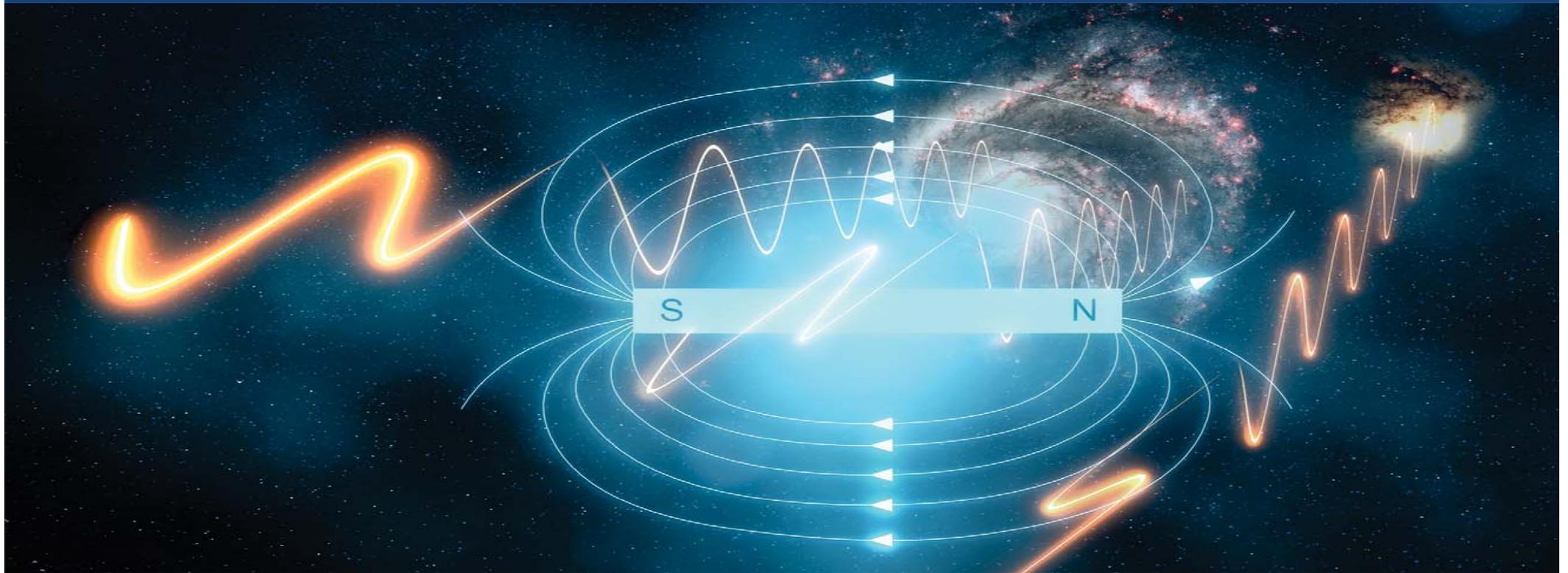


Réionisation et champs magnétiques



Mathieu Langer

Institut d'Astrophysique Spatiale

Université Paris-Saclay

20 janvier 2020

Collège de France – Séminaire du cours de Françoise Combes



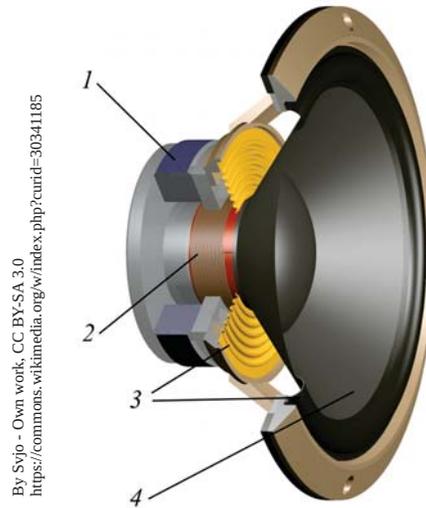
université
PARIS-SACLAY

FACULTÉ
DES SCIENCES
D'ORSAY

Champ magnétique : quelques repères aux petites échelles



$B \sim 5 \text{ mT}$



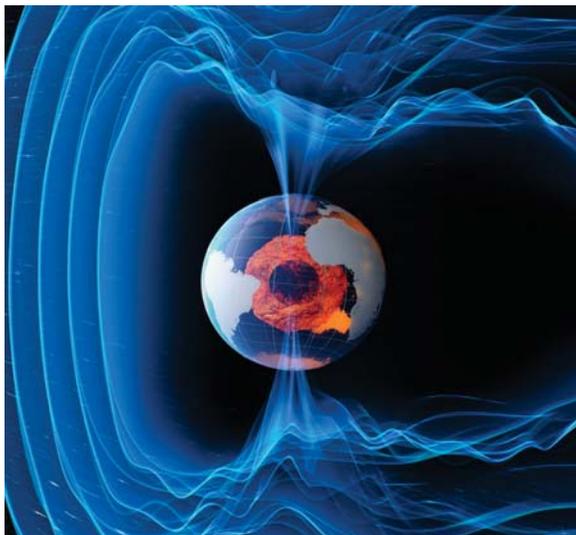
By Syjo - Own work, CC BY-SA 3.0
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30341185>

$B \sim 1 - 2.4 \text{ T}$



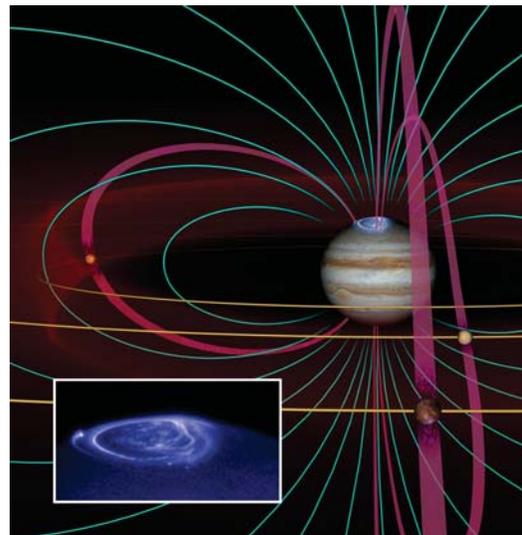
By Jan Ainali - Own work, CC BY 3.0
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3546051>

$B \sim 1.5 - 3 \text{ T}$



© ESA/ATG Medialab

$B \sim 25 - 65 \mu\text{T}$



© John Spencer/SWRI

$B \sim 428 \mu\text{T}$

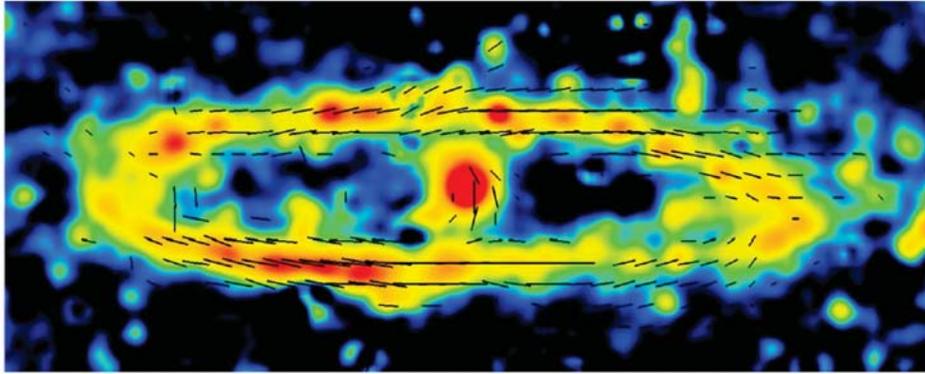


© NASA/SDO/AIA/LMSAL

$B \sim 10 \mu\text{T} - 0.3 \text{ T}$

Champs magnétiques galactiques

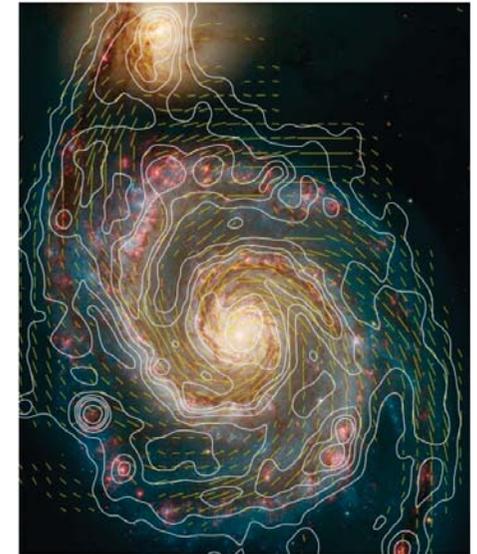
Andromède (M31)



Berkhuijsen et al (2003)

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

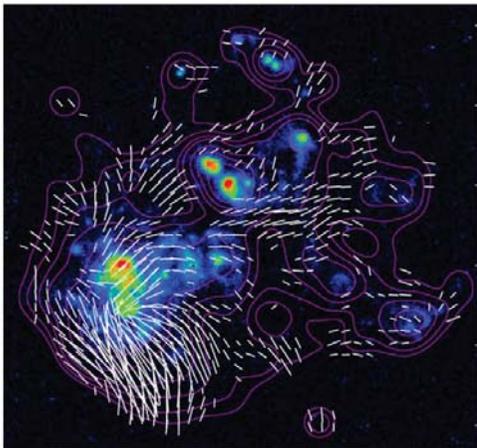
M51



Fletcher et al (2011)

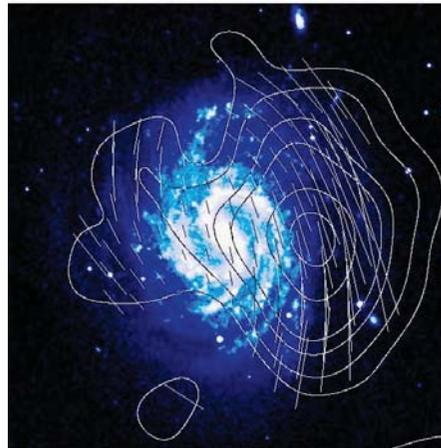
- $B \sim 1 - 60 \mu\text{G}$
- Forte corrélation avec la densité
- Motif souvent spiral, même dans galaxies irrégulières !
- Hors du disque : champ du halo, forme X

IC10



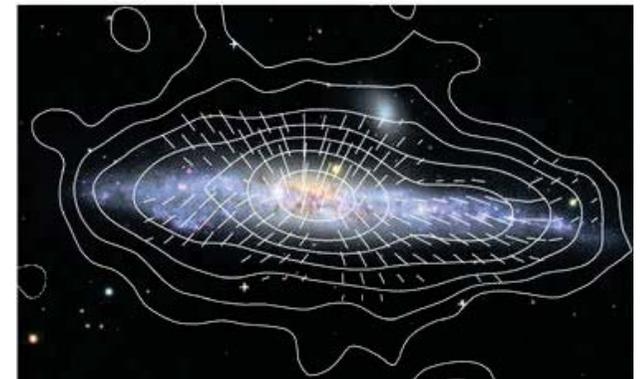
Chyży (2005)

NGC4535



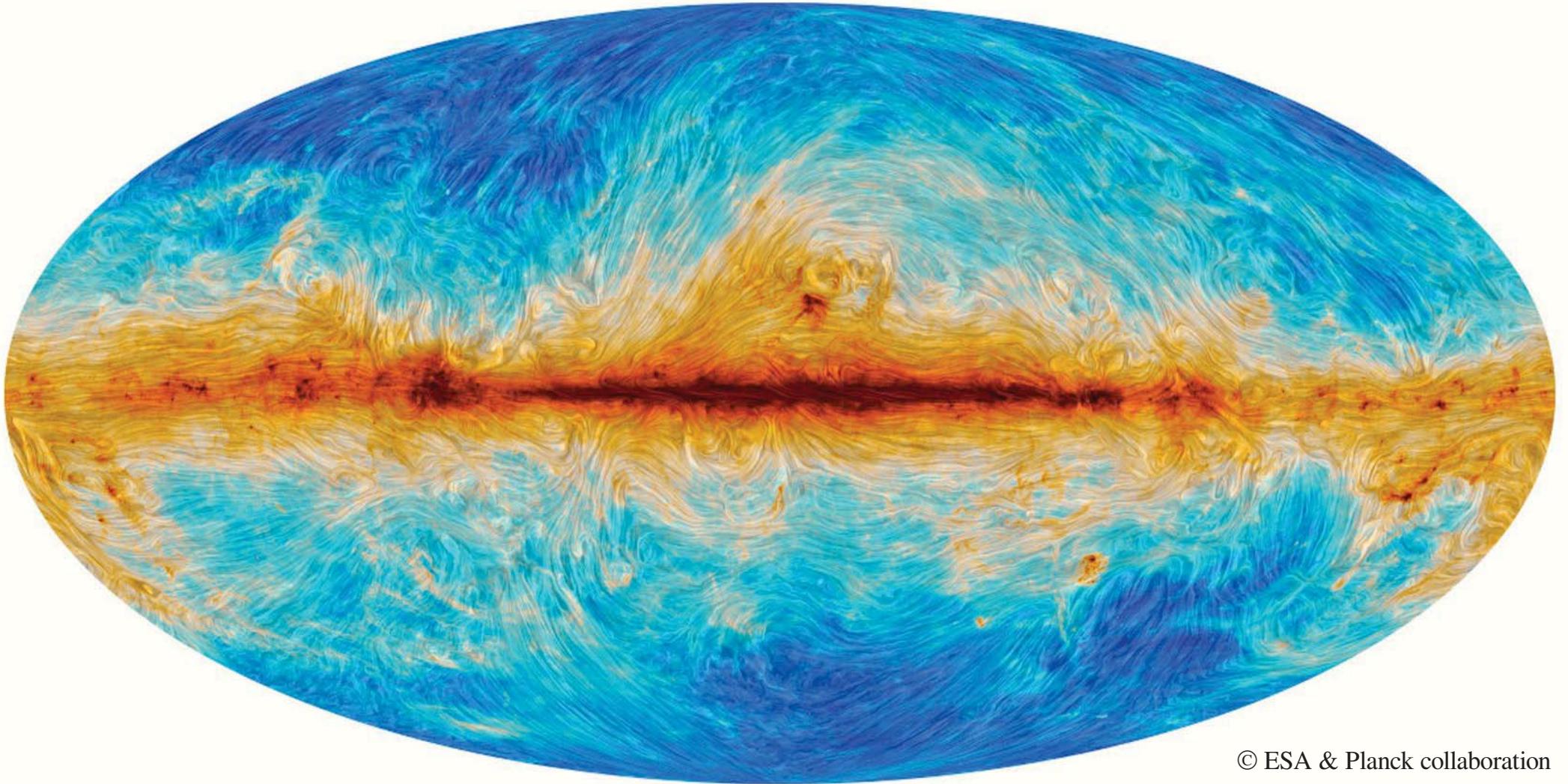
Weżgowiec et al (2007)

NGC4631



Mora & Krause (2013)

Le champ magnétique de la Voie Lactée

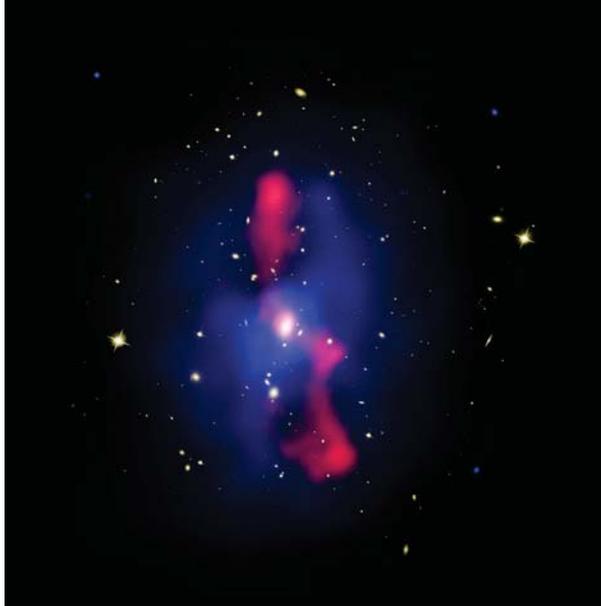


© ESA & Planck collaboration

- $B \sim 5 \mu\text{G}$: aux grandes échelles, corrélation avec bras spiraux
- $B \sim 10 - 20 \mu\text{G}$: composante turbulente aux petites échelles
- Alignement & anti-alignement avec filaments du milieu interstellaire (cf. ρ)

Champs magnétiques dans les amas de galaxies

MS0735.6+7421

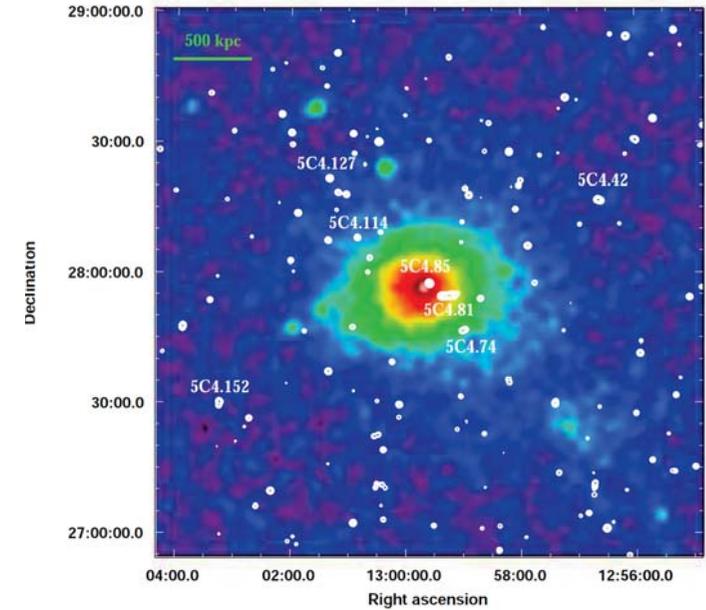


Hubble & Chandra: NASA, ESA,
CXC, STScI, and B. McNamara & VLA

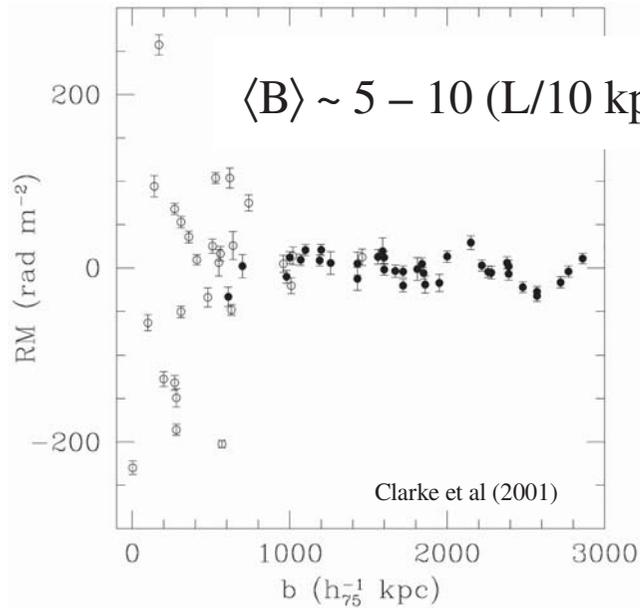
$$\langle B \rangle = \text{qqqs } \mu\text{G}$$

$$B_{\text{jet}} = \text{qqqs } 100 \mu\text{G}$$

Coma



Bonafede et al (2010)

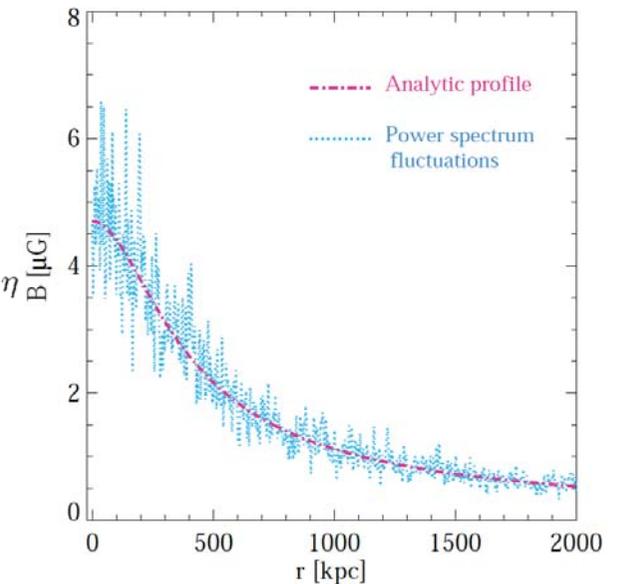


$$\langle B \rangle \sim 5 - 10 (L/10 \text{ kpc})^{-1/2} \mu\text{G}$$

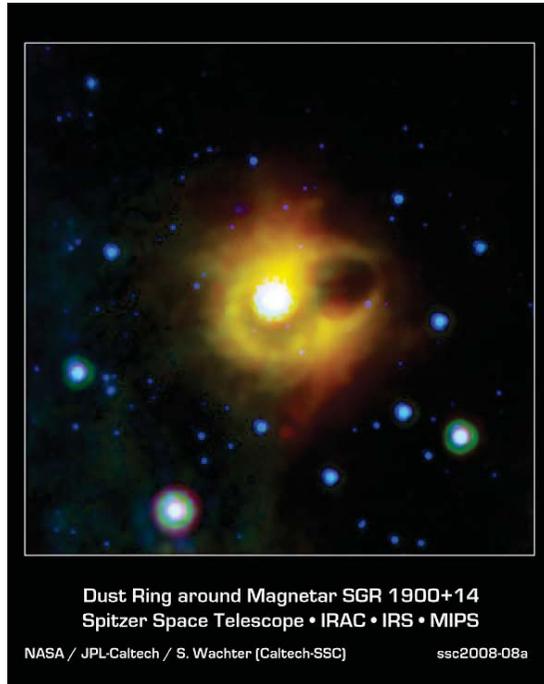
$$\langle B \rangle(r) = \langle B_0 \rangle \left(\frac{n_e(r)}{n_0} \right)^\eta$$

$$\langle B_0 \rangle = 3.9 - 5.4 \mu\text{G}$$

$$\eta = 0.4 - 0.7$$

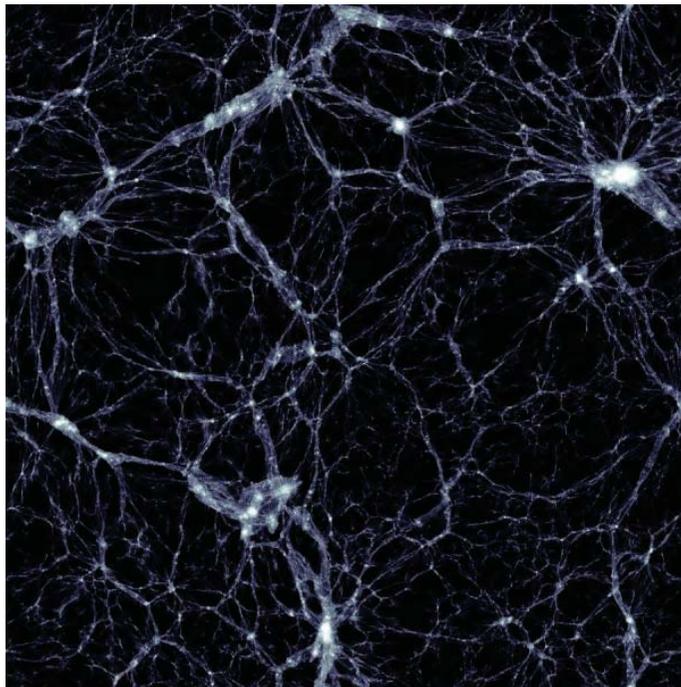


Champs magnétiques astrophysiques : décades d'intensité !



- Magnetars :
 - Étoiles à neutrons
 - Densité : $3 - 6 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$
 - Taille : 10 – 20 km
 - $B \sim 10^8 - 10^{11} \text{ T}$

Illustris Simulation, Haider et al (2016)



- Vides cosmiques :
 - Régions sous-denses :
 - $\rho \leq 5 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$
 - $n \leq 0.3 \text{ atome / m}^3$
 - Taille : $\sim 10^{33} \text{ km}$
 - $B \gtrsim 10^{-22} \text{ T} (?)$

Au moins 33 ordres de grandeur!

Recette pour faire du champ magnétique

- Séparez les porteurs de charge électrique

→ (ré-)ionisation...

- Créez des champs électriques possédant les bonnes propriétés

→ loi d'Ohm

- Touillez pour induire des champs magnétiques par la loi de Faraday

$$\partial_t \vec{B} = -c \vec{\nabla} \times \vec{E}_S$$

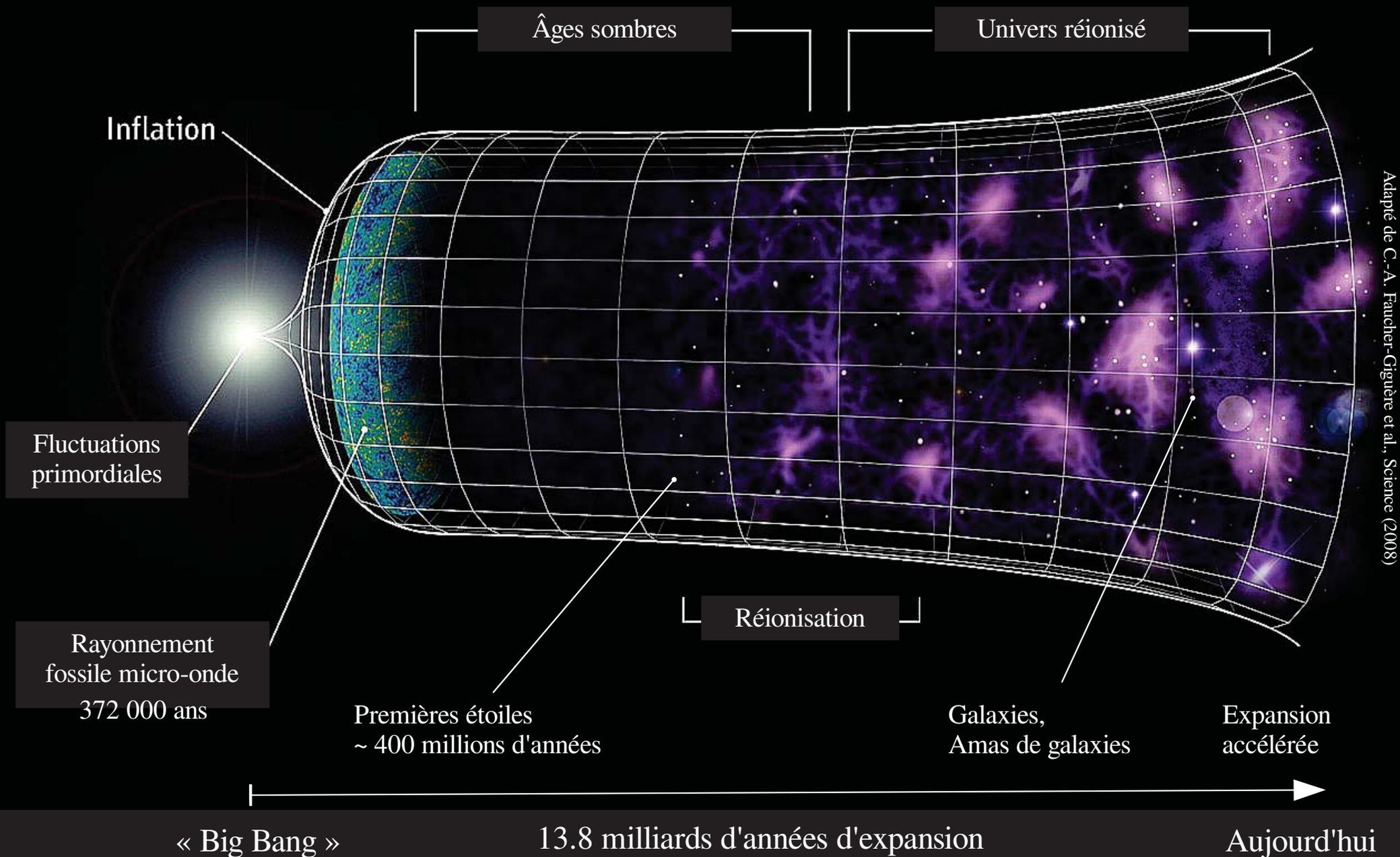
- Incorporez délicatement à la MHD → équation d'induction :

$$\partial_t \vec{B} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) - \vec{\nabla} \times (\eta \vec{\nabla} \times \vec{B}) - c \vec{\nabla} \times \vec{E}_S$$

... et voilà!

Question centrale : **comment générer les *bons* champs électriques ?**

Histoire de l'Univers



Adapté de C.-A. Faucher-Giguère et al., Science (2008)

Mécanismes astrophysiques

- Batterie de Biermann
- Rayons cosmiques et courants de retour
- Entraînement par la radiation
- Photo-ionisation

+ instabilités plasma
(petites échelles – p. ex. : Weibel)

Mécanismes astrophysiques

- Batterie de Biermann
- Rayons cosmiques et courants de retour
- Entraînement par la radiation
- Photo-ionisation

+ instabilités plasma
(petites échelles – p. ex. : Weibel)

Batterie de Biermann

- Écoulements baroclines

Biermann 1950

- Équation d'induction :

$$\partial_t \vec{B} - \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) = -\frac{c}{q_e} \frac{\vec{\nabla} n_e \times \vec{\nabla} p_e}{n_e^2}$$

- Vorticité :

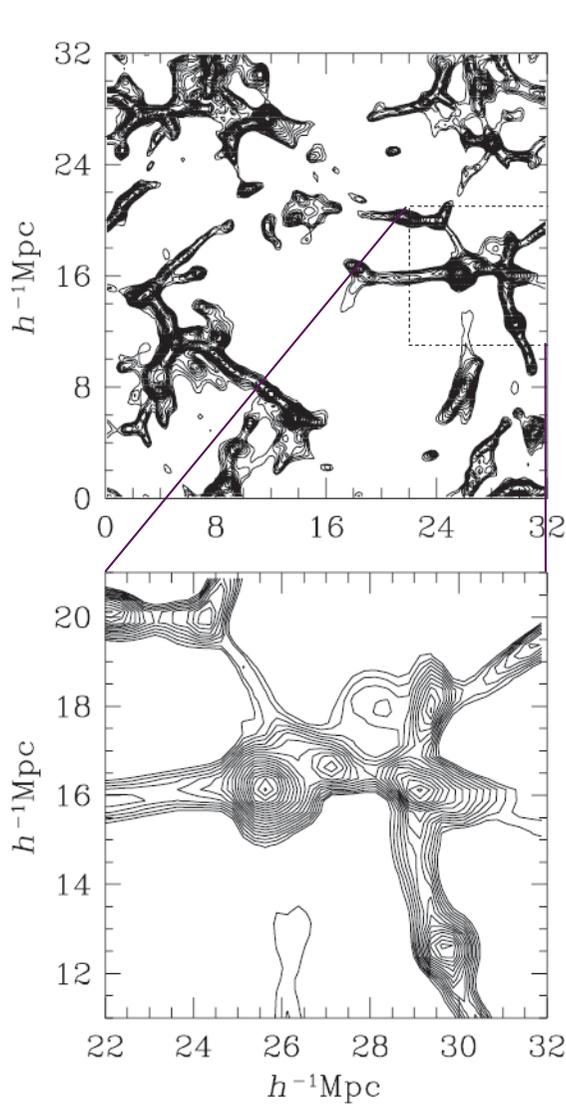
$$\partial_t \vec{\omega} - \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{\omega}) = \frac{\vec{\nabla} \rho \times \vec{\nabla} p}{\rho^2}$$

- Conséquence :

$$\vec{B} = \alpha \vec{\omega} \quad \text{avec} \quad \alpha = -\frac{m_p c}{q_e (1 + x)}$$

Il suffit de générer de la vorticité !

Batterie de Biermann en cosmologie



Isopycnes
 $0.06 \langle \rho \rangle - 6 \langle \rho \rangle$

Formation des
structures



Effondrement
gravitationnel



Chocs cosmologiques

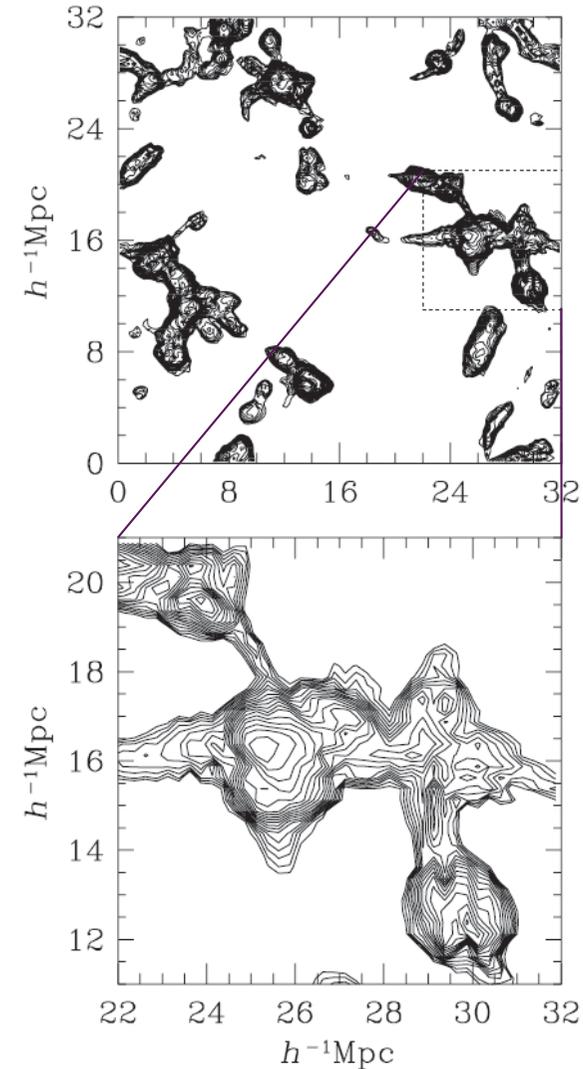


Vorticité



Champ magnétique

vignettes à $z \sim 2$
Kulsrud et al. (1997)



Isomagnétiques
 $8 \times 10^{-23} \text{ G} - 8 \times 10^{-20} \text{ G}$

Batterie de Biermann en cosmologie

Pendant la réionisation cosmique : fronts d'ionisation \perp isothermes

$$\partial_t \vec{B} = - \frac{ck_B}{q_e} \frac{\vec{\nabla} n_e \times \vec{\nabla} T_e}{n_e}$$

Subramanian et al. (1994), Gnedin et al. (2000)

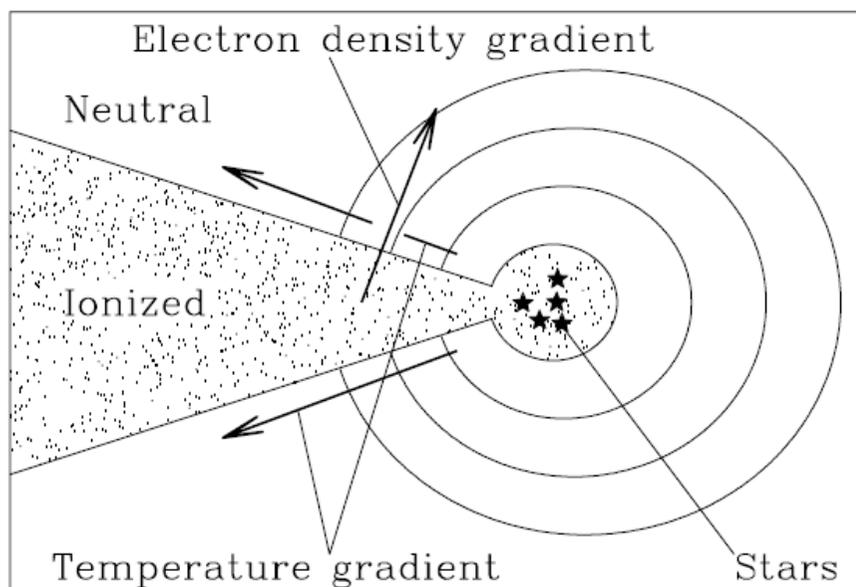


FIG. 6.—Cartoon illustrating the mechanism for generating the primordial magnetic field during the breakthrough of the ionization front from the protogalaxy before the overlap of the H II regions. Enclosed contours show the regions of progressively higher density.

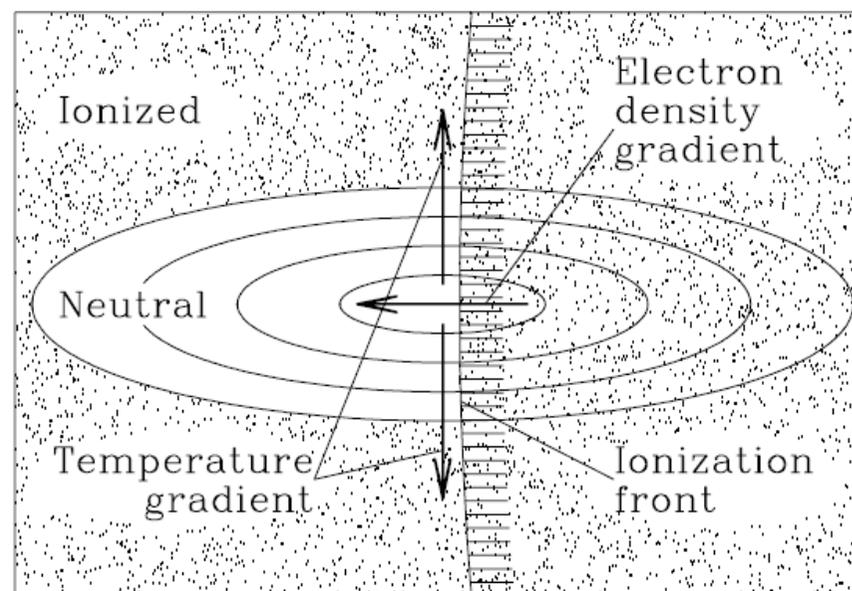


FIG. 8.—Cartoon illustrating the second mechanism for generating the primordial magnetic field during reionization: the ionization front crossing a neutral high-density filament after the epoch of overlap. Enclosed contours show the regions of progressively higher density.

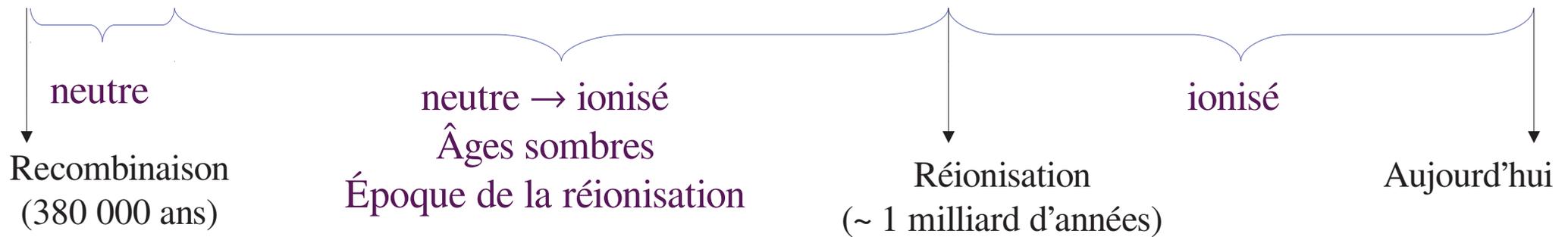
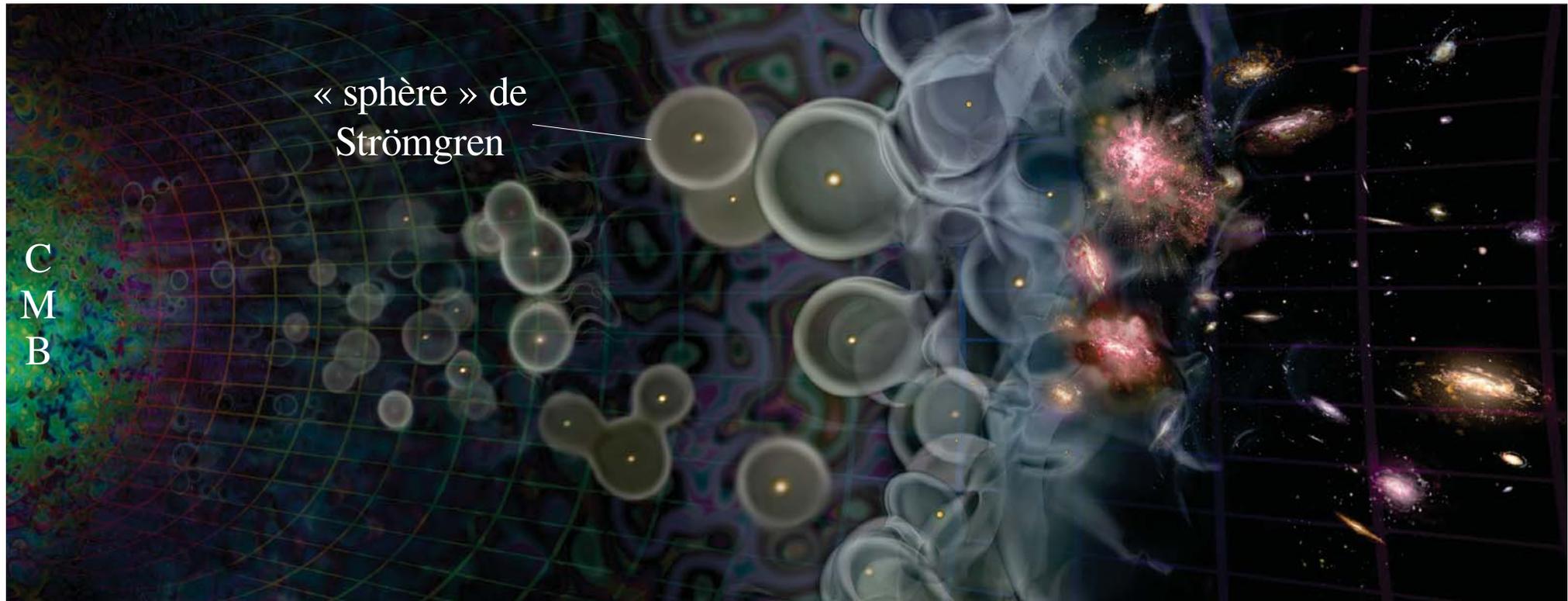
$$B \sim 10^{-20} - 10^{-18} \text{ G} \quad @ \quad L \sim \text{qqs kpc}$$

Batterie de Biermann en cosmologie

- Même mécanisme :
des disques d'accrétion des 1^{ères} étoiles aux amas de galaxies
- Depuis $t \sim 380\,000$ ans jusqu'à aujourd'hui
- Amplitudes :
 - 10^{-22} G – 10^{-16} G selon l'échelle
 - jusqu'au nanoG (centre des sites de formation des 1^{ères} étoiles)

(Pudritz & Silk 1989, Lazarian 1992, Subramanian et al. 1994, Kulsrud et al. 1997, Ryu et al. 1998, Gnedin et al. 2000, Davies & Widrow 2000, **Silk & Langer 2006**, Xu et al 2008, Doi & Susa 2011, Naoz & Naryan 2013, ...)

Contexte de la réionisation



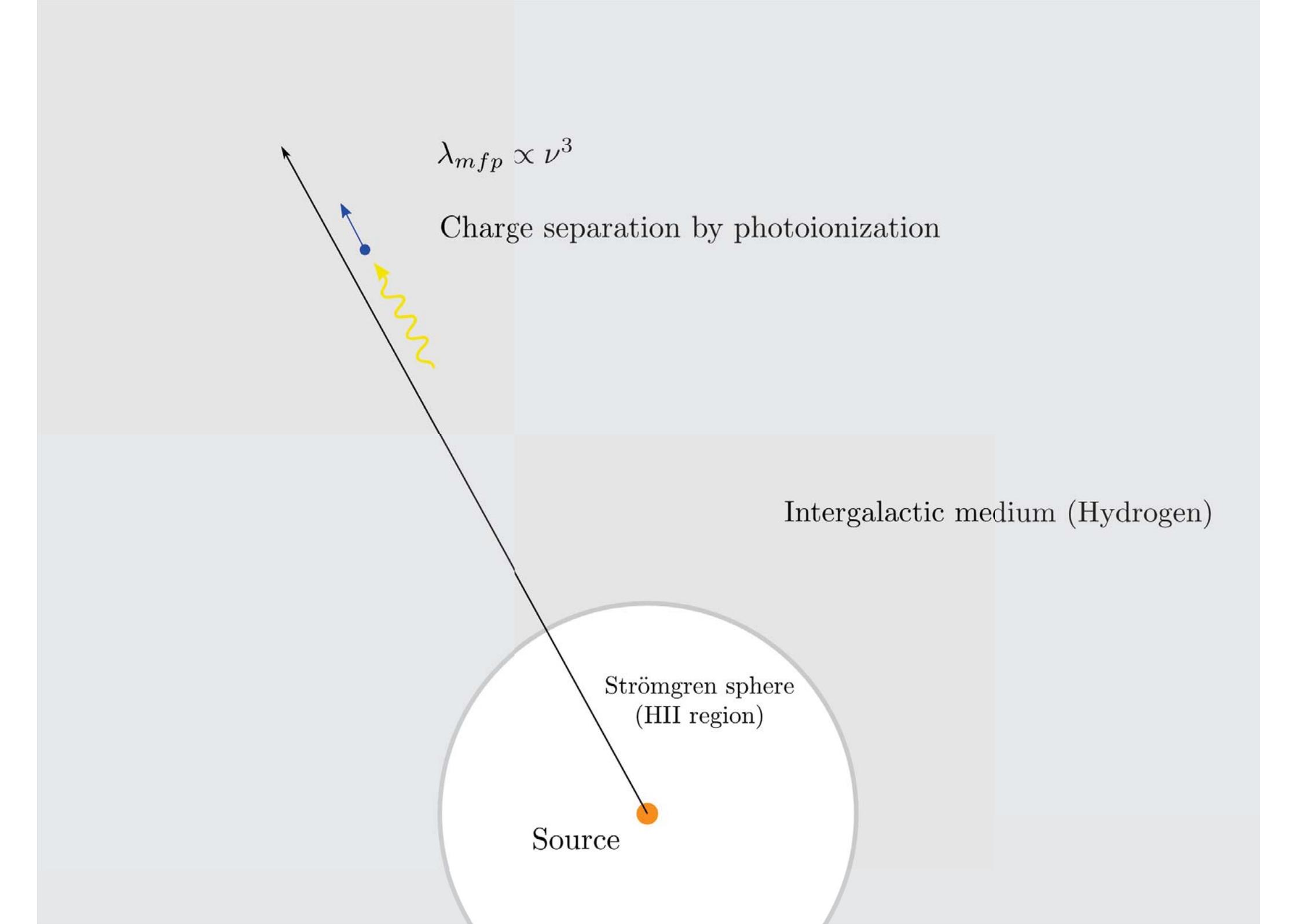
$$\lambda_{mfp} \propto \nu^3$$

Charge separation by photoionization

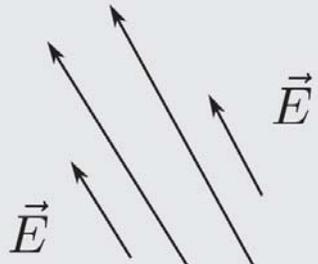
Intergalactic medium (Hydrogen)

Strömgren sphere
(HII region)

Source



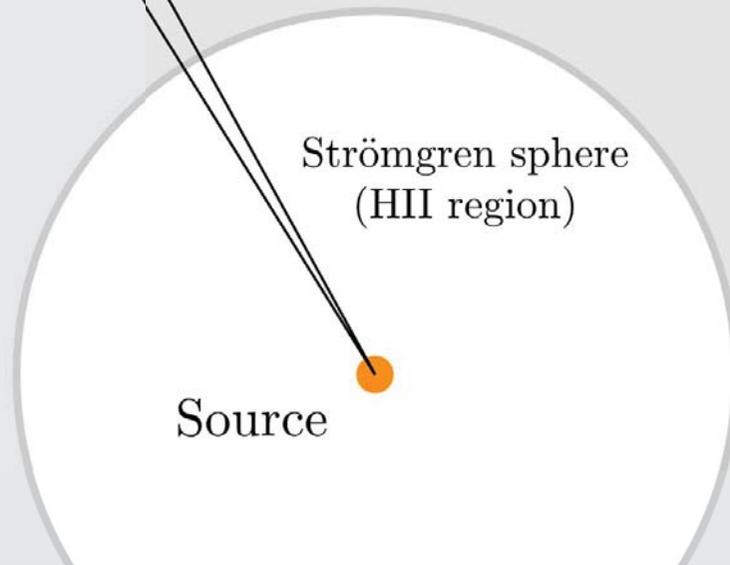
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0}$$



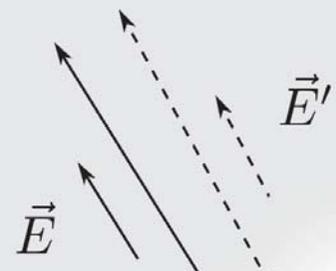
Intergalactic medium (Hydrogen)

Strömgren sphere
(HII region)

Source

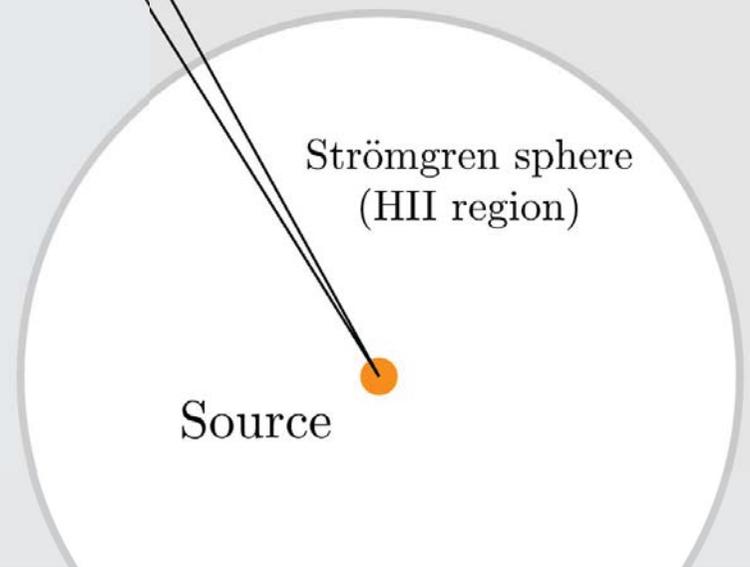


$$\vec{\nabla} \times \vec{E} \neq \vec{0}$$



Inhomogeneity

Intergalactic medium (Hydrogen)



Strömgren sphere
(HII region)

Source

Formellement...

Durrive & Langer, 2015

Photoionisation = modification locale du nombre d'électrons
et de leur **distribution de vitesses**

⇒ Théorie cinétique !

Terme source dans l'équation de Boltzmann
sur la fonction de distribution des électrons :

$$\frac{df}{dt} = \partial_t f|_{\text{photoionization}}$$

Quantité de mouvement fournie
par les photons aux électrons :

$$m_e \vec{v} = f_{\text{mt}}(\nu) \frac{h\nu}{c} \hat{r}$$

Fraction d'impulsion échangée

Équation d'induction :

$$\partial_t \vec{B} = -\frac{c}{e} \frac{\vec{\nabla} n_e \times \vec{\nabla} p_e}{n_e^2} - \frac{c}{e} \vec{\nabla} \times \frac{\dot{\vec{p}}}{n_e}$$

Taux de transfert d'impulsion

Biermann

Photoionisation:
le rayonnement induit des champs magnétiques

Quelques mots sur le terme source

Taux de création d'impulsion des électrons :

$$\dot{\vec{p}} = \int m_e \vec{v} \partial_t f_{pi} d^3 \vec{v}$$

Impulsion fournie par les photons aux électrons :

$$m_e \vec{v} = f_{mt}(\nu) \frac{h\nu}{c} \hat{r}$$

Fraction d'impulsion échangée

Explicitement :

$$\dot{\vec{p}} = \frac{n_{HI}}{c} \int_{\nu_0}^{\infty} f_{mt} \sigma_{\nu} L_{\nu} \frac{e^{-\tau_{\nu}}}{4\pi r^2} d\nu \hat{r}$$

Section efficace

Spectre de la source

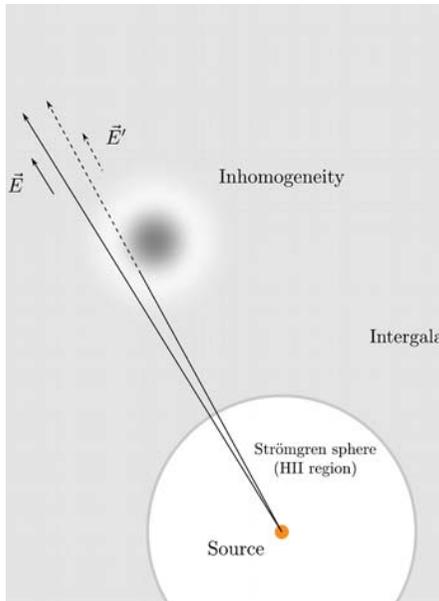
Absorption des photons

Dilution géométrique

Champs magnétiques induits par photo-ionisation

Source de B :
Anisotropie de la densité de colonne

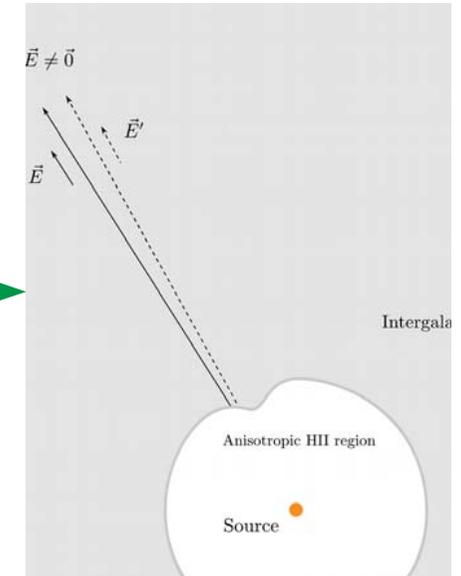
Durrive & Langer, 2015
 (voir aussi Langer et al 2005,
 Ando et al. 2010, Doi & Susa 2011)



Inhomogénéités

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = t \frac{N}{ex_e} \vec{\nabla} \int_{r_S}^r n_{\text{HI}} dr \times \hat{r}$$

Déformation des « sphères » de Strömgen



Section efficace Absorption des photons

$$N = \frac{1}{4\pi r^2} \int_{\nu_0}^{\infty} f_{\text{mt}} \sigma_{\nu}^2 L_{\nu} e^{-\tau_{\nu}} d\nu$$

Dilution géométrique Spectre de la source

Photons ionisants Fraction d'impulsion échangée

Échelles et amplitudes typiques

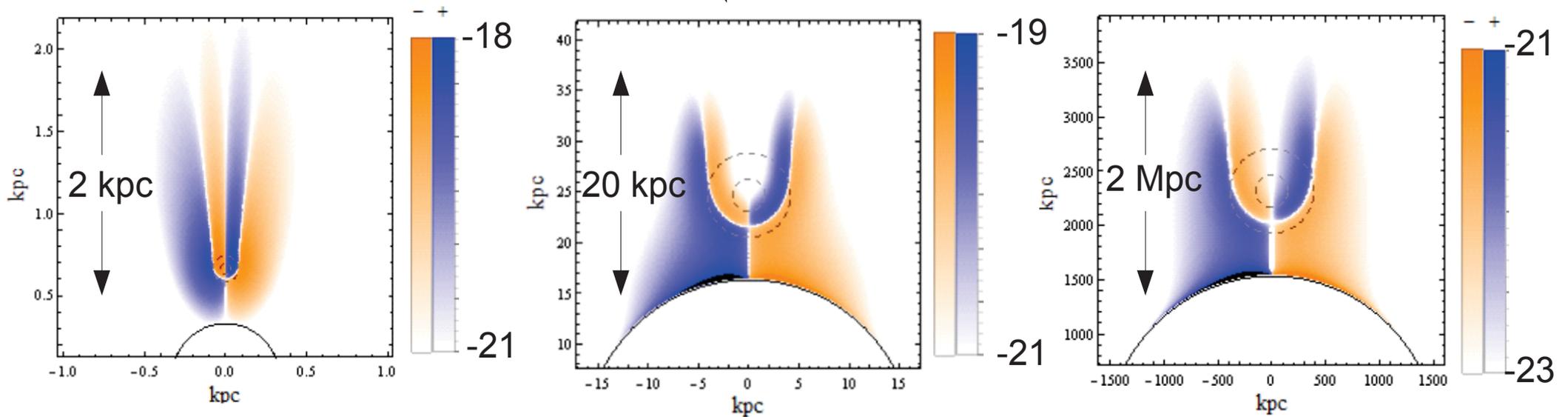


Premières
étoiles

Premières
galaxies

Quasars

Exemples :



Échelles et amplitudes typiques

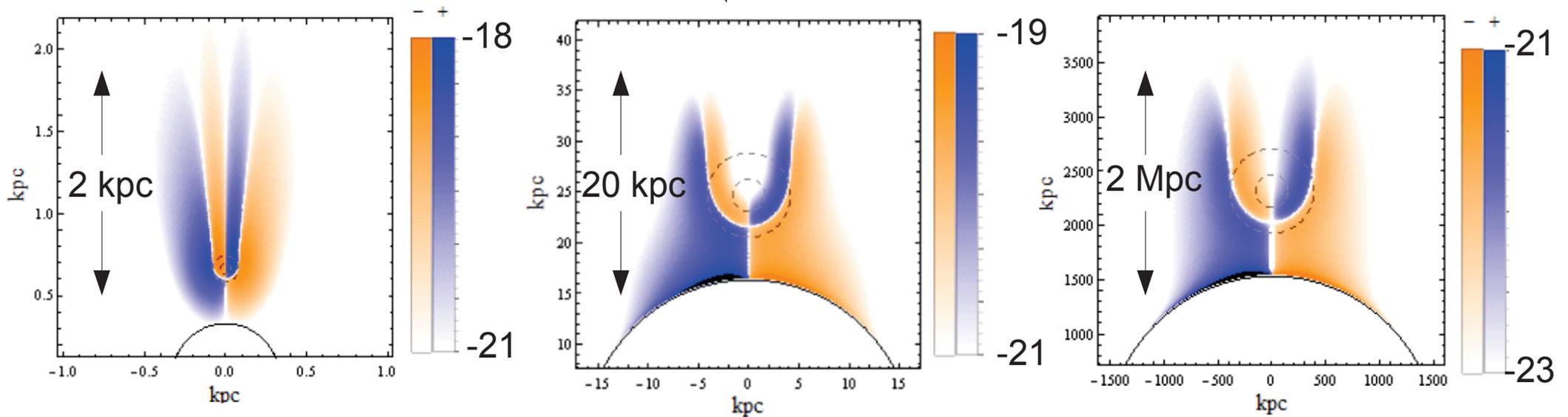


Premières étoiles

Premières galaxies

Quasars

Exemples :



Demi-séparation entre sources :

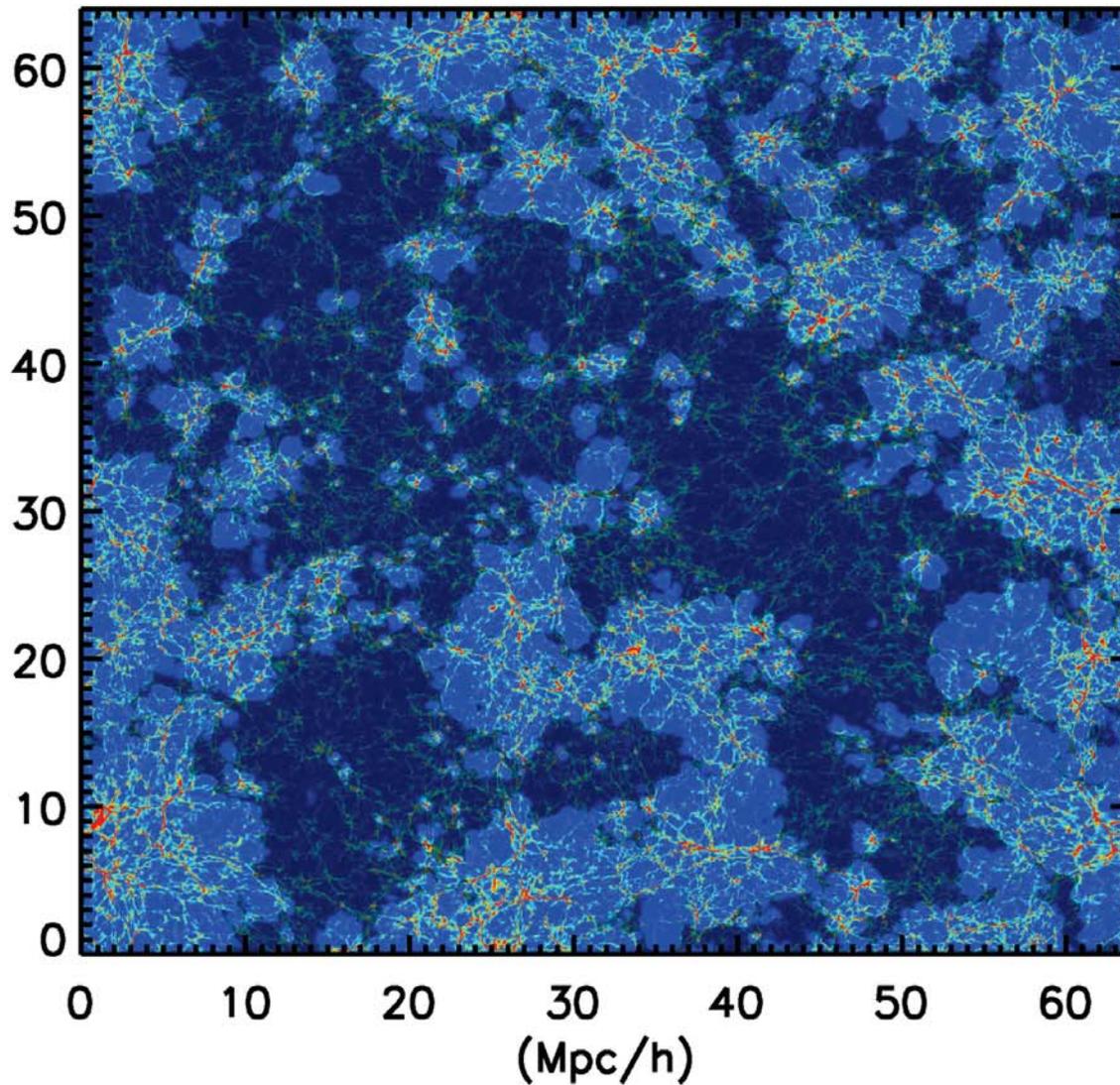
$\sim 10 \text{ kpc}$

\sim dizaines de kpc

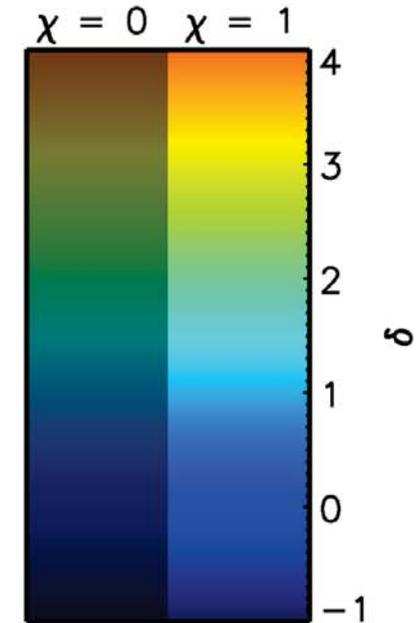
\sim quelques Mpc

\Rightarrow Contribution à **magnétisation de tout l'univers !**

À grande échelle...



Contrastes de densité
et de fraction ionisée



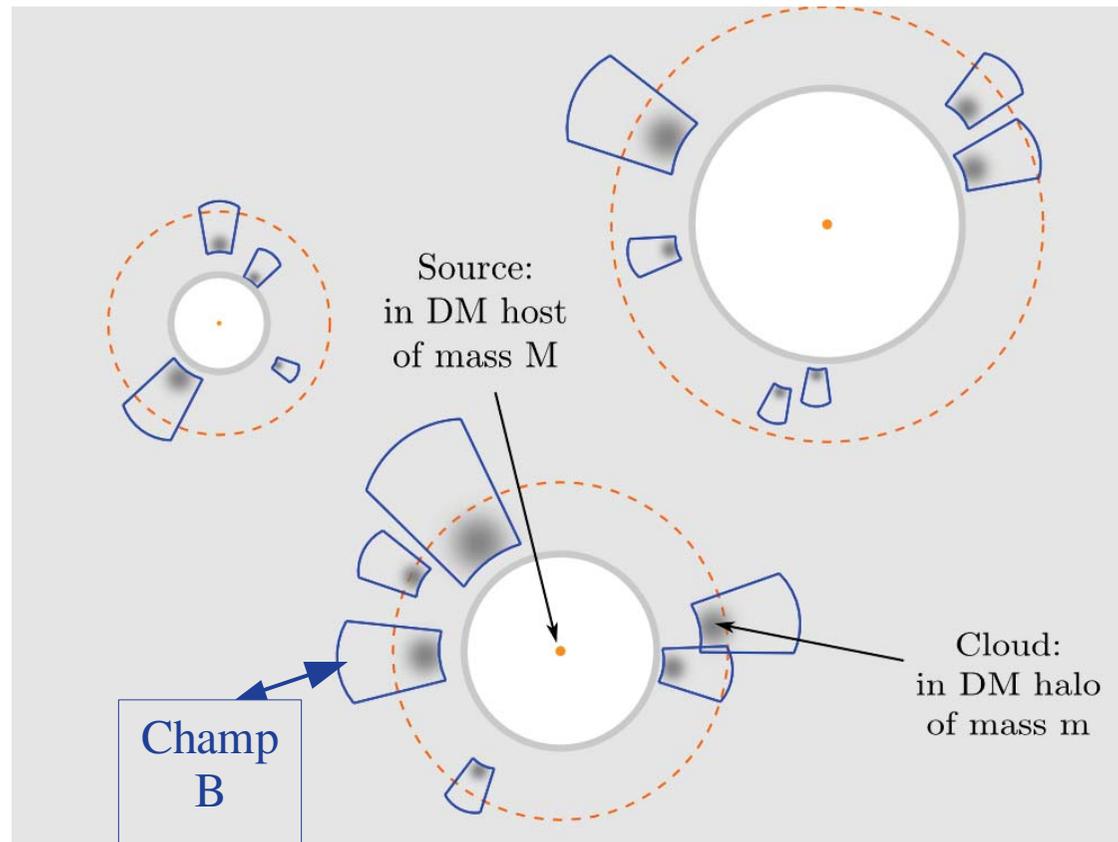
Dawoodbhoy et al (2018)

Sources ionisantes et matière :
distribuées de manière inhomogène, à toutes les échelles

Magnétisation globale de l'univers

Durrive, Tashiro, Langer, Sugiyama, 2017

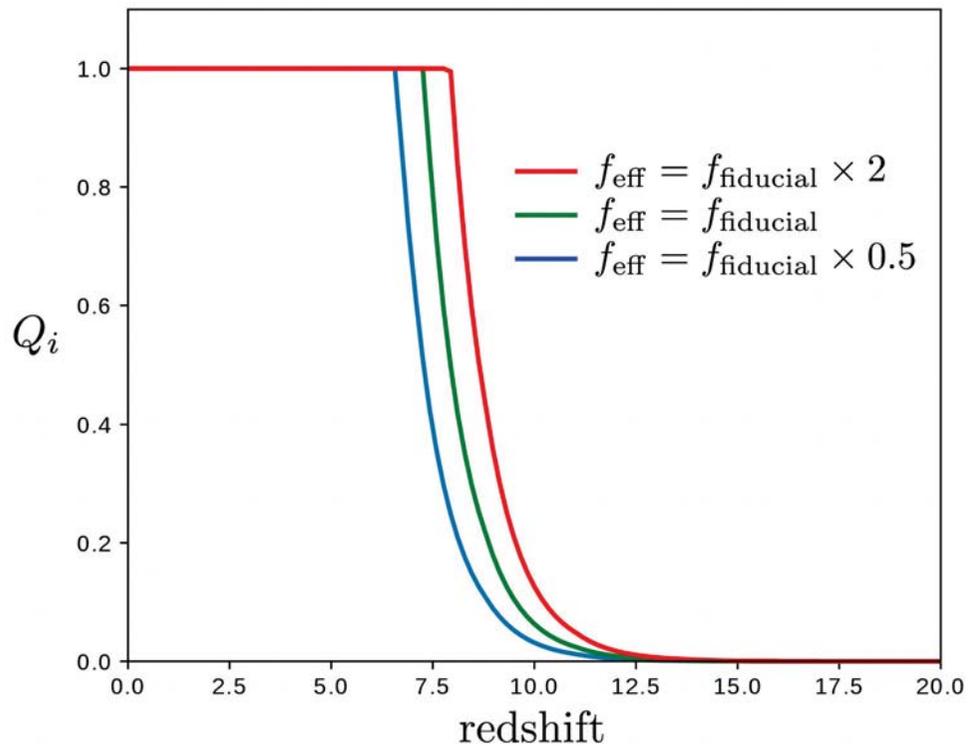
- Cas de la première génération de galaxies :
hypothèse conservatrice
 - Distribution des sources & des régions HII
 - Distribution des surdensités neutres
- halos de matière noire sous-jacents
(cf. Press-Schechter)



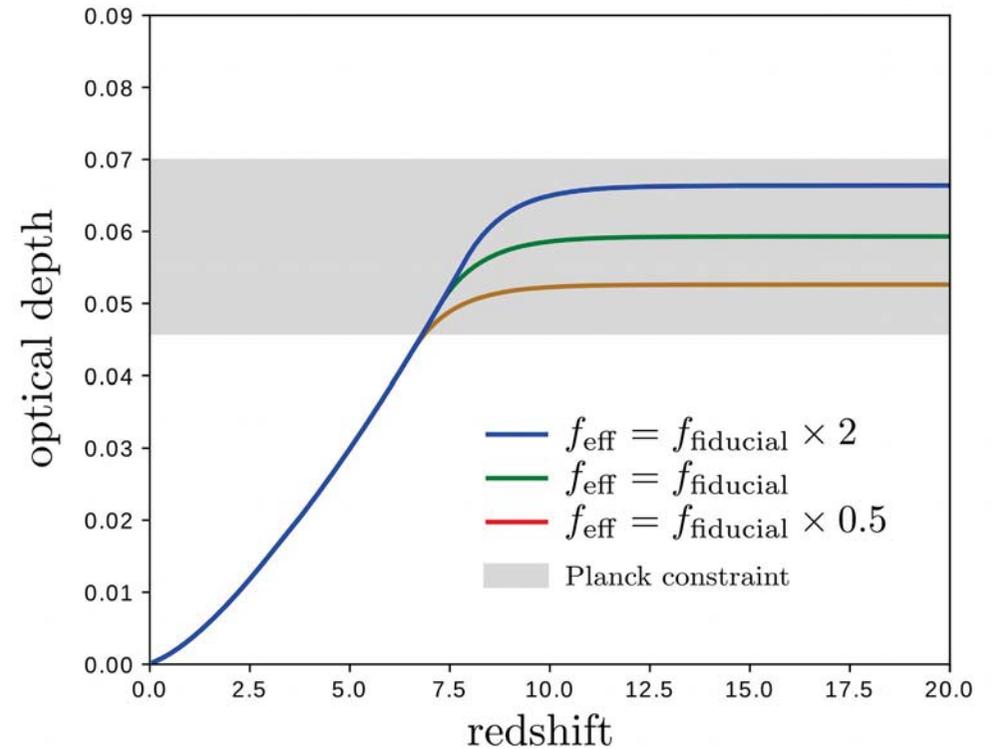
Magnétisation globale de l'univers

Durrive, Tashiro, Langer, Sugiyama, 2017

Contraintes observationnelles : résultats *Planck* 2016



Fraction ionisée

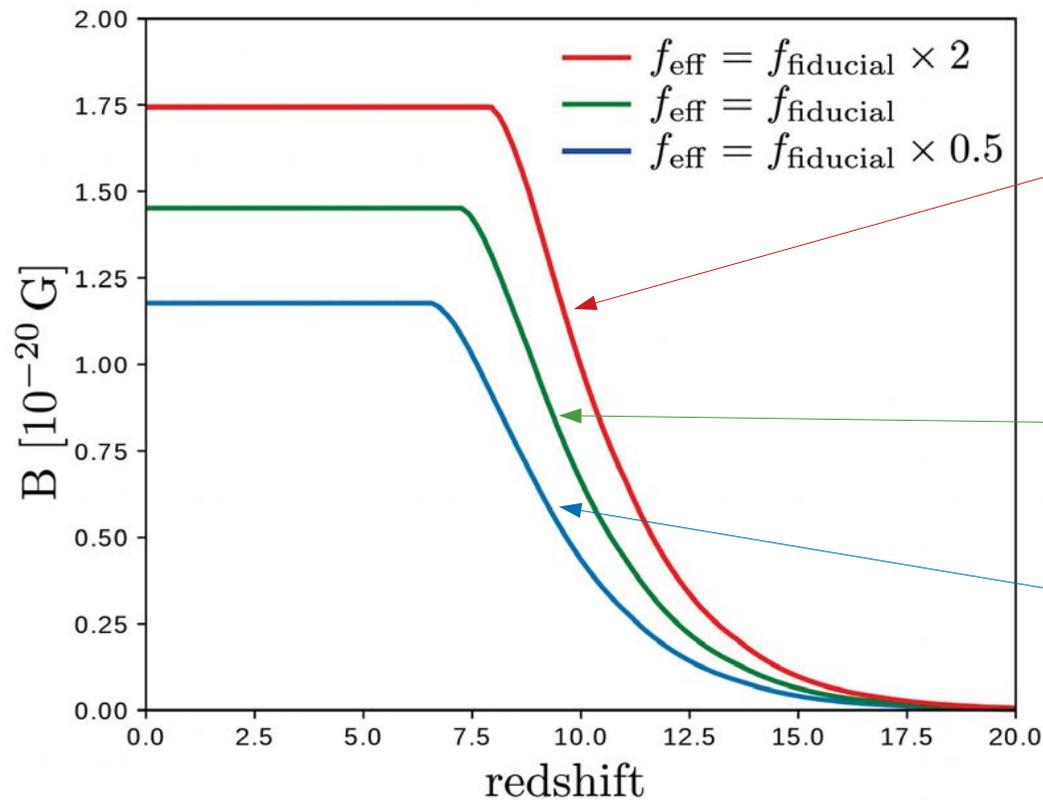


Opacité Thomson au CMB

Magnétisation globale de l'univers

Durrive, Tashiro, Langer, Sugiyama, 2017

Champ magnétique moyen dans l'univers à la fin de la réionisation



Univers avec galaxies « puissantes »
(forte formation stellaire
& fraction d'échappement maximale)

Modèle de référence

Univers avec galaxies « faibles »
(faible formation stellaire
& fraction d'échappement minimale)

Amplitude comobile → **quelques 10^{-18} Gauss physiques à la fin de la réionisation**

Quelques effets du champ magnétique

- Évolution du plasma cosmique en présence de B :

$$\begin{aligned}\partial_t \rho + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho + \frac{\vec{\nabla} \cdot (a \vec{v})}{a} &= 0 \\ \rho \left(\partial_t \vec{v} + \frac{\dot{a}}{a} \vec{v} + \frac{\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v}}{a} \right) &= -\rho \frac{\vec{\nabla} \phi}{a} - \frac{\vec{\nabla} p}{a} + \frac{(\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B}}{4\pi a} \\ \vec{\nabla}^2 \phi &= 4\pi G a^2 (\rho - \rho_0(t))\end{aligned}$$

⇒ Force de Lorentz : B comme source de fluctuations de densité et de vitesse !

Exemple : champs magnétiques primordiaux stochastiques

$B_{\text{rms}} \sim 0.5 - 0.7 \text{ nG} \rightarrow$ plus de $1^{\text{ères}}$ étoiles \rightarrow réionisation @ $z_{\text{reion}} \sim 15 \Leftrightarrow t \sim 268 \times 10^6 \text{ ans}$

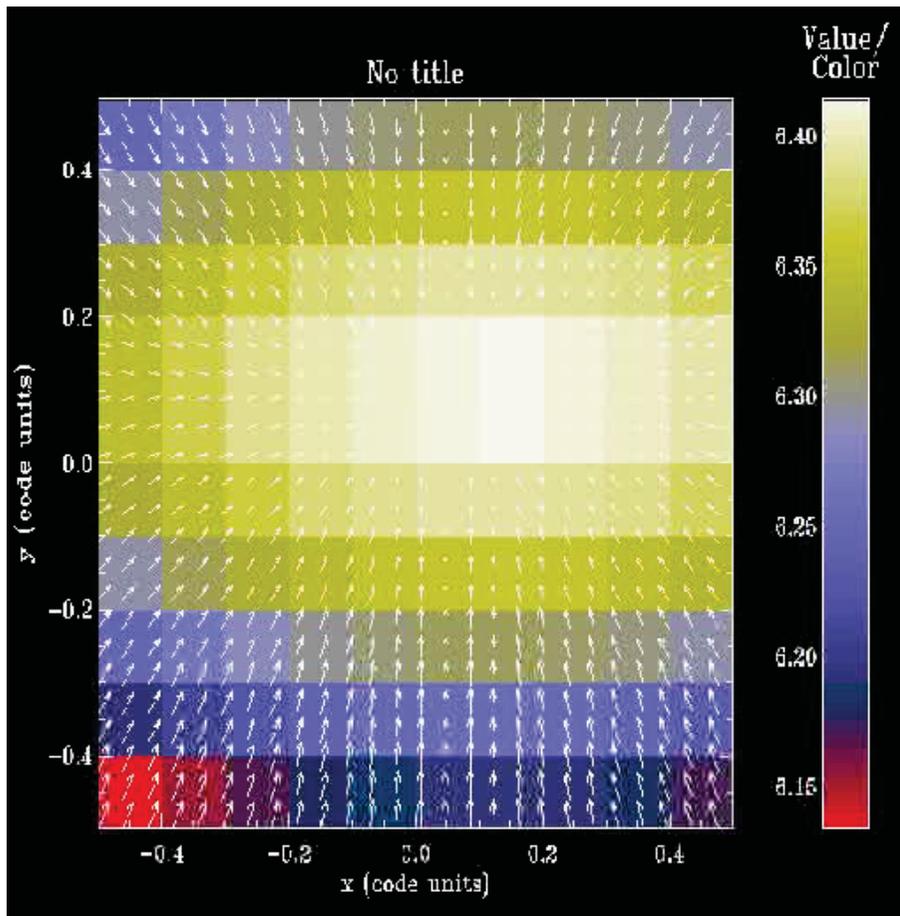
(cf. Planck, $z_{\text{reion}} \sim 8.8 \Leftrightarrow t \sim 560 \times 10^6 \text{ ans}$)

e.g.: Gopal & Sethi 2003, Tashiro & Sugiyama 2006

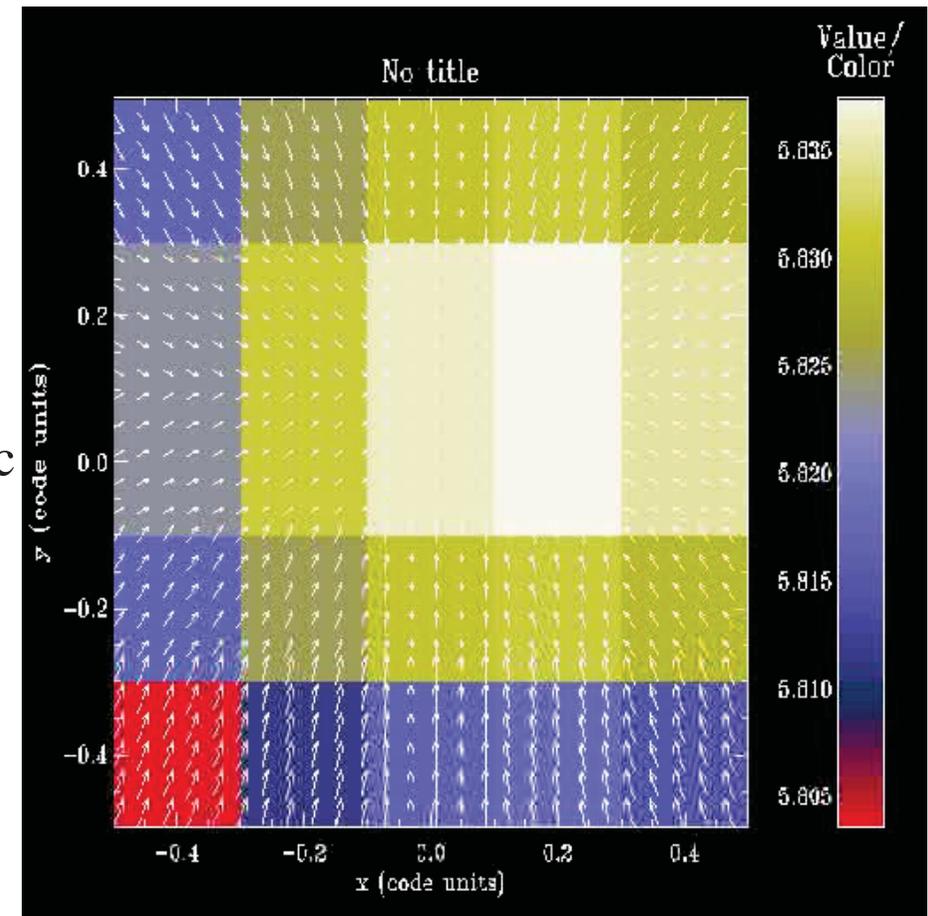
Quelques effets du champ magnétique

- « Outflows » magnétisés → réduction de la masse des premières étoiles ?
(Silk & Langer 2006)

Hydrodynamique



Magnétisé



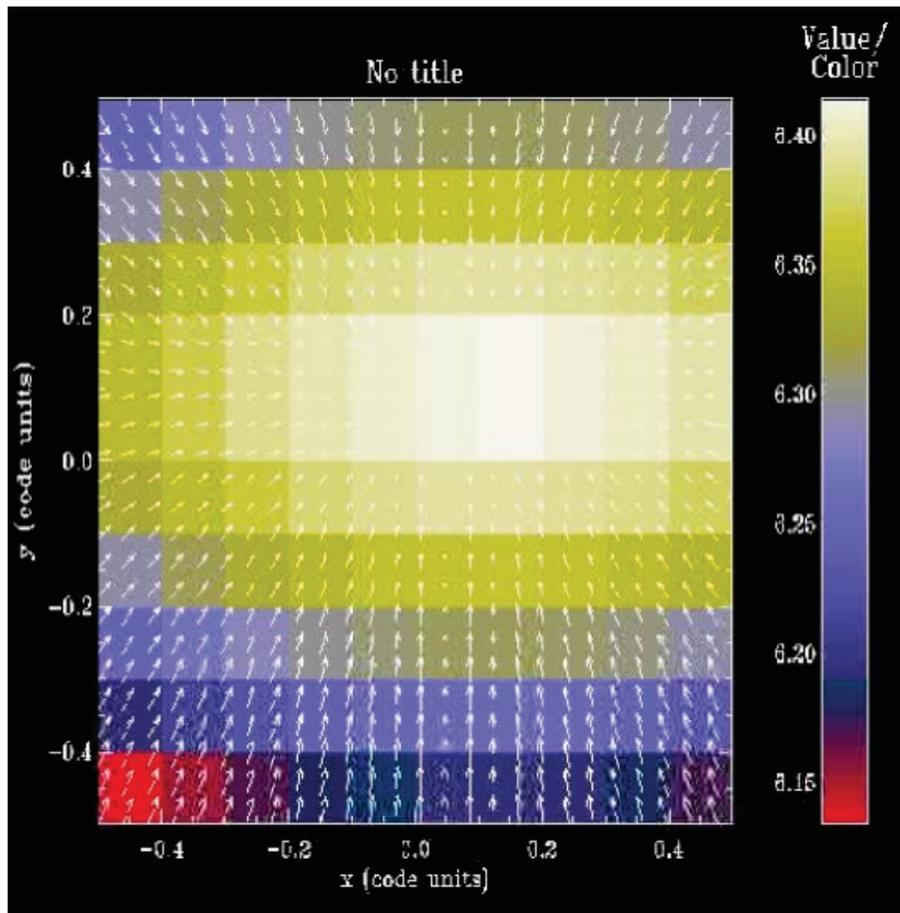
0.01 pc

Fromang, Hennebelle, Teyssier, 2006

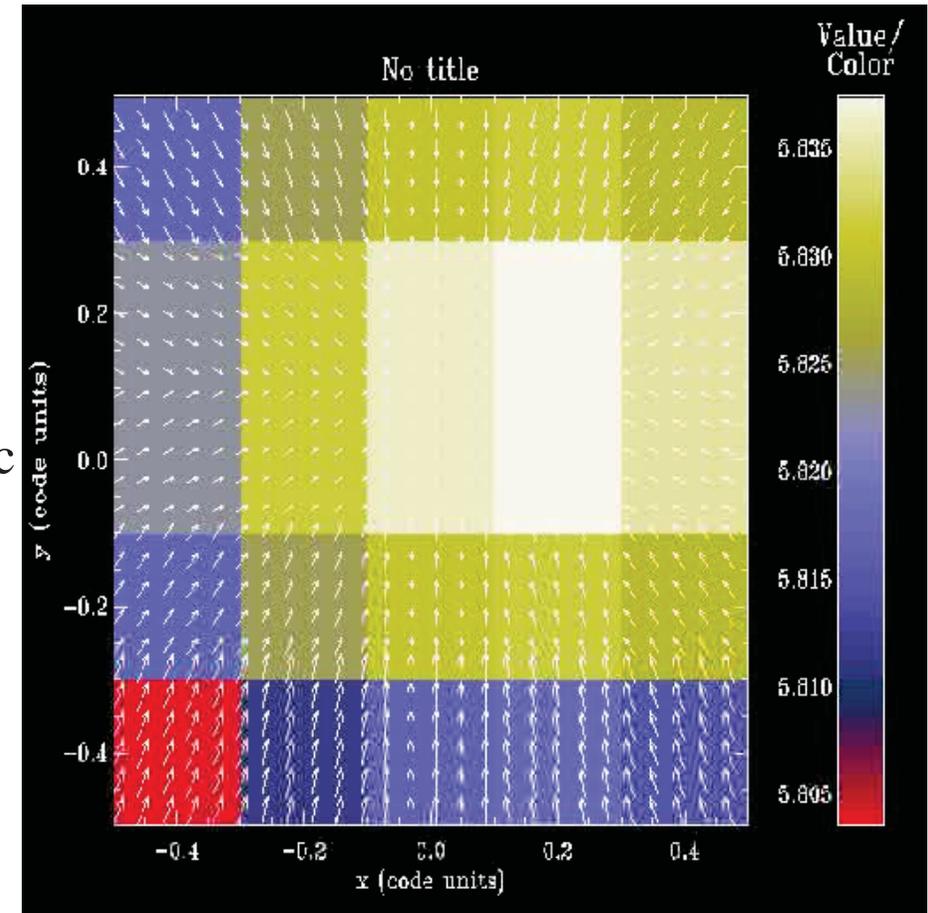
Quelques effets du champ magnétique

- « Outflows » magnétisés → réduction de la masse des premières étoiles ?
(Silk & Langer 2006)

Hydrodynamique



Magnétisé



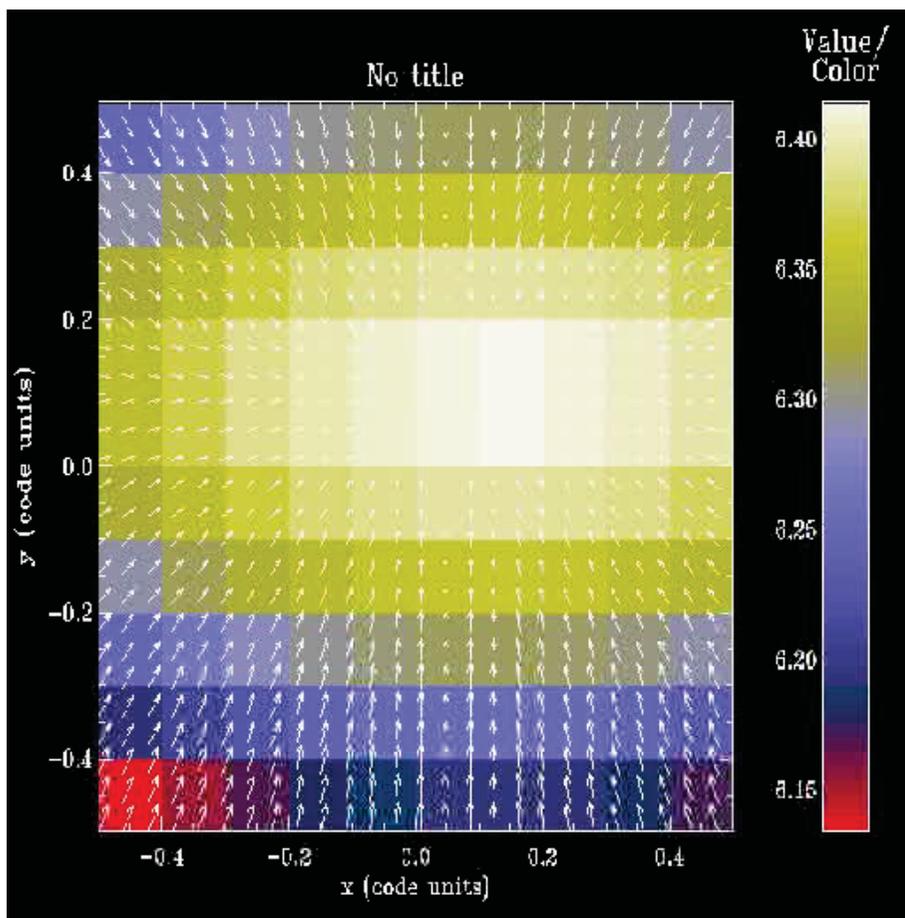
0.01 pc

Fromang, Hennebelle, Teyssier, 2006

Quelques effets du champ magnétique

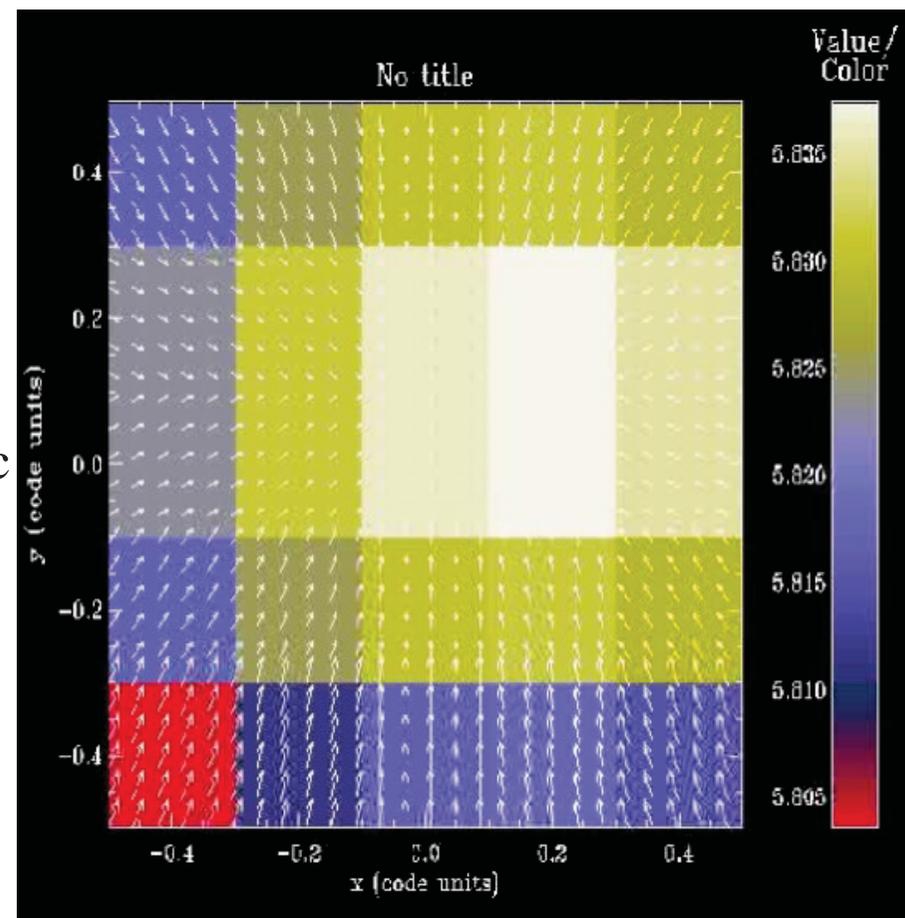
- « Outflows » magnétisés → réduction de la masse des premières étoiles ?
(Silk & Langer 2006)

Hydrodynamique



0.01 pc

Magnétisé



Fromang, Hennebelle, Teyssier, 2006

Évolution cosmologique du champ magnétique

- MHD idéale : diffusivité magnétique négligeable

$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times (\vec{B} \times \vec{u}) = \eta \vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad \begin{array}{l} \text{grandes échelles} \\ \rightarrow \text{temps diffusion} \gg \text{âge de l'univers} \\ \rightarrow \eta \sim 0 \end{array}$$

- Gel du flux magnétique : $\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$
 $\frac{d\Phi_B}{dt} = \eta \int_S \vec{\nabla}^2 \vec{B} \cdot d\vec{S} \sim 0$

- Amplification adiabatique :

$$\Phi_B \sim BL^2 \Rightarrow \frac{B_{\text{fin}}}{B_{\text{init}}} = \left(\frac{L_{\text{fin}}}{L_{\text{init}}} \right)^2 = \left(\frac{\rho_{\text{fin}}}{\rho_{\text{init}}} \right)^{2/3} \quad (\text{conservation masse})$$

- Amplification dynamo :

$$\text{Séparation d'échelles : } \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{b} \quad \& \quad \vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{v}$$

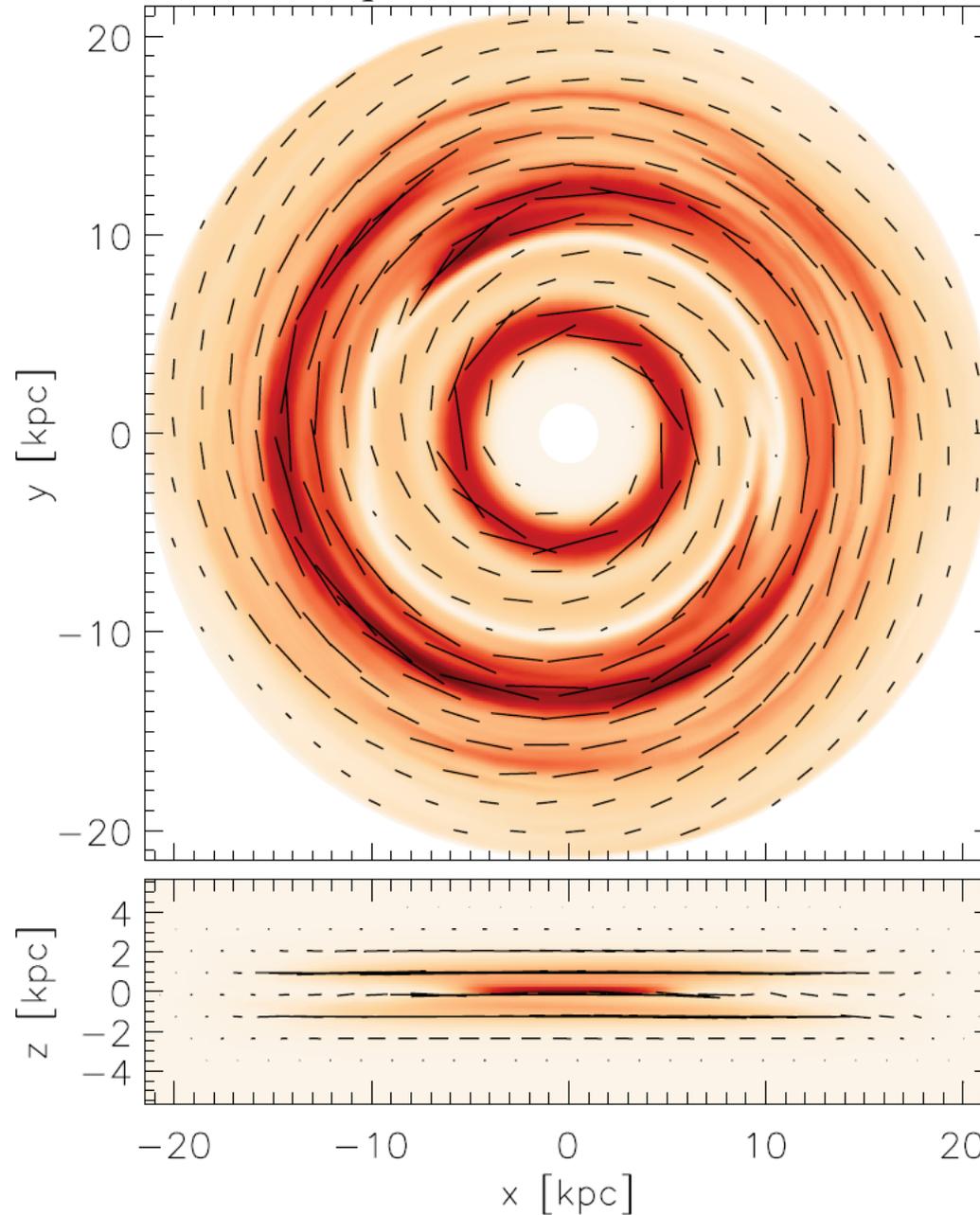
$$\frac{\partial \vec{B}_0}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{V}_0 \times \vec{B}_0) + \vec{\nabla} \times (\alpha \vec{B}_0 - \beta \vec{\nabla} \times \vec{B}_0)$$

α : "effet alpha" β : diffusivité turbulente

Dynamo galactique

Disque de la Voie Lactée

Vu du dessus



Émission synchrotron

Couleur : intensité

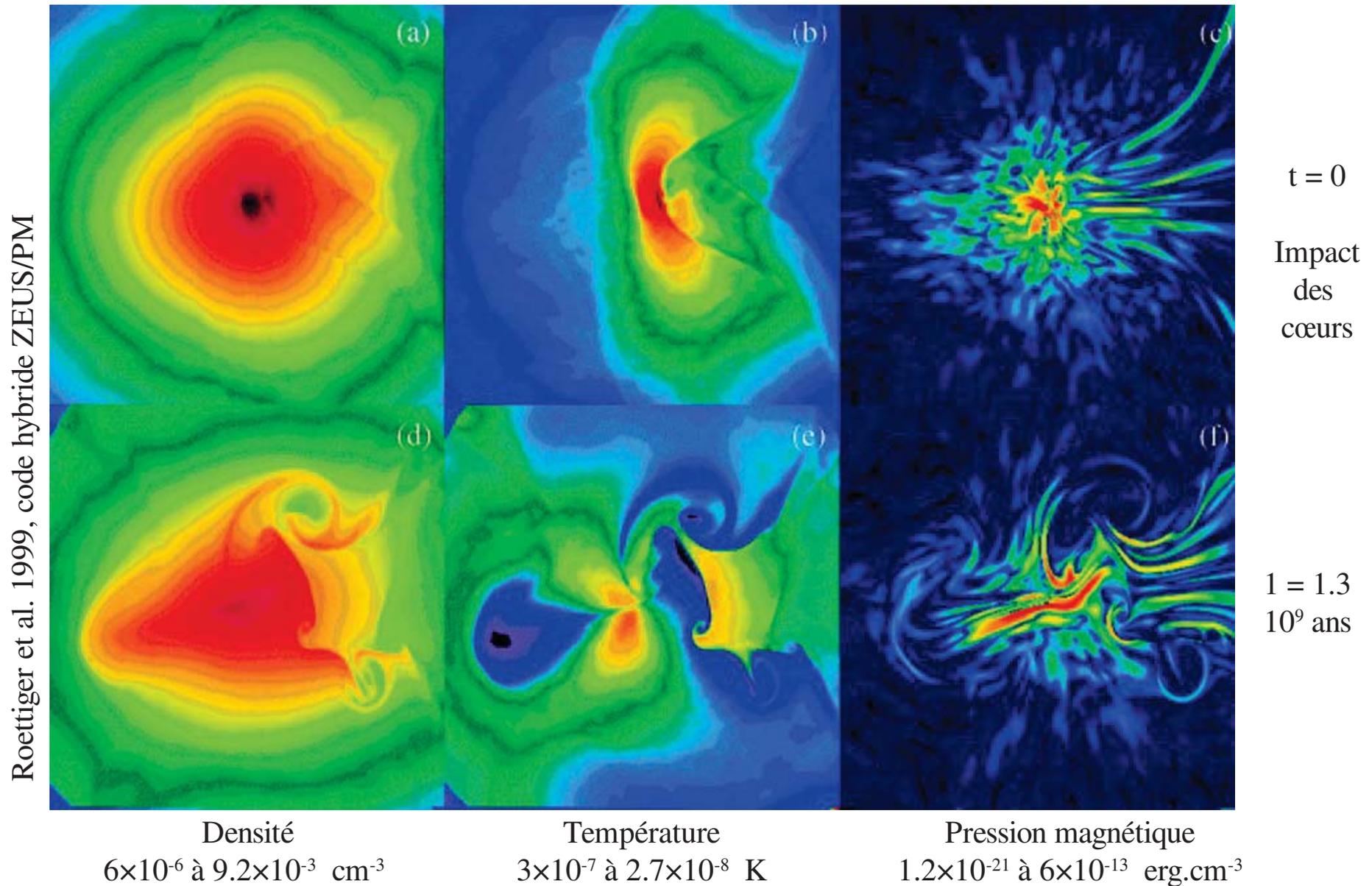
Tirets : polarisation
(tournée à 90°)

Vu par la tranche

Gressel et al. 2013

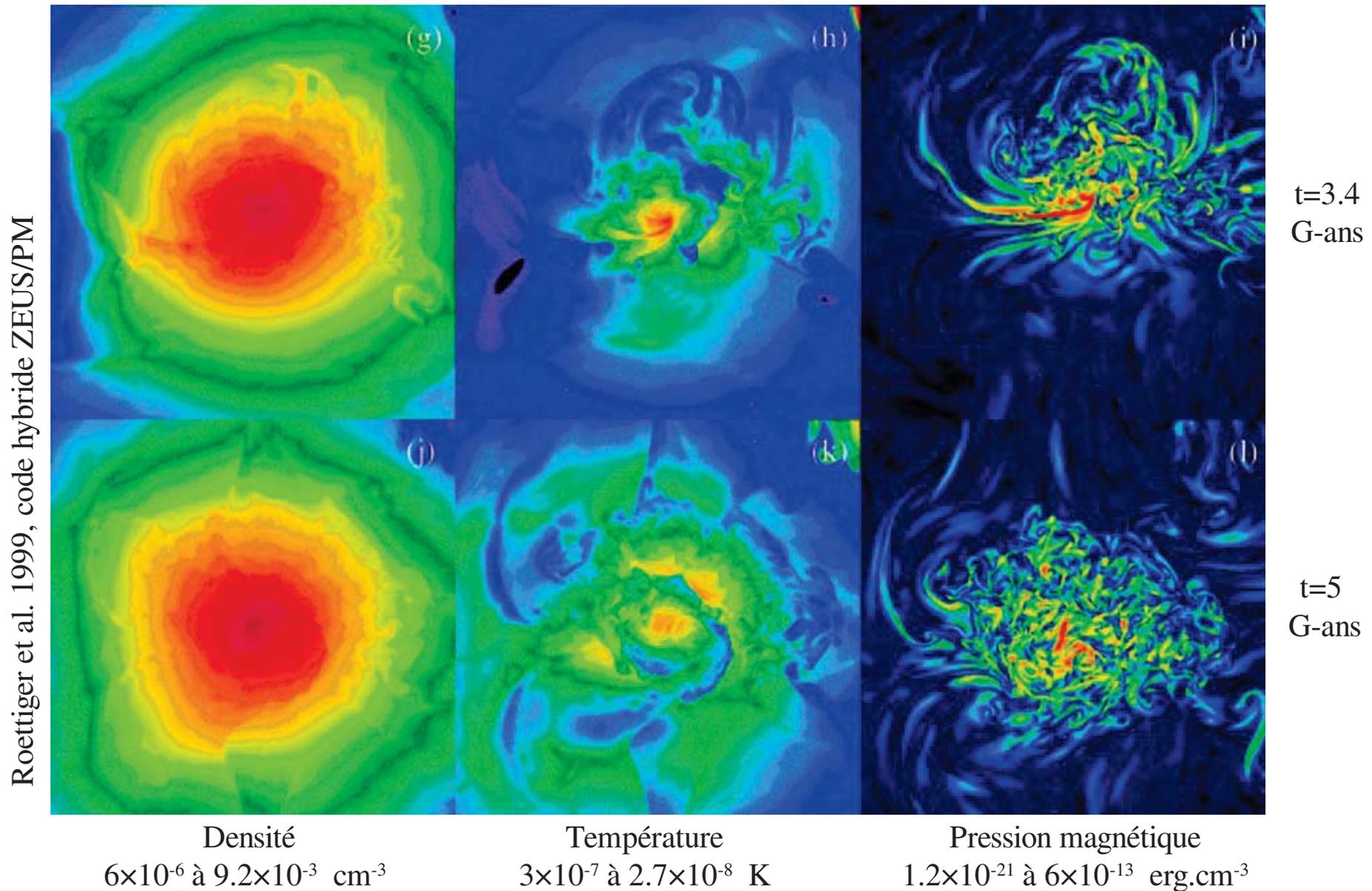
Évolution cosmologique de B dans la toile cosmique ?

- Dans les amas de galaxies



Évolution cosmologique de B dans la toile cosmique ?

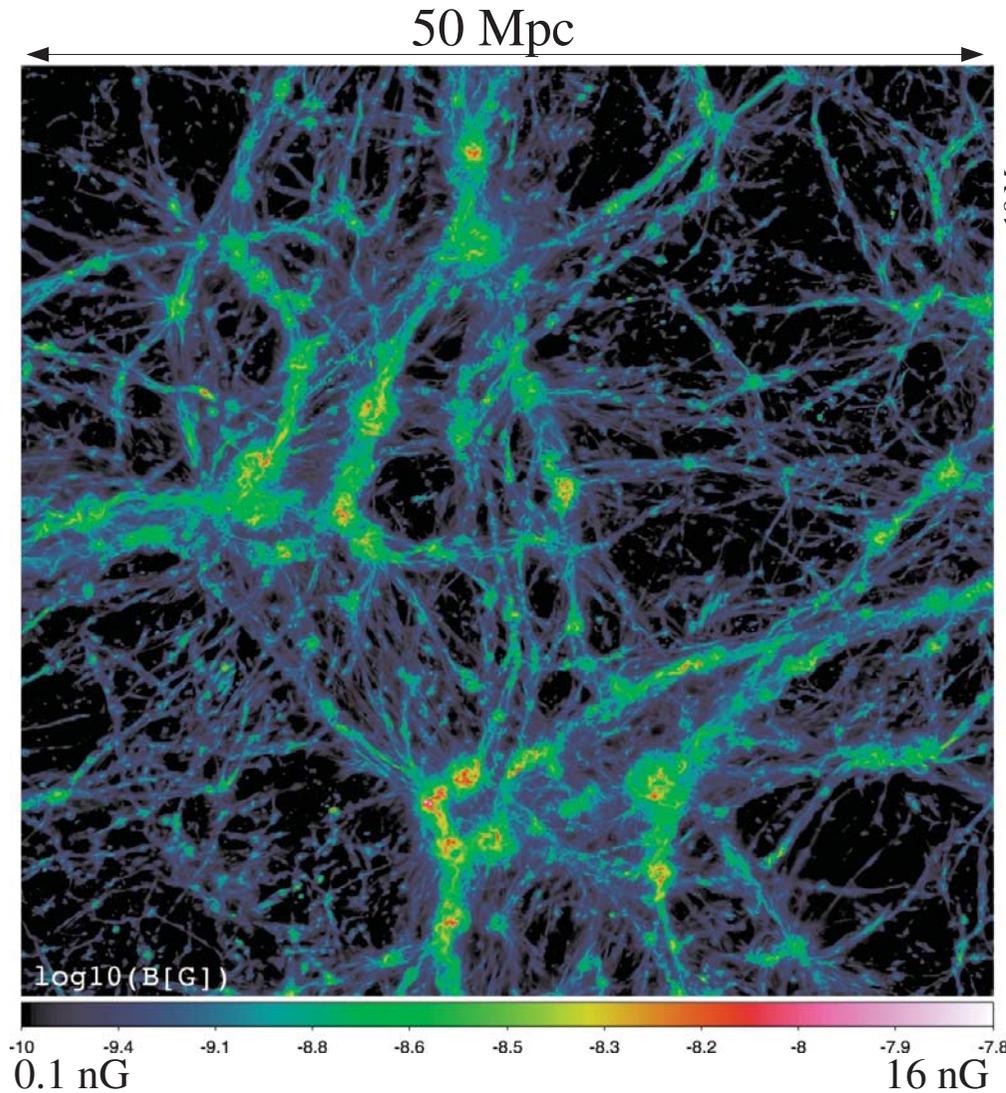
- Dans les amas de galaxies



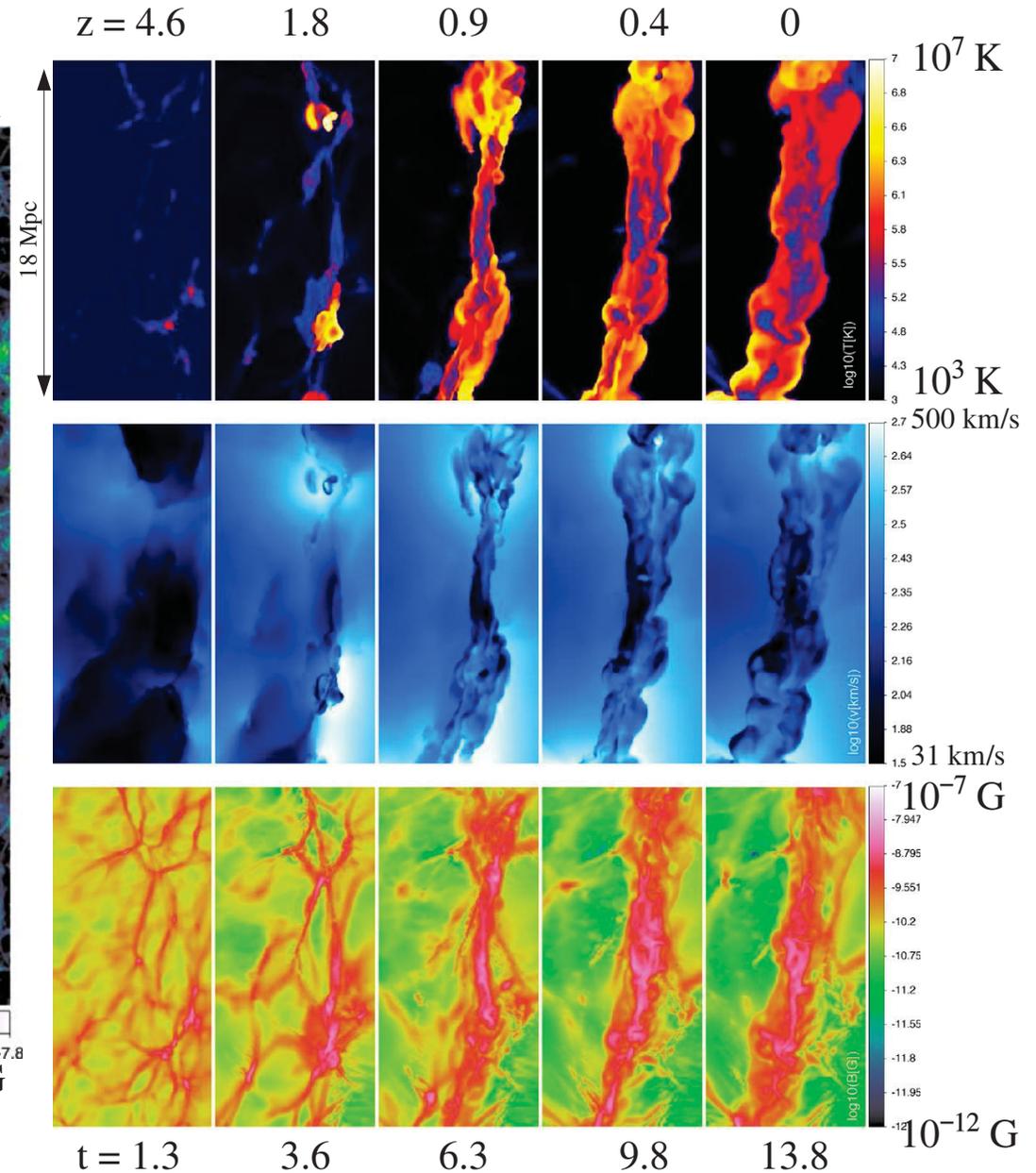
Évolution cosmologique de B dans la toile cosmique ?

- Dans les filaments intergalactiques

Vazza et al. 2014



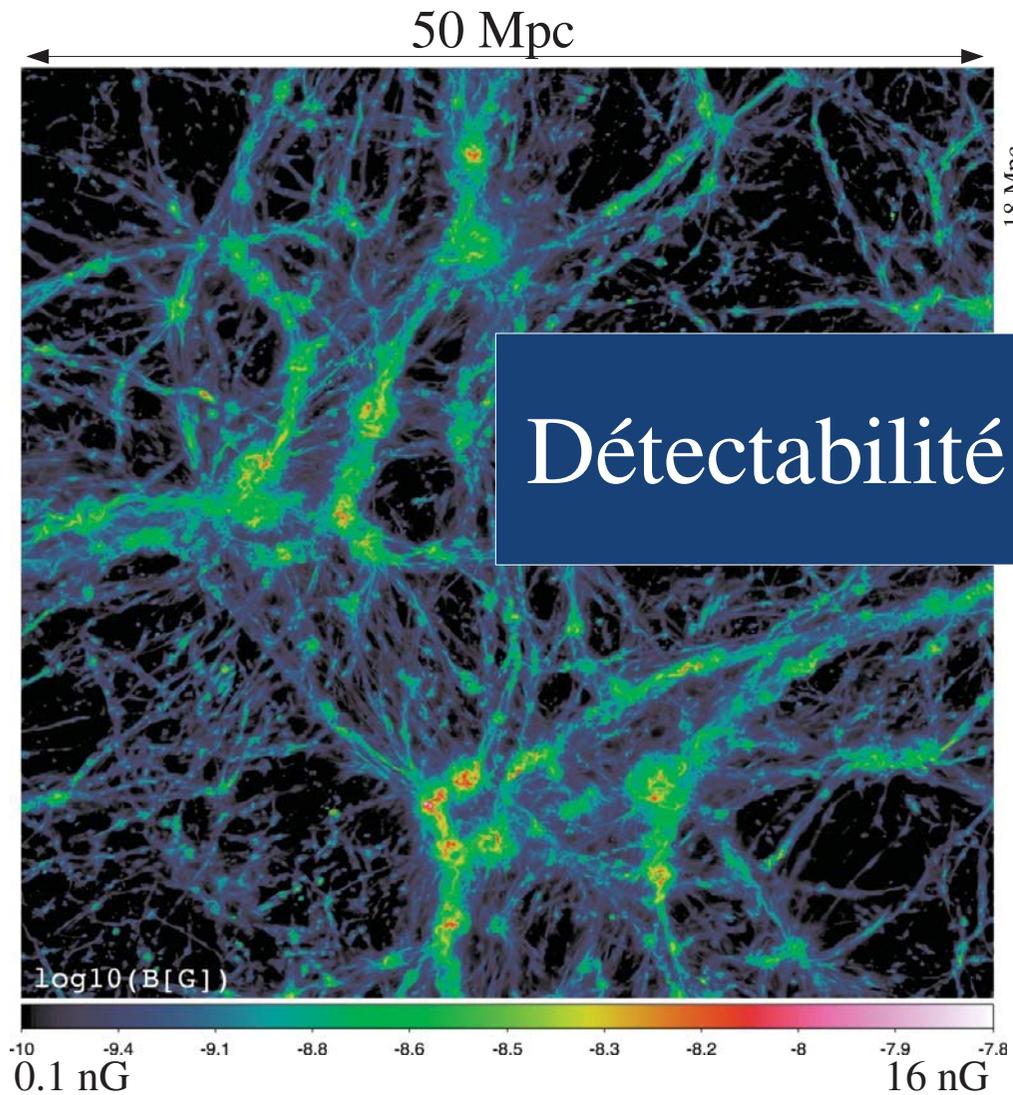
Toile cosmique à $z = 0$



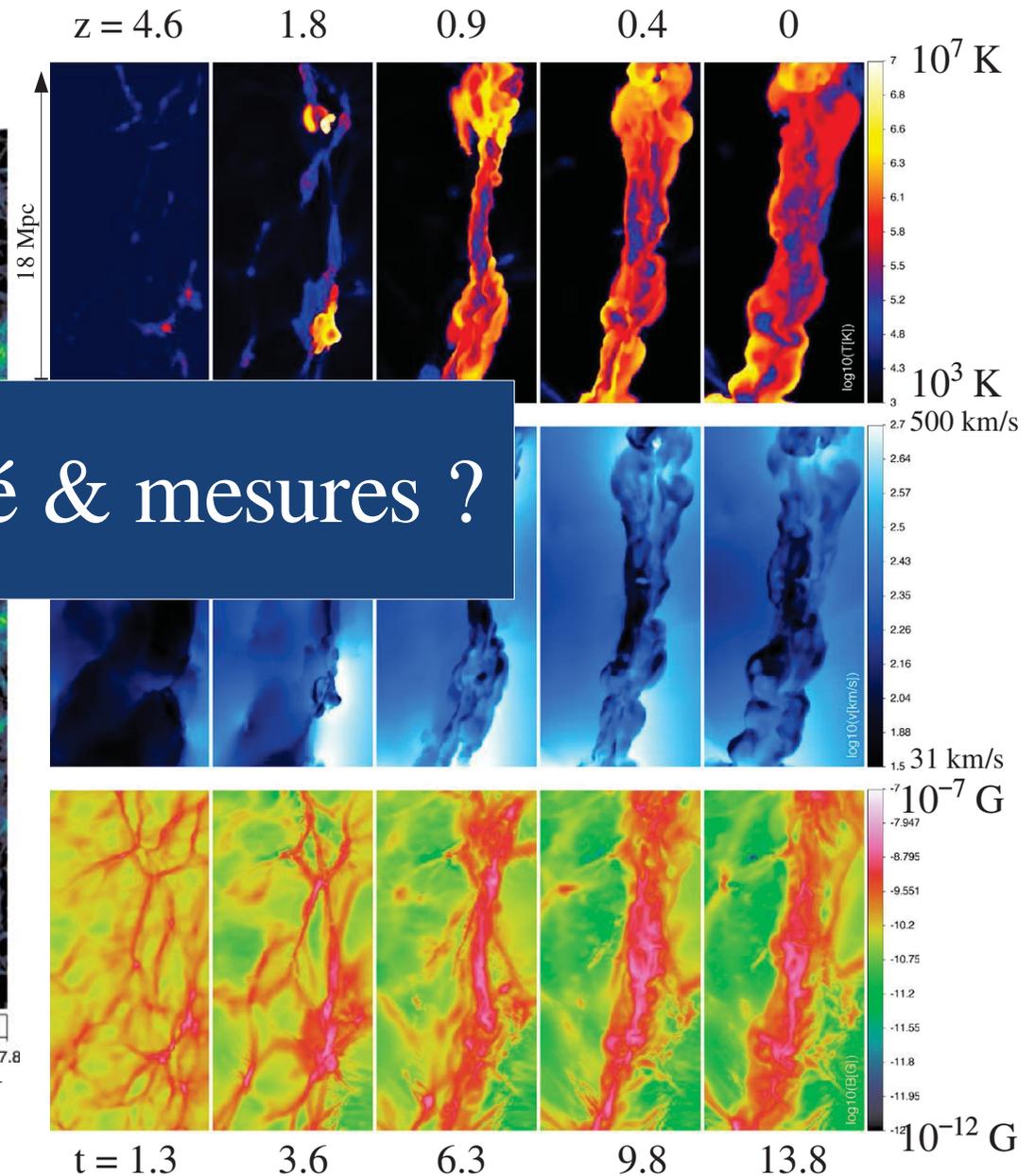
Évolution cosmologique de B dans la toile cosmique ?

- Dans les filaments intergalactiques

Vazza et al. 2014



Toile cosmique à $z = 0$



Détectabilité & mesures ?

Square Kilometre Array



- Galaxy evolution, cosmology and dark energy
- Strong-field test of gravity using pulsars and black holes
- **The origin and evolution of cosmic magnetism**
- **Probing the Cosmic Dawn**
- The cradle of life
- Exploration of the unknown

Square Kilometre Array

Phase 1 : construction 2020 -...

→ SKA1 : ~10 % surface totale, op. sci. vers 2023

Phase 2 : construction 2025 – 2030 ...

→ SKA2



SKA1 mid

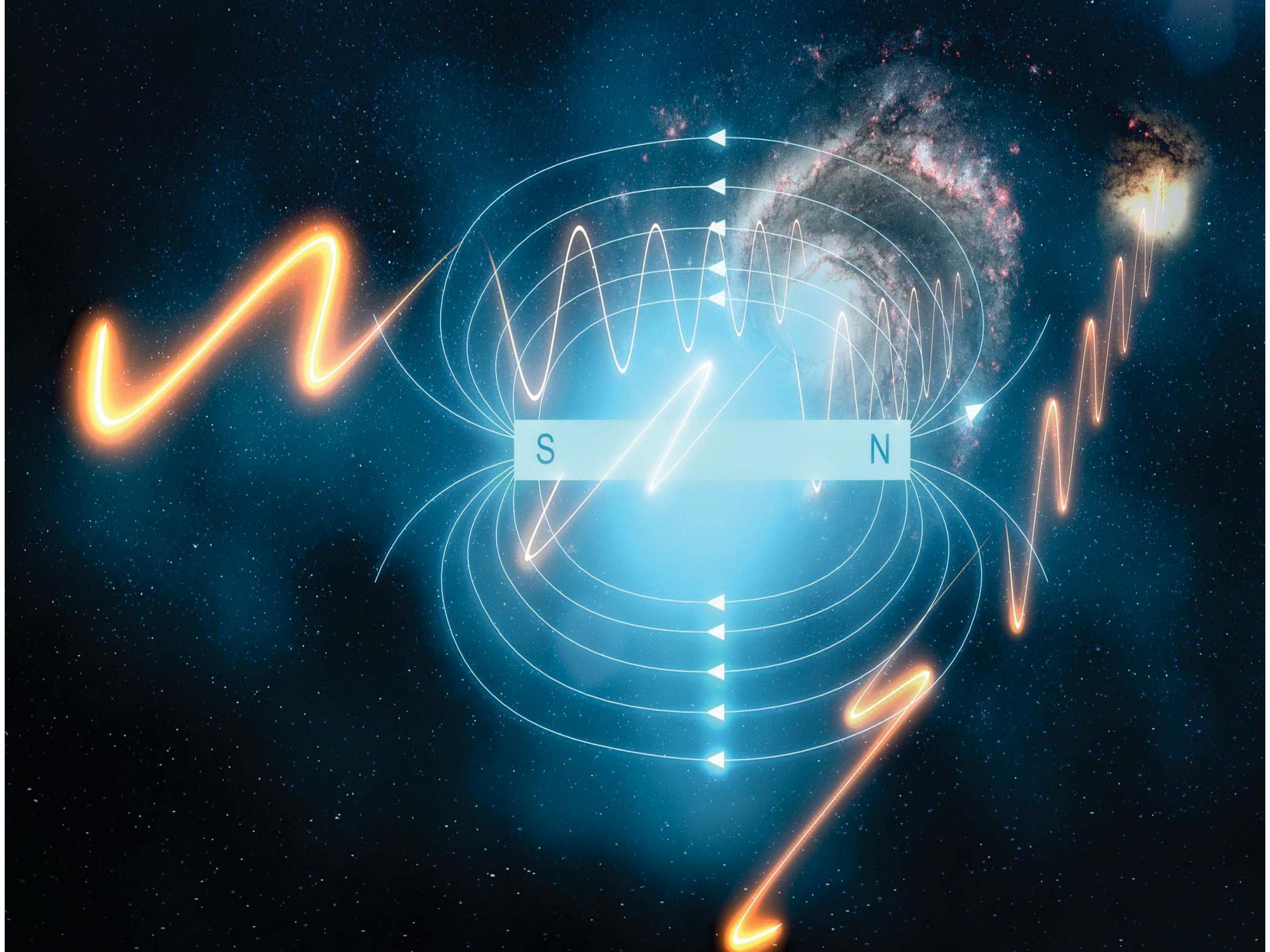
- Réseau de paraboles sur ~150 km de diamètre
- 350 MHz – 14 GHz
- 197 paraboles : 15 m & 13.5 m (64 MeerKAT)
- Pulsars, 21cm un. local, **B galactique et MIG**,...

SKA1 low

- Réseau de dipôles sur ~ 40 km de diamètre
- 50 MHz – 350 MHz
- 131 000 double-polarisation (+ ASKAP)
- **Réionisation, B galactique et MIG**, exoplanètes,...

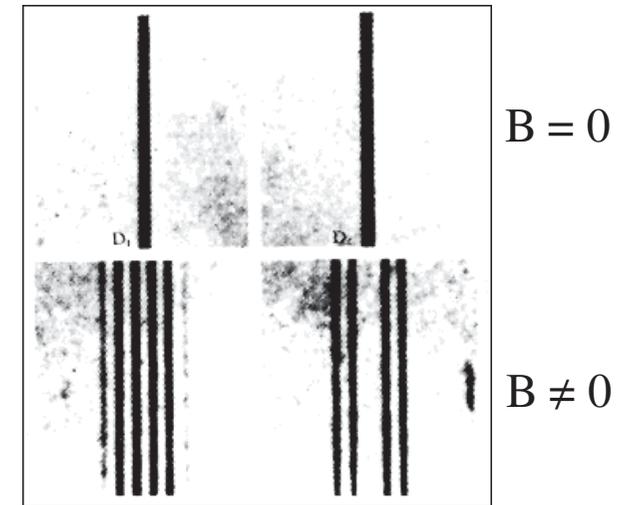
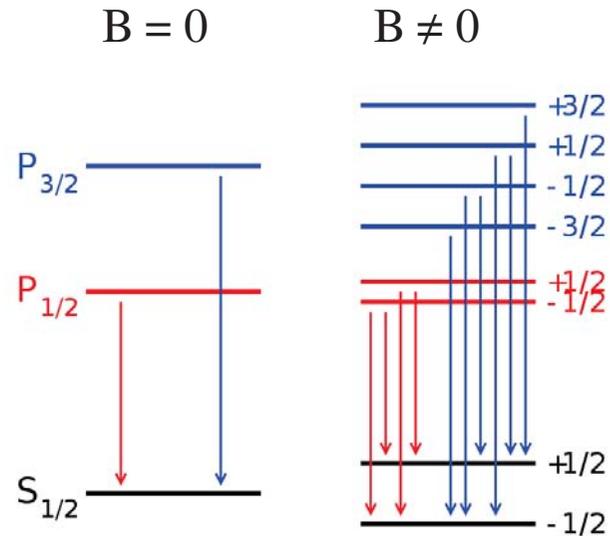
En guise de conclusion

- Origine des champs magnétiques cosmologiques :
 - Vraisemblablement multiple
 - Processus astrophysiques simples : contribution inévitable
 - Univers dans son ensemble : probablement magnétisé très tôt
- Evolution des champs magnétiques :
 - Action sur la matière à grande échelle : impact possible, mais modeste
 - Action de la matière sur les champs : non-linéarités...
 - empreintes initiales floutées, voire effacées
- Détections et mesures :
 - Avenir proche « radioux » : nombreux programmes dédiés prévus
 - Chercher les origines : loin des nœuds de la toile cosmique
 - Identification des diverses contributions : ardu, mais passionnant !



Comment mesure-t-on le champ magnétique ?

- Effet Zeeman :



Levée de dégénérescence hyperfine

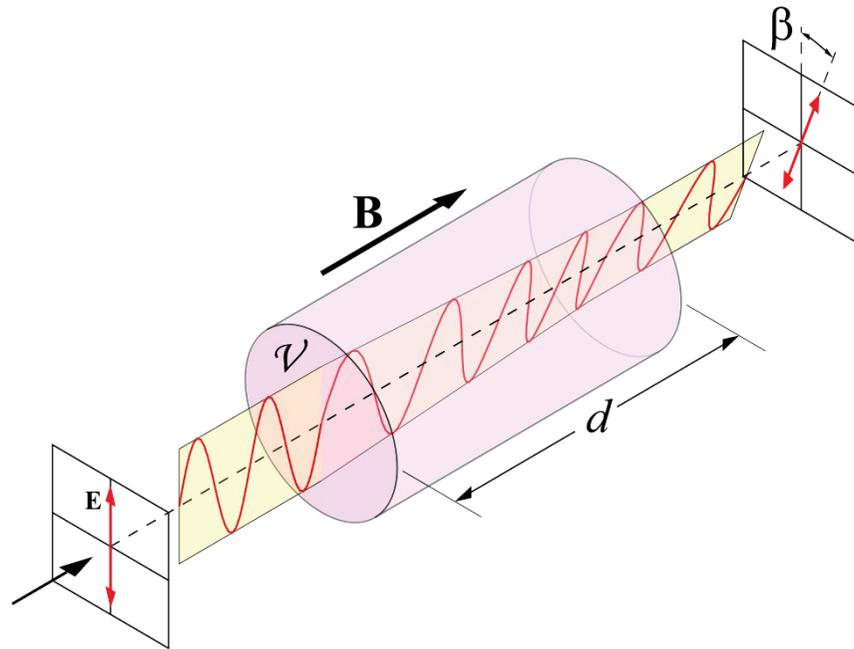
Apparition de raies multiples dans les spectres

Séparation des raies \rightarrow amplitude du champ magnétique

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = 1.4g \frac{B}{\mu\text{G}} \left(\frac{\nu}{\text{Hz}} \right)^{-1}$$

Comment mesure-t-on le champ magnétique ?

- Rotation Faraday :



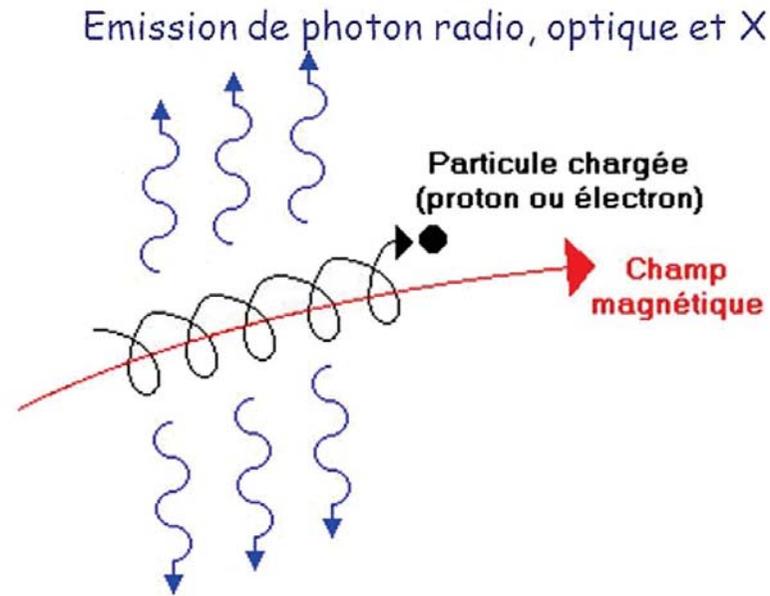
Biréfringence → Rotation de la direction de polarisation des photons

$$\beta = RM \lambda^2 \quad \text{avec}$$

$$RM \propto \int_0^{l_s} n_e(l) B_{||}(l) dl$$

Comment mesure-t-on le champ magnétique ?

- Rayonnement synchrotron :



Force de Lorentz → accélération charges → rayonnement

Émissivité :

$$\dot{j}_\nu \propto n_{e,0} \nu^{(1-\gamma)/2} B_\perp^{(1+\gamma)/2}$$

SKA1 mid



SKA1 low



SKA1 MID - the SKA's mid-frequency instrument

The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.



SKA1 LOW - the SKA's low-frequency instrument

The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.



Location:
South Africa

Frequency range:
350 MHz to
14 GHz

~200 dishes
(including 64 MeerKAT dishes)

Total collecting area:
33,000m²



or
126 tennis courts



Maximum distance between dishes:
150km



Total raw data output:
2 terabytes per second
62 exabytes per year



Enough to fill
340,000 average laptops with content **every day**

Compared to the JVLA, the current best similar instrument in the world:



4x the resolution

5x more sensitive

60x the survey speed

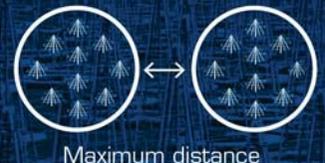


Location: Australia

Frequency range:
50 MHz to
350 MHz

~130,000 antennas spread between
500 stations

Total collecting area:
0.4km²



Maximum distance between stations:
65km



Total raw data output:
157 terabytes per second
4.9 zettabytes per year



Enough to fill up
35,000 DVDs every second

5x

the estimated global internet traffic in 2015
(source: Cisco)



Compared to LOFAR Netherlands, the current best similar instrument in the world:

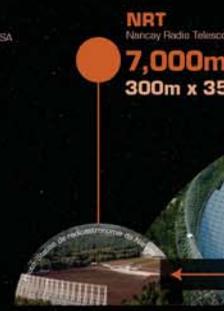
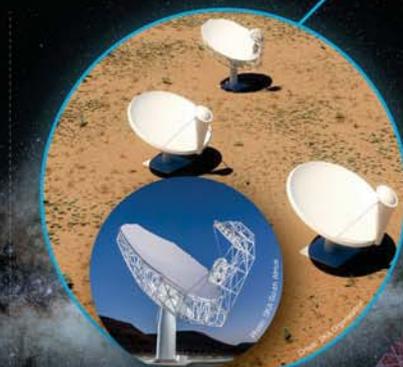
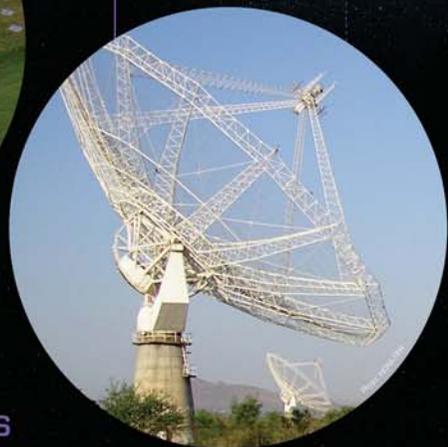
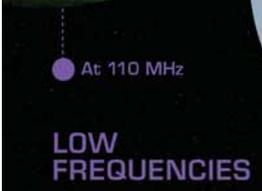


25% better resolution

8x more sensitive

135x the survey speed

How does SKA1 compare with the world's biggest radio telescopes?



SKA1 LOW
Australia
419,000m²
~130,000 antennas

SKA1 MID
South Africa
33,000m²
~200 dishes

Lovell
UK
4,500m²
76m dish

Effelsberg
Germany
7,800m²
100m dish

MWA
Murchison Widefield Array, Australia
2,500m²
2048 antennas

LOFAR
Low Frequency Array for Radio Astronomy, Netherlands
52,000m²
34,000 antennas

GMRT
Giant Metrewave Radio Telescope, India
48,000m²
30 dishes

MeerKAT
South Africa
9,000m²
64 dishes

JVLA
Karl G. Jansky Very Large Array, USA
13,200m²
27 dishes

NRT
Nancay Radio Telescope, France
7,000m²
300m x 35m antenna

Parkes
Australia
3,200m²
64m dish

GBT
Green Bank Telescope, USA
7,800m²
100m dish

FAST
Five Hundred Meter Aperture Spherical Telescope, China
71,000m²
500m dish

Arecibo
Puerto Rico
42,000m²
305m dish

ALMA
Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array, Chile
6,500m²
66 dishes

At 110 MHz

LOW FREQUENCIES

ARRAYS

MID FREQUENCIES

SINGLE DISHES

HIGH FREQUENCIES

NON-STEERABLE

The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.

A telescope's capacity to receive faint signals - called sensitivity - depends on its collecting area, the bigger the better. But just like you can't compare radio telescopes and optical telescopes, comparison only works between telescopes working in similar frequencies, hence the different categories above.

The collecting area is just one aspect of a telescope's capability though. Arrays like the SKA have an advantage over single dish telescopes: by being spread over long distances, they simulate a virtual dish the size of that distance and so can see smaller details in the sky, this is called resolution.