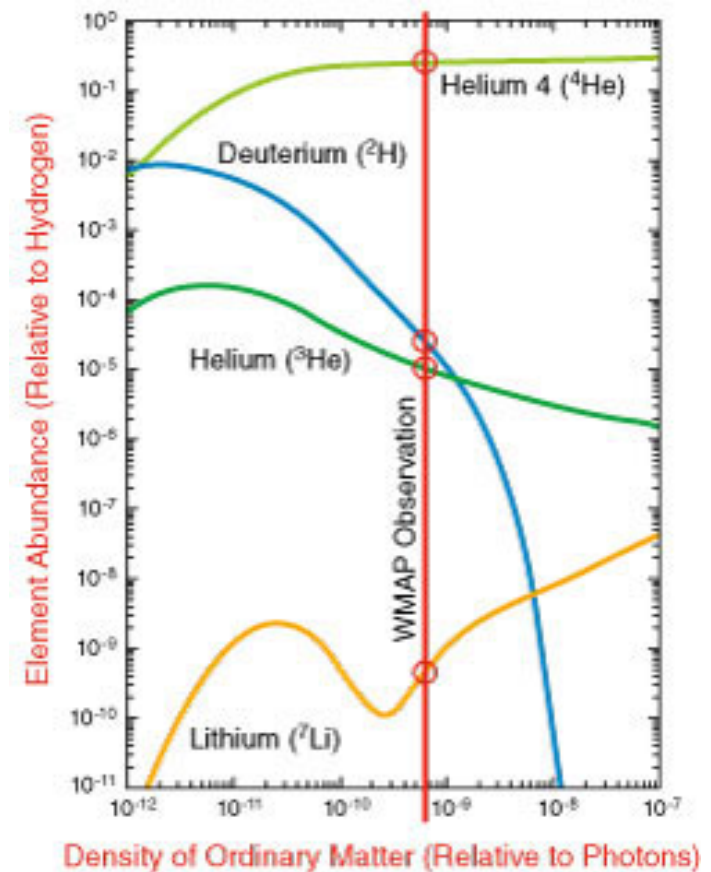
- La théorie du Big Bang prévoit que lors des premières minutes de l'expansion il y avait abondance d'hélium (1He/10p) + traces de Lithium  $\rightarrow \approx 20\%$  He (relativement à l'H (p et n))
- Les observations sont en parfait accord avec les prédictions théoriques

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'ère opaque du rayonnement

### A partir de $t = 3$ min : LA NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE : abondance des éléments légers

- L'abondance prédite du deutérium, l'hélium et le lithium dépend de la densité de la matière ordinaire dans l'univers primordial, comme le montre la figure à gauche. Ces résultats indiquent que l'abondance de l'hélium est relativement insensible à l'abondance de la matière ordinaire, au-dessus d'un certain seuil. Les prédictions prévoient qu'environ 24% de la matière ordinaire dans l'univers correspond à l'hélium produit dans le Big Bang. Ceci est en très bon accord avec les observations et est une bonne preuve de la validité de la théorie du Big Bang.
- Le satellite WMAP est capable de mesurer directement la densité de matière ordinaire et trouve une valeur de  $4,6\%$  ( $\pm 0,2\%$ ), indiquée par la ligne verticale rouge sur le graphique. Cela conduit aux abondances prédites indiquées par les cercles dans le graphique. Celles-ci sont en bon accord avec les abondances observées.
- Ceci constitue une preuve de la validité de la théorie du Big Bang



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT AU RAYONNEMENT

### A partir de à $t = 380.000$ ans : L'UNIVERS TRANSPARENT AU RAYONNEMENT

- **Jusque là,** : il y a : p, n, e-, noyaux D, T, He + traces Li

#### LES ÉLECTRONS NE SONT PAS LIÉS AUX NOYAUX !

→ interactions des photons avec les noyaux positifs et les e-

→ les photons ne peuvent pas s'échapper (ils sont 'prisonniers de la matière')

→ on dit que l' **UNIVERS EST 'OPAQUE' AU RAYONNEMENT**

- Il faut attendre  **$T \approx 3000^\circ\text{K}$  (càd  $> 300.000$  années)** pour que les e- puissent commencer à se lier aux nucléons

- **Au fur et à mesure de l'expansion et de la combinaison des e- avec les noyaux positifs**, la probabilité d'interaction des photons présents devient pratiquement nulle. Et il est arrivé un moment (à  $t=380.000$  années) où :

→ **L'UNIVERS EST DEvenu TRANSPARENT AU RAYONNEMENT**

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

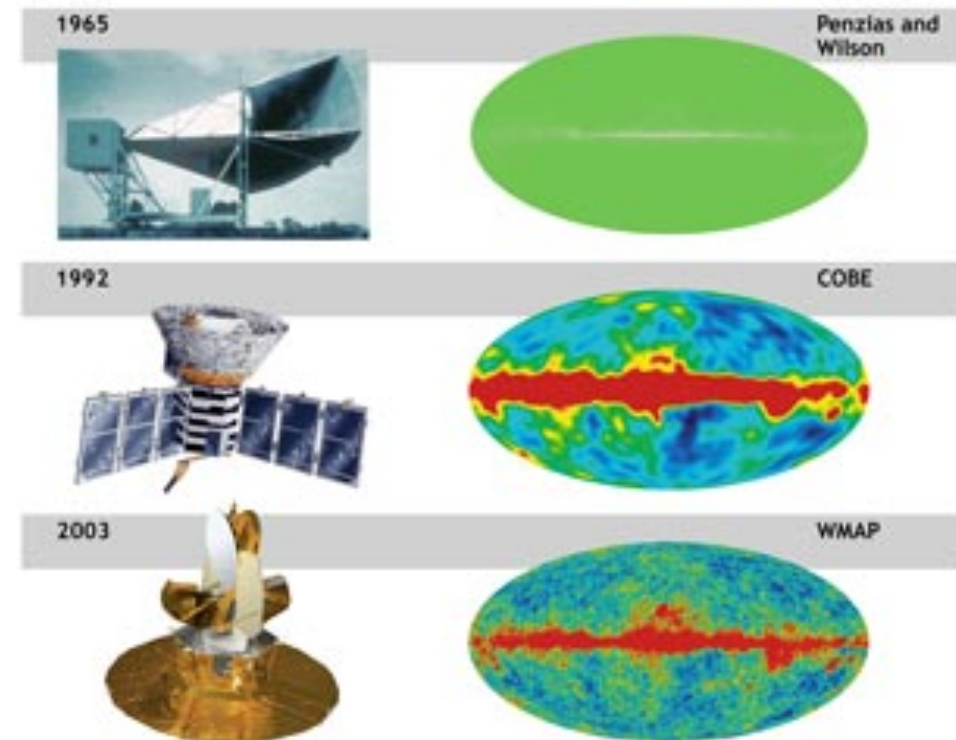
## L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT AU RAYONNEMENT

**A partir de à  $t = 380.000$  ans : L'UNIVERS TRANSPARENT AU RAYONNEMENT**

- Ce « **RAYONNEMENT FOSSILE** » est appelé le « **fond diffus de rayonnement cosmologique** » (CMB: COSMIC MICROWAVE BACKGROUND)

Rem. Le **CMB** avait été prédit par Geroge Gamow en 1940, ainsi que par Georges Lemaître . Il **fut détecté pour la première fois en 1964** par Arno Penzias et Robert Wilson.

Par la suite, des mesures de plus en plus précises du CMB ont été données par les satellites **COBE (1992)** et **WMAP (2003)**, comme l'illustre la figure ci-contre.



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## La formation des étoiles et des galaxies

### A partir de $t =$ environ 1 milliard d'années, La formation des étoiles et des galaxies

- Rappel : D'où proviennent ces fluctuations ? Il s'agit de fluctuations infimes qui se sont formées à l'époque où l'univers était à l'échelle microscopique, avant l'inflation. Suite à l'inflation, ces hétérogénéités se sont amplifiées à une échelle comparable à aux ordres de grandeurs des galaxies et amas de galaxies. Rem. Le CMB montre des petites fluctuations responsables de la formation des galaxies.

- **Schéma de la formation ascendante** (des + petites aux plus grandes structures):

petites galaxies → galaxies + grosses → amas de galaxies

les étoiles se forment à l'intérieur des galaxies

Rem. Il existe encore aujourd'hui des amas en cours de formation, alors qu'il existe de très vieilles galaxies



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## La formation des étoiles et des galaxies

### A partir de $t =$ environ 1 milliard d'années, La formation des étoiles et des galaxies

#### ■ Formation des galaxies :

Variations locales de la densité de matière → force d'attraction entre les molécules gazeuses

→ accentuation des fluctuations de densité (augm. ou dimin. des densités spatiales)

→ là où densité plus élevée, la gravité va attirer les molécules aux alentours et le phénomène s'amplifie

→ en même temps, l'amas de gaz comprimé exerce une pression thermique, et a donc tendance à provoquer une expansion (qui s'oppose à la gravitation)

Condition pour qu'une galaxie se forme : la gravité doit pouvoir contracter un nuage de gaz. Or pour que la gravitation commence à l'emporter sur la pression d'expansion, il faut une masse minimum (appelée *masse de Jeans*) égale à environ 1 million de masses solaires.

→ formation de galaxies. D'abord les plus petites qui fusionnent ensuite en + grandes.

À ce stade, les nuages de gaz ne se sont pas fragmentés en étoiles.

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## La formation des étoiles et des galaxies

### A partir de $t =$ environ 1 milliard d'années, La formation des étoiles et des galaxies

*Au cours de la condensation, le gaz s'est échauffé. La température et la pression se sont élevées. En conséquence, le processus de contraction s'est arrêté.*

*Si la masse gazeuse est inférieure à mille milliards de masse solaire, alors elle se refroidit rapidement et se contracte en subissant une fragmentation en plusieurs masses (protoétoiles) qui conduiront à la formation des étoiles.*

#### ▣ **Grandes lignes du principe de formation des étoiles:**

*La fragment du nuage initial se condense sous l'effet de la gravitation → contraction*

*→  $P$  et  $T^\circ$  augmentent.  $T$  peut atteindre jusqu'à plusieurs millions de Kelvins*

*→ Déclenchement des réactions de fusion thermonucléaires : coeur=plasma de protons et neutrons qui se transforment en He AVEC grand dégagement d'énergie → l'étoile brille*

*→  $P$  et  $T^\circ$  augmentent → permet de résister à l'effondrement dû à la gravitation*

*→ Lorsque le combustible est épuisé → la gravitation prend le dessus → contraction*

*→  $P$  et  $T^\circ$  augmentent jusqu'à ce que  $T^\circ$  soit suffisante pour amorcer la fusion des noyaux plus massifs que les protons, à commencer par l'Hélium. (Si masse étoile  $> 8 m_S \Rightarrow$  cela peut se pépétrer jusqu'à formation de fer. Si masse étoile  $< 8 m_S \Rightarrow$  seulement jusqu'à la formation de carbone)*

# III. Etapes de l'évolution de l'univers

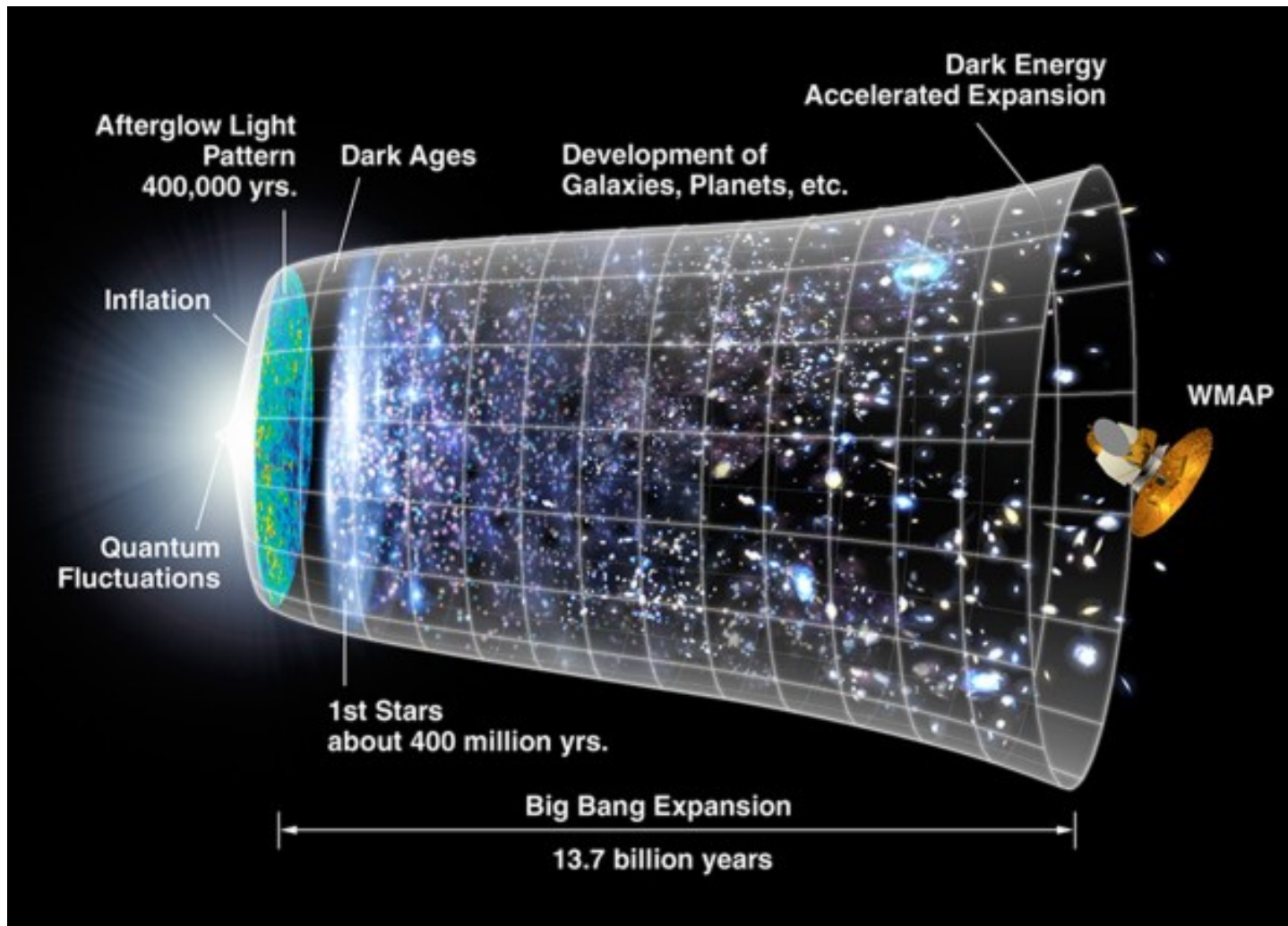
## Récapitulatif

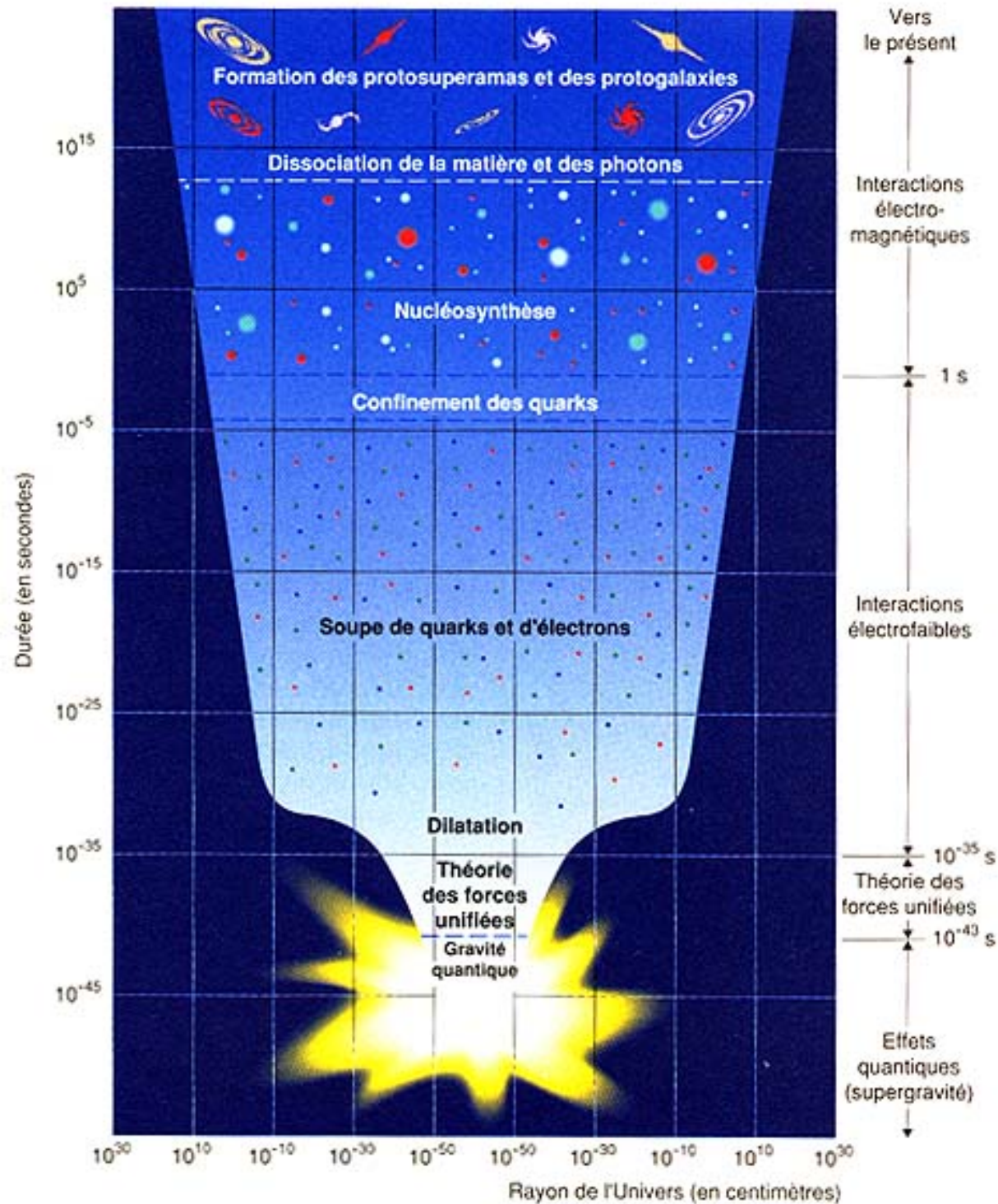
TABLEAU RÉCAPITULATIF DES ÉTAPES DE L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS :  
CONDITIONS DE TEMPÉRATURE ET D'ÉNERGIE CORRESPONDANTES.

Temps	T (°K)	E (GeV)
<b>L'ÈRE DE PLANCK <math>t &lt; 10^{-43}s</math></b>		
<b>De <math>t = 10^{-44}s</math> à <math>t = 10^{-35}s</math> : LA PÉRIODE DE GRANDE UNIFICATION</b>		
<b>De <math>t = 10^{-35}s</math> à <math>t = 10^{-33}s</math> : LA PÉRIODE D'INFLATION</b>	<b><math>10^{27}</math></b>	<b><math>10^{14}</math></b>
<b>A partir de <math>t = 10^{-33}s</math></b>		
<b>A partir de <math>t = 10^{-11}s</math> : DÉDOUBLEMENT DE LA FORCE ÉLECTROFAIBLE</b>		
<b>A partir de <math>t = 10^{-5}s</math> ( <math>T^{\circ} = 3000</math> milliards K ) BARYOGENÈSE</b>	<b><math>10^{13}</math></b>	<b>1</b>
<b>A partir de à <math>t = 3</math> min : LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE</b>	<b><math>10^{10}</math></b>	<b><math>10^{-3}</math></b>
<b>A partir de à <math>t = 380.000</math> ans : L'UNIVERS TRANSPARENT AU RAYONNEMENT</b>	<b>4000</b>	<b><math>10^{-9}</math></b>
<b>A partir de <math>t =</math> environ 1 milliard d'années, La formation des étoiles et des galaxies</b>	<b>70</b>	<b><math>10^{-11}</math></b>
<b>AUJOURD'HUI</b>	<b>2,7</b>	<b><math>10^{-12}</math></b>

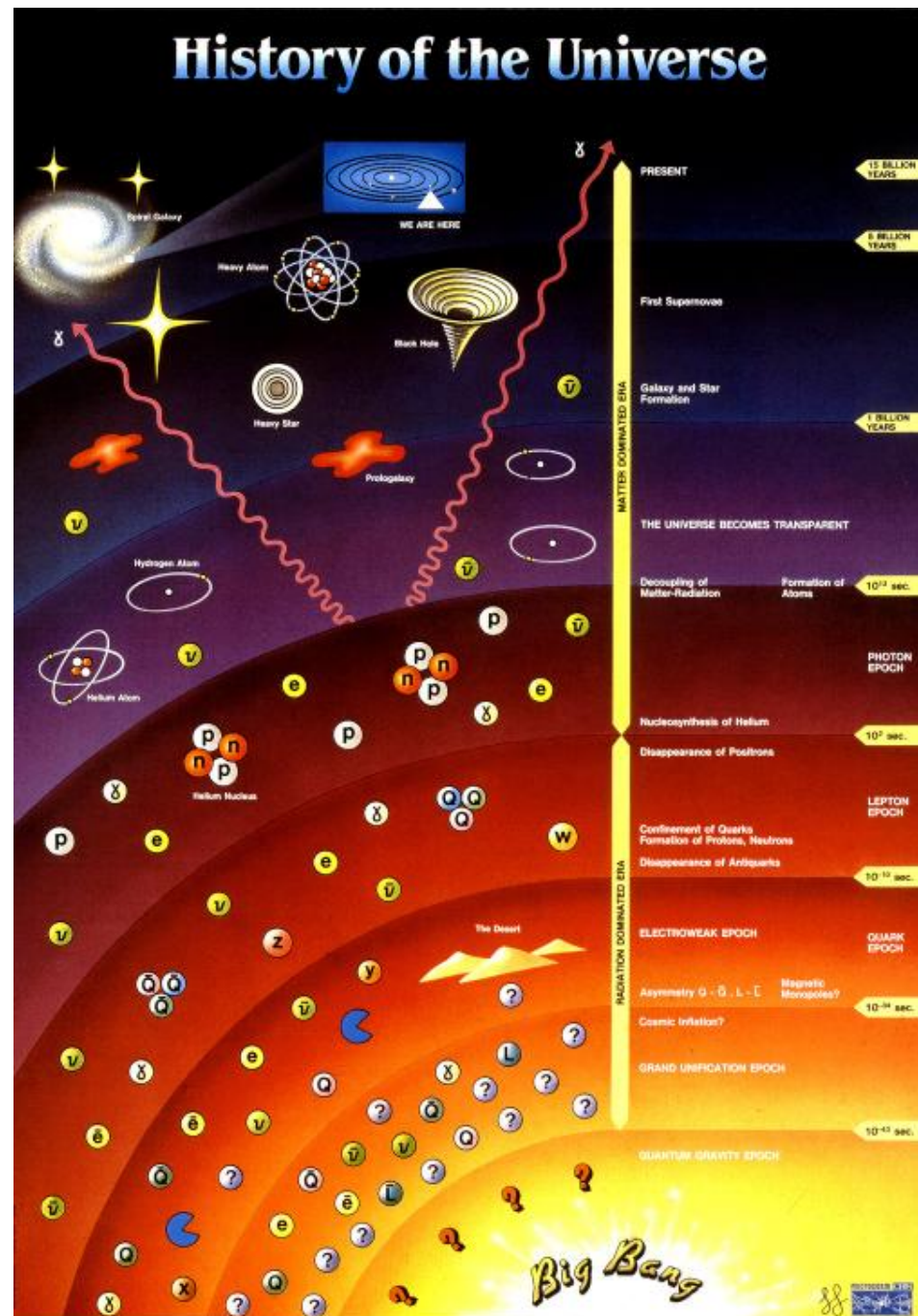
# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## Images





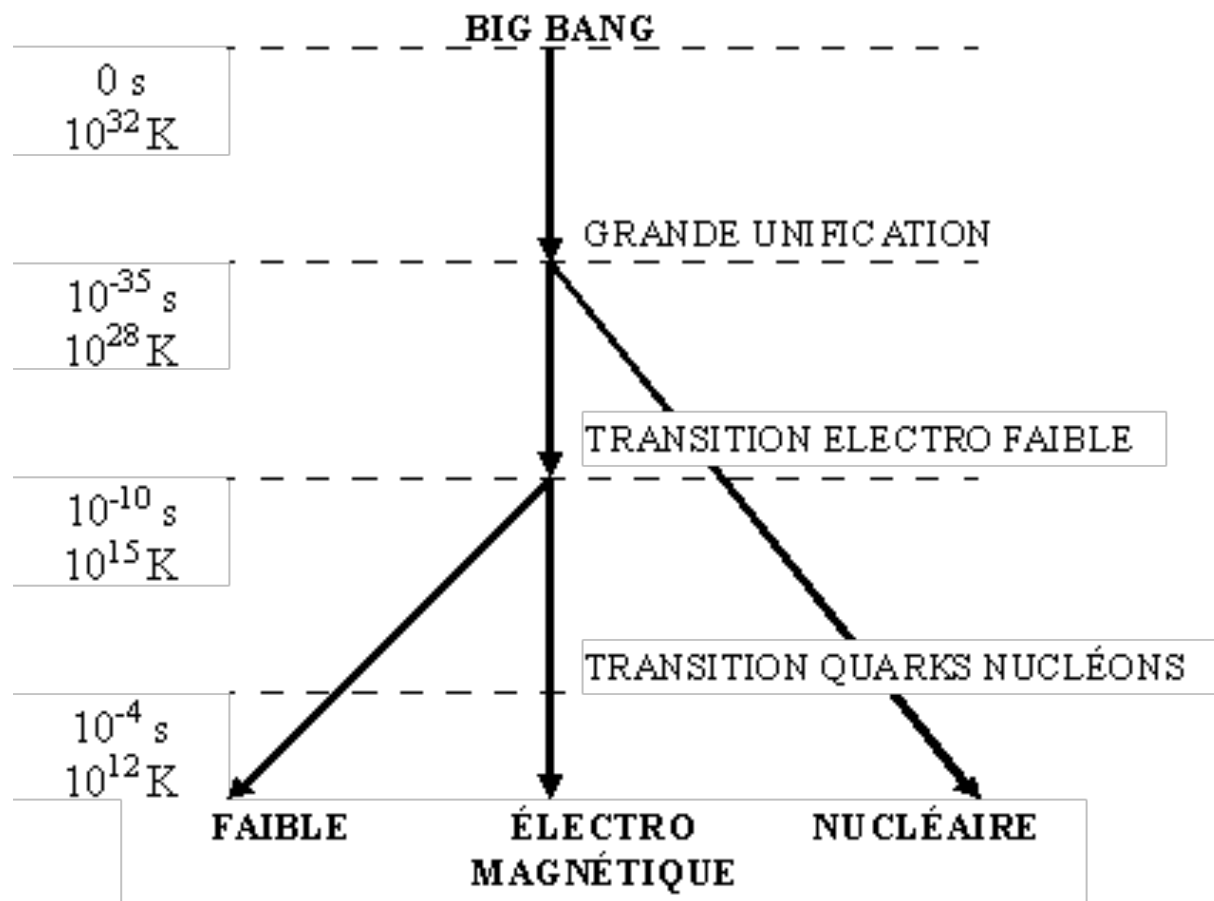
# History of the Universe



# III. Etapes de l'évolution de l'univers

## Récapitulatif

### RÉCAPITULATIF DE L'ÉVOLUTION DES INTERACTIONS FONDAMENTALES



# Plan

- I. Qu'est-ce que l'Univers ?
- II. Historique de la cosmologie
- III. Les grandes étapes de l'évolution de l'Univers
- IV. L'avenir de l'Univers**
- V. Annexes



# IV. L'avenir de l'univers

- L'évolution de l'univers est déterminée par une lutte entre la dynamique d'expansion et l'effet inverse (compression) de la gravitation.  
Le taux actuel de croissance est mesurée par la constante de Hubble, tandis que la force de gravité dépend de la densité et la pression de la matière dans l'univers.  
Si la pression de la matière est faible, comme c'est le cas avec la plupart des formes de la matière que nous connaissons, alors le destin de l'univers est régi par la densité.
  
- L'avenir de l'univers est directement lié à sa densité.
  - Si densité  $< \rho_c$   $\Rightarrow$  la force gravitationnelle ne serait jamais assez grande pour stopper ou inverser l'expansion. Au plus, elle pourrait ralentir le taux d'expansion.  
 $\Rightarrow$  l'univers s'étendrait indéfiniment, en se refroidissant ("Big Freeze")
  
  - Si densité  $> \rho_c$   $\Rightarrow$  il y aurait alors une masse suffisante dans l'univers qui permettrait de ralentir l'expansion jusqu'à l'arrêt, et finalement inverser la tendance.  
 $\Rightarrow$  l'univers finirait par s'effondrer sur lui-même ("Big Crunch")

## IV. L'avenir de l'univers

- Or, selon les diverses mesures prises par le satellite WMAP, l'univers est plat et sa densité est proche de la densité critique.

DANS CE CAS => l'univers va subir une expansion éternelle et un refroidissement progressif jusqu'à mort thermique.

Une étude plus poussée de l'énergie sombre avec de futures expériences et de missions spatiales est nécessaire pour comprendre sa nature et son effet sur le taux de expansion avenir..

# V. Annexe : SOURCES

- <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- <http://w3.iihe.ac.be/masterclasses/Document/bigbang-2009-01.pdf>
- <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig>
- WIKIPEDIA
- Livre : << *Pour comprendre simplement la naissance, la vie et la mort de l'univers* >> (2008)  
Auteur: Jean Hladik, Edition : Ellipses
- Livre : << *Introduction à la Physique moderne* >> (2008),  
Auteur: André Bellemans, Edition : CTPE Frameries
- Livre : << *PHYSIQUE – HECHT - Tome3 )- Physique moderne* >>,  
Auteur: Eugène Hecht, Edition : de boeck
- << L'invention du Big Bang >> article de JP Luminet
- <http://cosmbranche.free.fr/Evolution.htm>
- <http://www.syti.net/Evolution.html>