

ÈRE PLASMATIQUE

Ère radiative

Sommaire

1. Préambule.
2. Évolution.
 1. Plasma inerte (*modèle standard*).
 2. Plasma actif.
3. Conclusion.
4. Bibliographie.
5. Annexes.

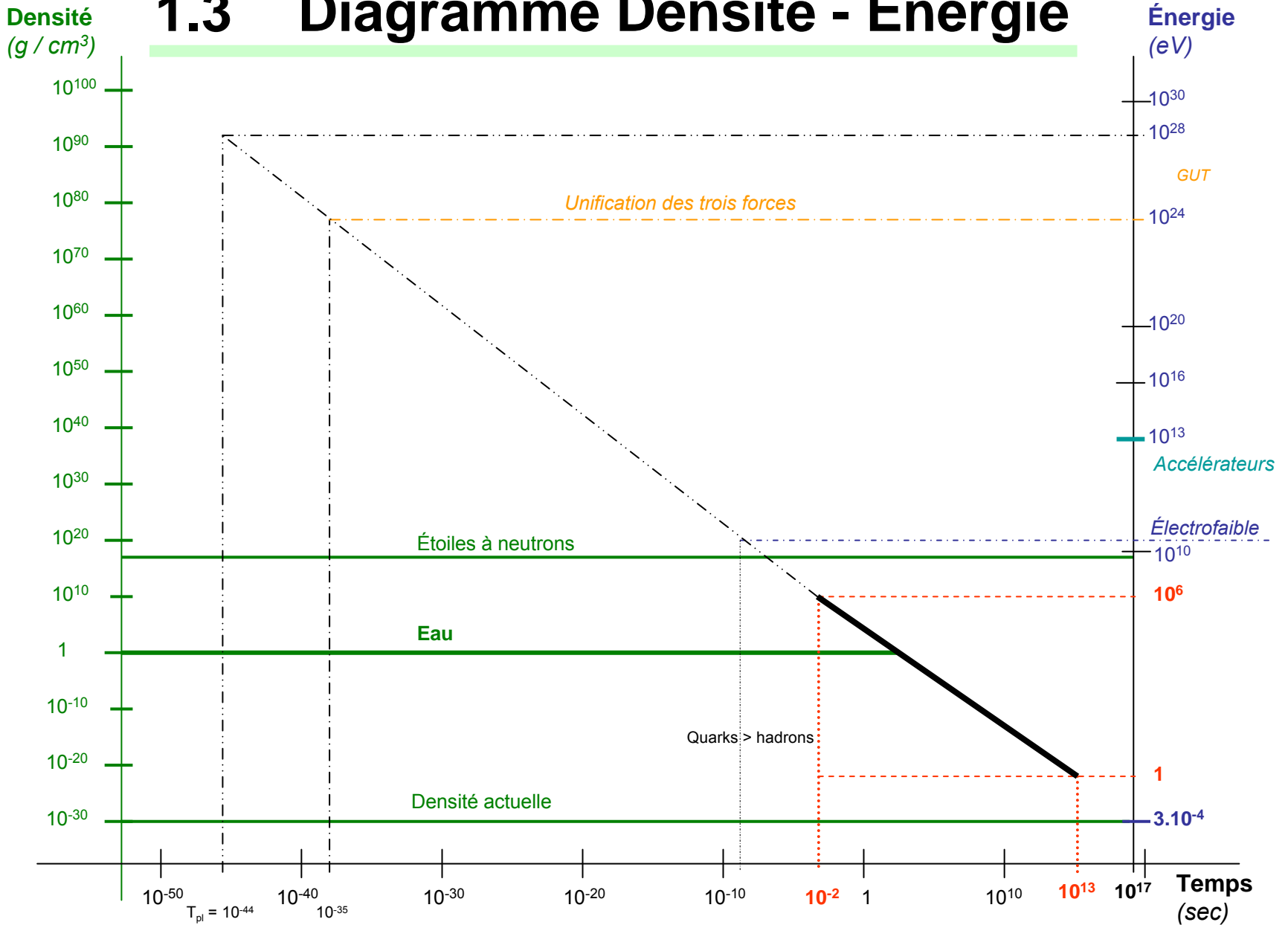
1.1 Définitions

- Plasma :
 - Gaz de particules électriquement chargées.
- Taux d'ionisation :
 - C'est la proportion de particules chargées contenues dans le plasma.
- Ère plasmatique :
 - 1^{ère} phase : $\sim \text{eV} < E < \sim 10^6 \text{ eV}$
 - 2^{ème} phase : $\sim 10^6 \text{ eV} < E < 10^9 \text{ eV}$ (*hadrons*)

1.2 Contraintes cosmologiques

- Uniformité du CMB.
- Formation des galaxies pour : $z > 3$.
- Structures supérieures aux superamas.
- Radiation X de fond homogène.
- Champs magnétiques inter super amas.
- Absence d'effet Sach-Wolf observé.
- Abondance des éléments légers.
- ...

1.3 Diagramme Densité - Énergie



1.4 Brisures de symétries

- $Mc^2 < kT$

Nucléons : $m_p c^2 \# 10^9 \text{ eV}$

$$T > 10^9 \text{ eV} \rightarrow n_p = n_{p^-} = n_\gamma$$

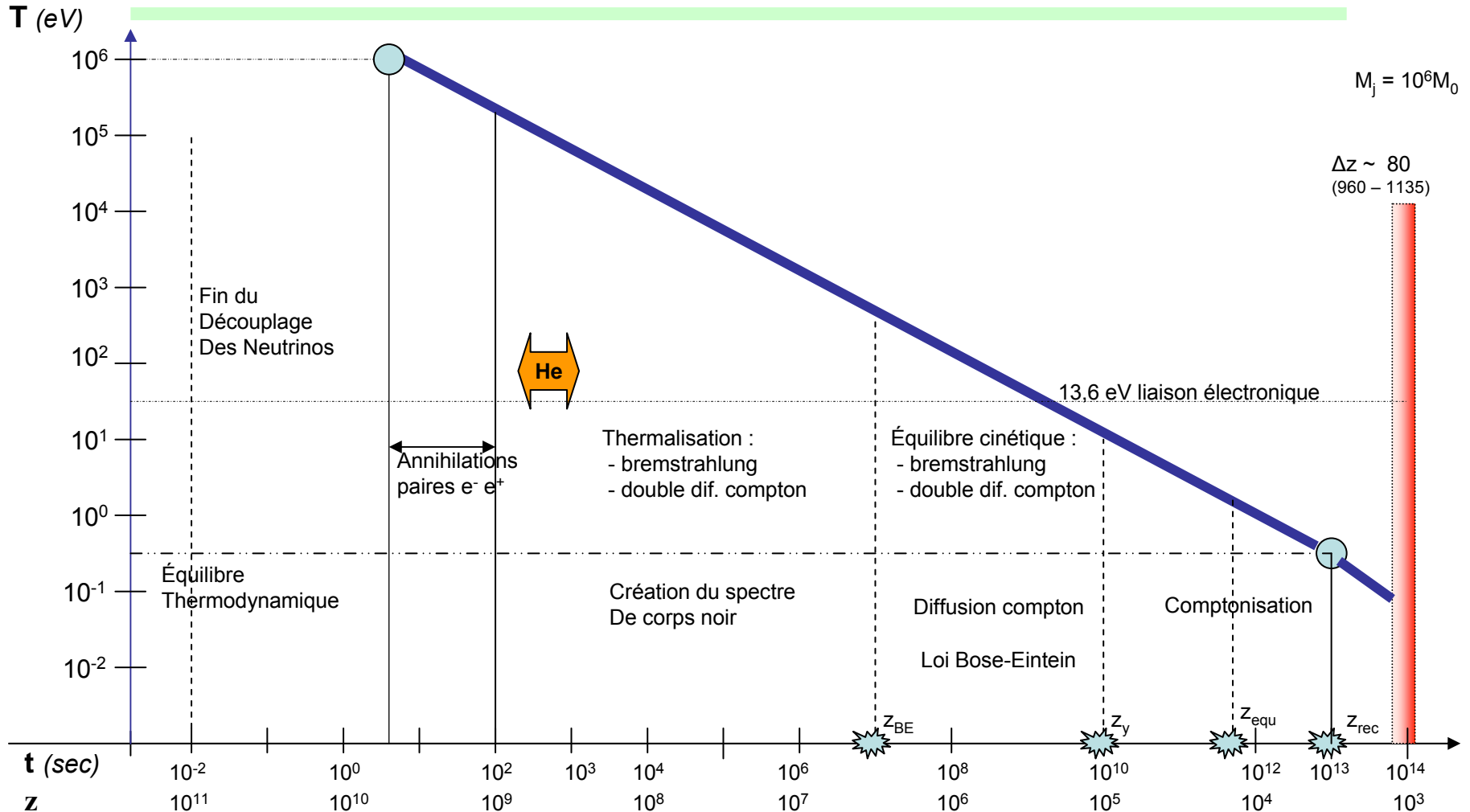
Électrons : $m_e c^2 \# 10^6 \text{ eV}$

$$T > 10^6 \text{ eV} \rightarrow n_e = n_{e^-} = n_\gamma$$

1.5 Paramétrage

| $t < t_{\text{rec}}$ | $t > t_{\text{rec}}$ |
|---------------------------------------|----------------------|
| $a(t) \sim \lambda \sim t^{1/2}$ | $a(t) \sim t^{2/3}$ |
| $T \sim t^{-1/2}$ | $T \sim t^{-2/3}$ |
| $\Omega_p \sim n^{1/2} \sim a^{-3/2}$ | |
| $Re \sim t^{1/2}$ | |

2.1.1 Diagramme d'évolution

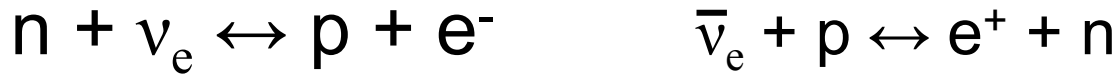


2.1.2 Annihilation

- $T > m_i$ création = annihilation
- $T < m_i$ la création n'est plus possible.
 - L'annihilation suit la loi :
 - $n_i / n_\gamma \sim (m_i / T)^{3/2} \exp(-m_i / T)$
 - Elle cesse lorsque le taux d'annihilation est égal au taux d'expansion (*Pour les nucléons $\sim 20 \cdot 10^6$ eV*).

2.1.3 Nucléosynthèse

Principales réactions avant 10^3 premières secondes :



- $p + n \leftrightarrow D + \gamma$ $p + p \leftrightarrow D + e^+ + \nu_e$
- $D + D \leftrightarrow {}^3\text{He} + n \leftrightarrow {}^3\text{H} + p$
- ${}^3\text{H} + D \leftrightarrow {}^4\text{He} + n$
- ${}^3\text{He} + D \leftrightarrow {}^4\text{He} + p$
- $D + D \leftrightarrow {}^4\text{He} + \gamma$

2.1.4 Deutérium

- Énergie de liaison :
 - $B_d = 2,23 \cdot 10^6 \text{ eV}$
- Température de synthèse :
 - $T_d \sim 0,8 \cdot 10^5 \text{ eV}$
 - A plus haute température le deutérium est photo dissocié.

2.1.5 Recombinaison

| Température °K | Hélium | Hydrogène |
|-------------------|---|-----------------------------|
| 10000 | He ⁺⁺ 50% He ⁺ 50% | H ⁺ 100% |
| 7000 | He 50% He ⁺ 50% | H ⁺ 100% |
| 4000 | He 100% | H ⁺ 50% H 50% |

2.1.6 Équilibre cinétique

- Processus « free-free »
 - Ou de freinage, ou bremsstrahlung
 - $e + p \rightarrow e + p + \gamma$
 - Efficace pour : $T \geq 10^4$ eV.
- Double diffusion Compton
 - $e + \gamma \rightarrow e + 2 \gamma$
 - Efficace pour : 10^4 eV $\geq T \geq 10^3$ eV ($z \sim 3 \cdot 10^6$)

2.1.7 Comptonisation

- Simple diffusion Compton
 - $e + \gamma \rightarrow e + \gamma$
 - Diffusion des photons sur les électrons libres.
 - Échange d'énergie cinétique entre matière et rayonnement.
 - Pas de création de photons.
 - Maintien du spectre de corps noir.

2.1.8 Distorsions

- Annihilation des électrons
 - $z \sim 10^9 - 10^{10}$
 - Production de photons de : 10^6 eV
- Nucléosynthèse
 - Production de photon de :
 - $\Delta U / U \sim 2 \cdot 10^{-7} \cdot \Omega \cdot h^2$ (Valeur négligeable)

2.1.9 Structures

- Condensation linéaire :
 - Pression + Gravitation + Expansion
- Critère de Jeans :
 - Seule une fluctuation de masse $> M_j$ peut se condenser.

$$M_j = 4\pi/3 \cdot L_j^3 \cdot \rho_0 \quad L_j = C_s (\pi / G \rho_0)^{1/2}$$

avec : $C_s^2 = p_1 / \rho_1 = (dp / d\rho) \rightarrow (C_s \sim c \ 3^{-1/2}$ pour $t > t_{rec}$)

| | | |
|-----------------|--------------------|--|
| $t < t_{rec} :$ | $M_H \sim t^{3/2}$ | $M_j \# M_H \gg 10^{11} M_s$ |
| $t = t_{rec} :$ | $M_j \# 10^6 M_s$ | et $L_j = 10 \text{ kpc}$ |
| $t > t_{rec} :$ | $M_H \sim t$ | et $M_j \sim t^{-1} \quad M_j \ll M_H$ |

2.1.10 Structures

- **Modèle HDM :**
 - Inaptitude à produire à temps des dimensions galactiques.
- **Modèle CDM :**
 - Incompatible avec les structures > 100 Mpc.
 - Vitesse propre des galaxies trop faible.
 - Apparition des galaxies seulement à $z \sim 2$.

2.2.1 Champs magnétique

- Génération :
 - Turbulences primordiales.
 - Flux de photons.

2.2.2 Structures d'un plasma

- Deux modélisations des turbulences :
 - Représentation par modes de Fourier.
 - Les théories statistiques basées sur cette représentation sont incapables de prédire la formation de filaments.
 - Représentation par vortex ou fonctions δ .
 - Ce mode fait apparaître une tendance à l'auto organisation du plasma mais est limité aux petites structures alors que la théorie en fait apparaître aux grandes échelles.

2.2.3 Vortex



2.2.4 Longueur de Debye

- Elle mesure la portée du champ créé par une charge électrique :

- $\lambda_D = 6,92 (T / n_e)^{1/2}$

- Pendant l'ère plasmatique :

- $T_\gamma \sim t^{-1/2}$; $a_{(t)} \sim t^{1/2} \rightarrow n_e \sim t^{-3/2}$

- $\lambda_D \sim t$

- T en $^\circ K$; t en sec. ; n_e nombre de charges ; λ_D en cm.

2.2.5 Fluctuation magnétique

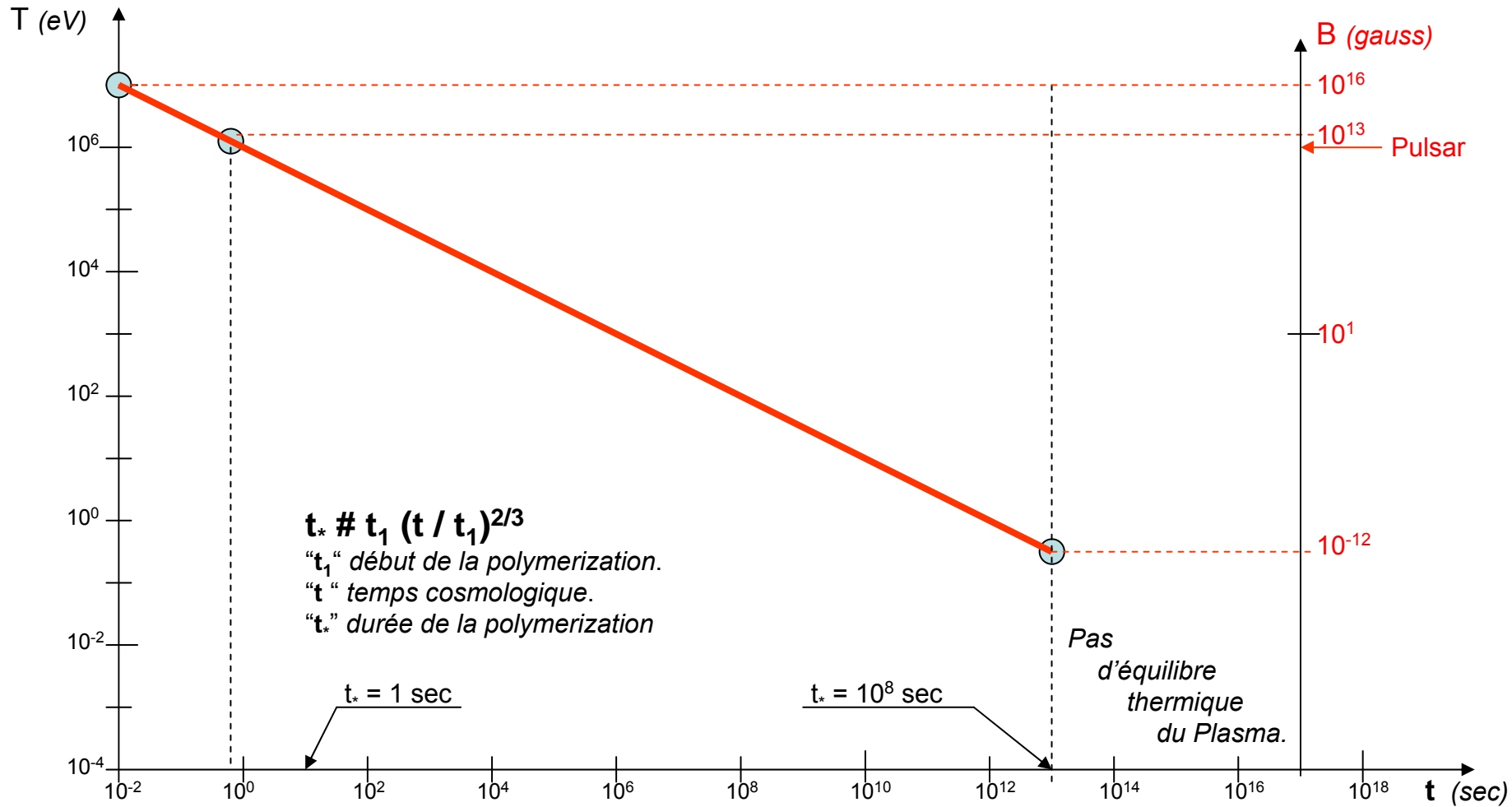
- Taille :

- $\lambda_{(\tau)} = 2 \pi (c / \omega_p) (\eta \tau)^{1/2}$

- Durée de vie :

- $\tau \sim \lambda^2$

2.2.6 Champ magnétique



2.2.7 Détection

- Radiation synchrotron.
 - Émission directive des électrons relativistes spiralant le long des lignes de force.
 -
- Effet Faraday.
 - Rotation de la polarisation des photons traversant un champs magnétique.

2.2.8 Création du rayonnement

- Annihilation
 - matière antimatière.
 - Spontanée.
- ΔE de particules chargées :
 - Capture ou éjection électronique.
 - Bremstrahlung ou de freinage.
 - Émission cyclotron (ou synchrotron).

2.2.9 Spectre de corps noir

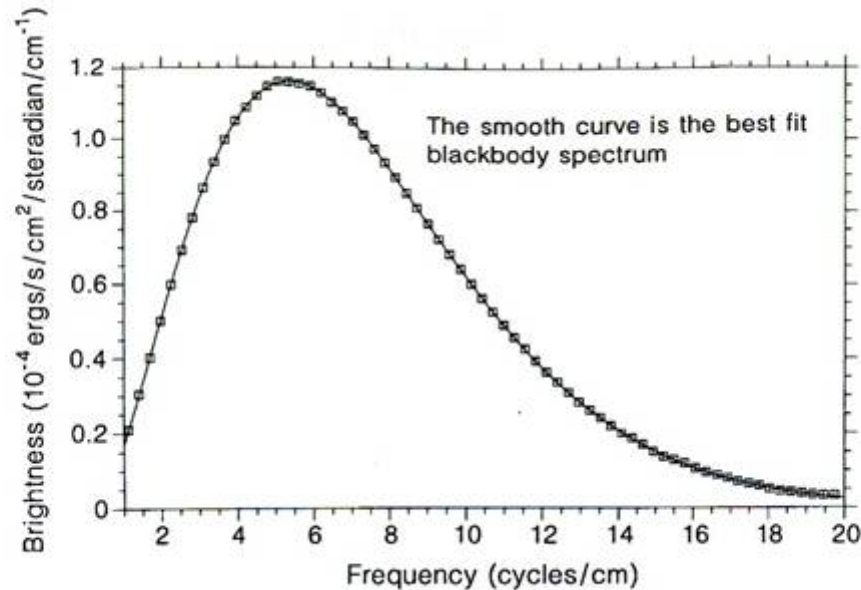
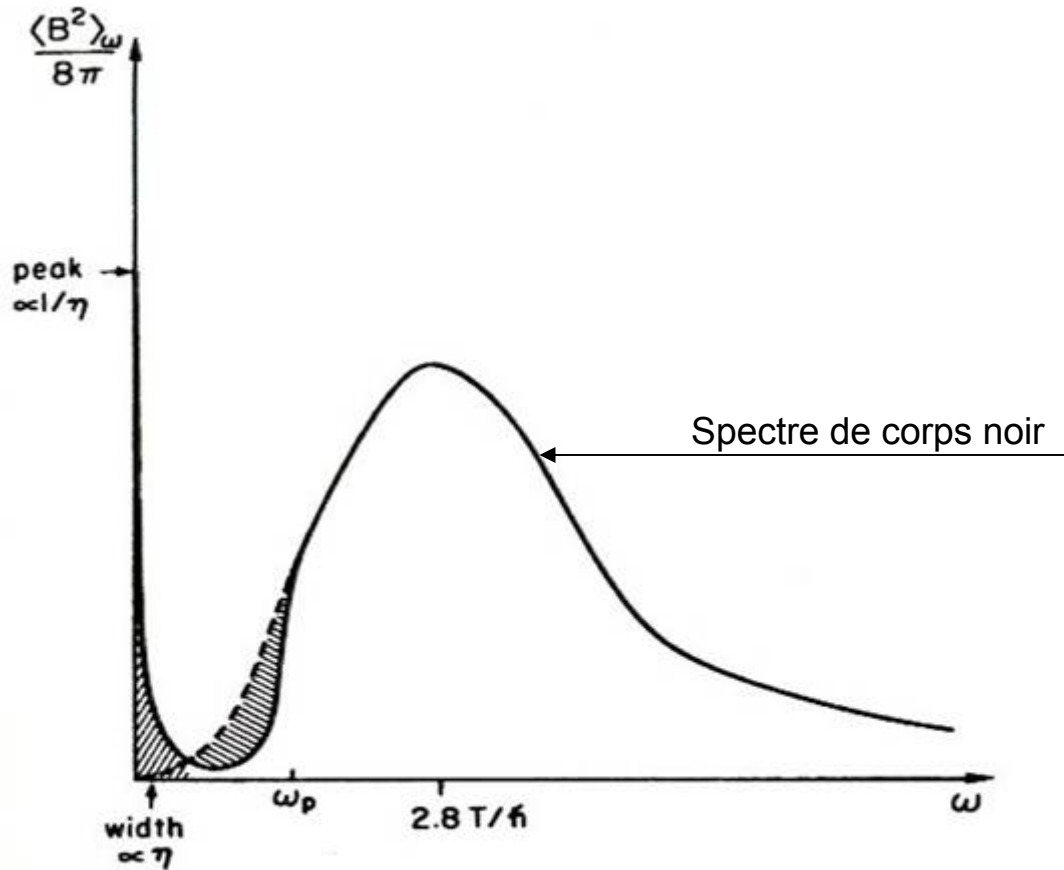


Fig. 2.39. The spectrum of the cosmic microwave radiation as obtained by COBE during a 9 min observation which included the Galactic North Pole. The error boxes of the individual measurements are all in perfect agreement with a theoretical blackbody radiation curve of a temperature $T = 2.728$ K (*solid line*). This perfect fit finds a natural explanation in the hypothesis of a “hot big bang”: The universe has gone through a hot early phase of thermodynamic equilibrium which was almost structureless (Courtesy of the COBE collaboration [Mather et al. 1990])

2.2.10 Spectre magnétique



ω_p est la fréquence plasma

2.2.11 Rayonnement X

- Origine :
 - Milieu intergalactique diffus (*présence de champs magnétiques, qui n'exclut pas les sources discrètes*).
 - Sources discrètes (*quasars, galaxies de Seyfert*).

3. Épilogue

- Dans l'Univers le champ magnétique participe de façon majeur à :
 - La formation, le renforcement ou le maintien des structures et des objets astrophysiques.
 - La production de moyens efficaces pour convertir l'énergie gravitationnelle en énergie cinétique et rayonnement.
 - L'évolution de l'Univers et de ses composantes.

4. Bibliographie 1

- 4.1.1 « Plasma Astrophysics »
 - T.Tajima et K. Shibata
 - Perseus Publishing Cambridge 2002

- 4.1.2 « Le Rayonnement Cosmologique »
 - M. Lachièze-Rey et E. Gunzig
 - Masson 1995

4. Bibliographie 2

- 4.2.1 « The Early Univers »
 - G. Börner
 - Springer (4^e édition) 2003

- 4.2.2 « An Introduction to Cosmologie »
 - J.V. Narlikar
 - Cambridge (3^e édition) 2002

4. Bibliographie 3

- 4.3.1 « Cosmological Physics »
 - John A. Peacock
 - Cambridge University Press 2001

- 4.3.2 »Handbook of Astrophysics »
 - Martin V. Zombeck
 - Cambridge University Press 1990

5. Annexes 2

- 5.2.1 L'effet Sachs-Wolfe
 - Effet gravitationnel sur les photons, d'une fluctuation relative de densité.
- 5.2.2 L'effet Sunyaev-Zeldovich
 - Fluctuation due à la traversée, par les photons, d'une zone de matière chaude ionisée.

5. Annexes 3

- 5.3.1 z_{equ} : équivalence matière rayonnement,
$$z_{\text{equ}} = 3.10^4 . \Omega . h^2 \qquad L_{h \text{ equ}} \sim 10 \text{ Mpc}$$
- 5.3.2 z_y : fin de l'ère Bose-Einstein
- 5.3.3 z_{rec} : recombinaison ($1500 > z > 1200$).
- 5.3.4 $z > z_{\text{BE}} \sim 3.10^6$ création du spectre de corps noir ($z < z_{\text{BE}}$: efficacité des réactions insuffisante) .

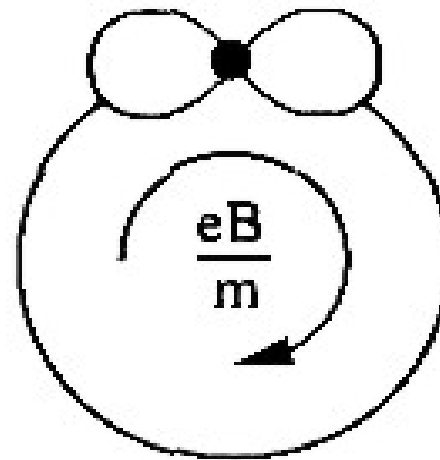
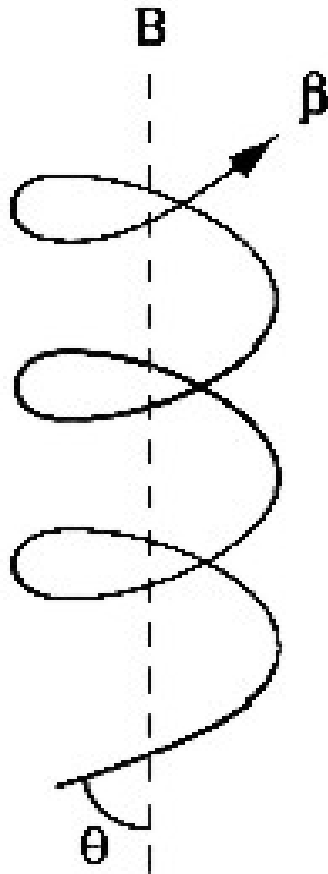
5. Annexes 4

- Interactions fondamentales :
 - Forte 1
 - Electromagnétique 10^{-2}
 - Faible 10^{-5}
 - Gravitationnelle 10^{-39}

5. Annexes 5

- $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$
- $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$
- $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$
- $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$
- $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ $1\text{eV} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$
- Dans l'homme : $N_p = 10^{28}$
- 1 an = $3 \cdot 10^7$ secondes.

5.6 Radiation Cyclotron*



* *Synchrotron lorsque l'électron est relativiste*

5.8 Paramètres magnétiques

- β = Pression du plasma / Densité d'énergie magnétique

Pour β grand \rightarrow formation principalement de filaments.

Pour β petit \rightarrow formation principalement de structures cellulaires.

L'état d'équilibre thermique, est celui où le chaos est maximum. Aucune structure n'est autorisée (*statistique de Gibbs*).