

# 宇宙磁場研究の 最近の進展

高橋慶太郎

@ ATセミナー

2009年12月9日

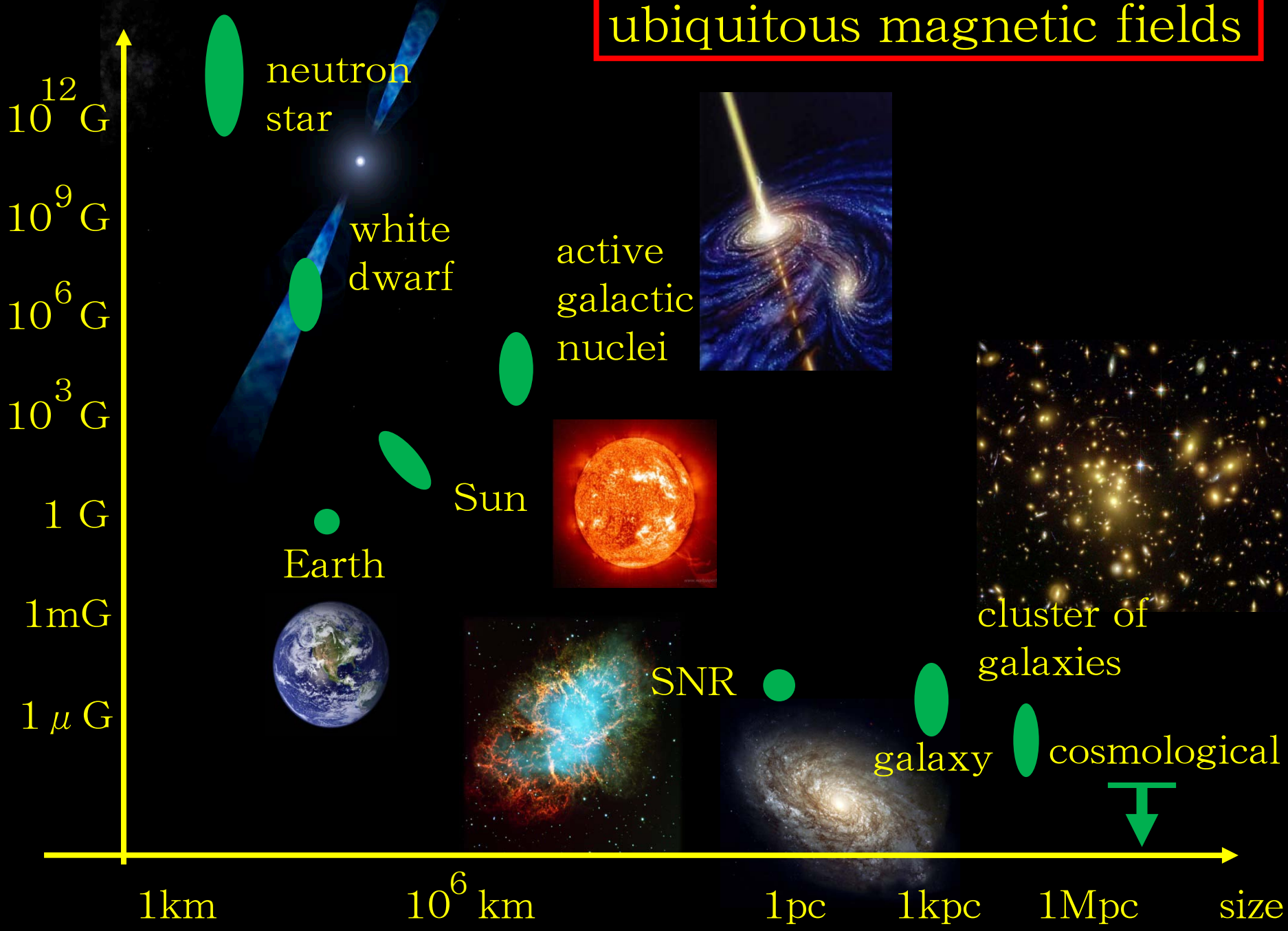
# 目次

- 1、イントロダクション
- 2、宇宙磁場の生成
- 3、宇宙論的Faraday rotation

最近のイギリス出張やLOFAR関係者との接触を通じて考えていることを話す。

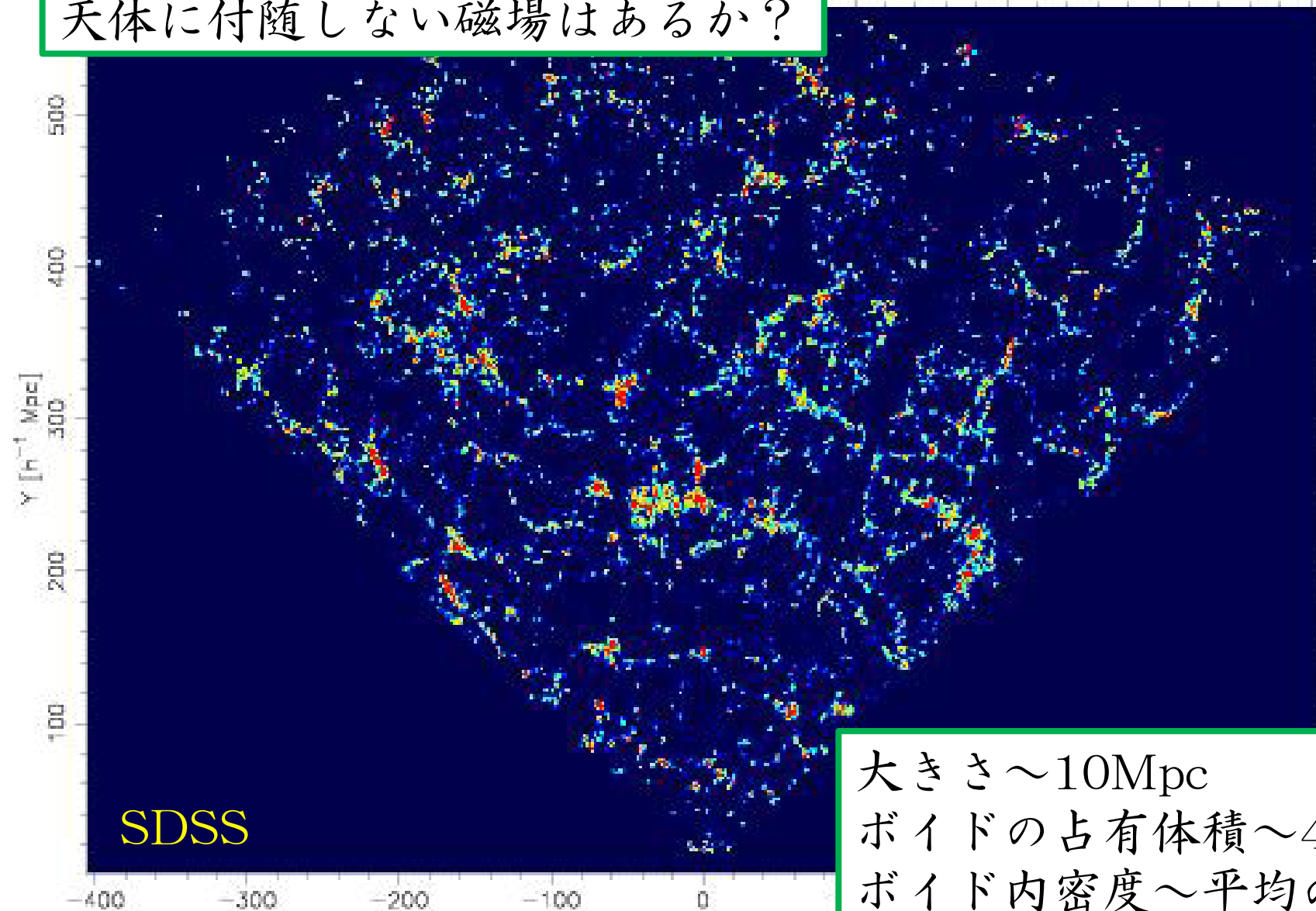
# 1、イントロダクション

ubiquitous magnetic fields



# 銀河間空間 (ボイド)

天体に付随しない磁場はあるか？



大きさ $\sim 10$ Mpc  
ボイドの占有体積 $\sim 40\%$   
ボイド内密度 $\sim$ 平均の $10\%$

# 宇宙論的磁場の生成

物理による分類

● 量子論的

電磁場の共形不変性を破る  
相互作用を入れる

● radiation drag

光子・陽子・電子の系で  
光子が電子を引きずる

● Biermann battery

ポリトロープでないガスで  
密度と圧力の分布がずれる

時系列

インフレーション

相転移

ゆらぎによる生成

(第1世代星)

(原始銀河)

再イオン化

銀河や銀河団  
からの流れ込み

# モチベーション

## 磁場の起源

特に銀河や銀河団。弱い種磁場があればダイナモで増幅されるだろう。種磁場はどこから来た？

## 構造形成以前の宇宙を探る

構造形成以前のいろんな現象の名残が磁場としてボイドに現在まで残っているかもしれない。

## 構造形成への影響

第1世代星、原始銀河の形成に影響？

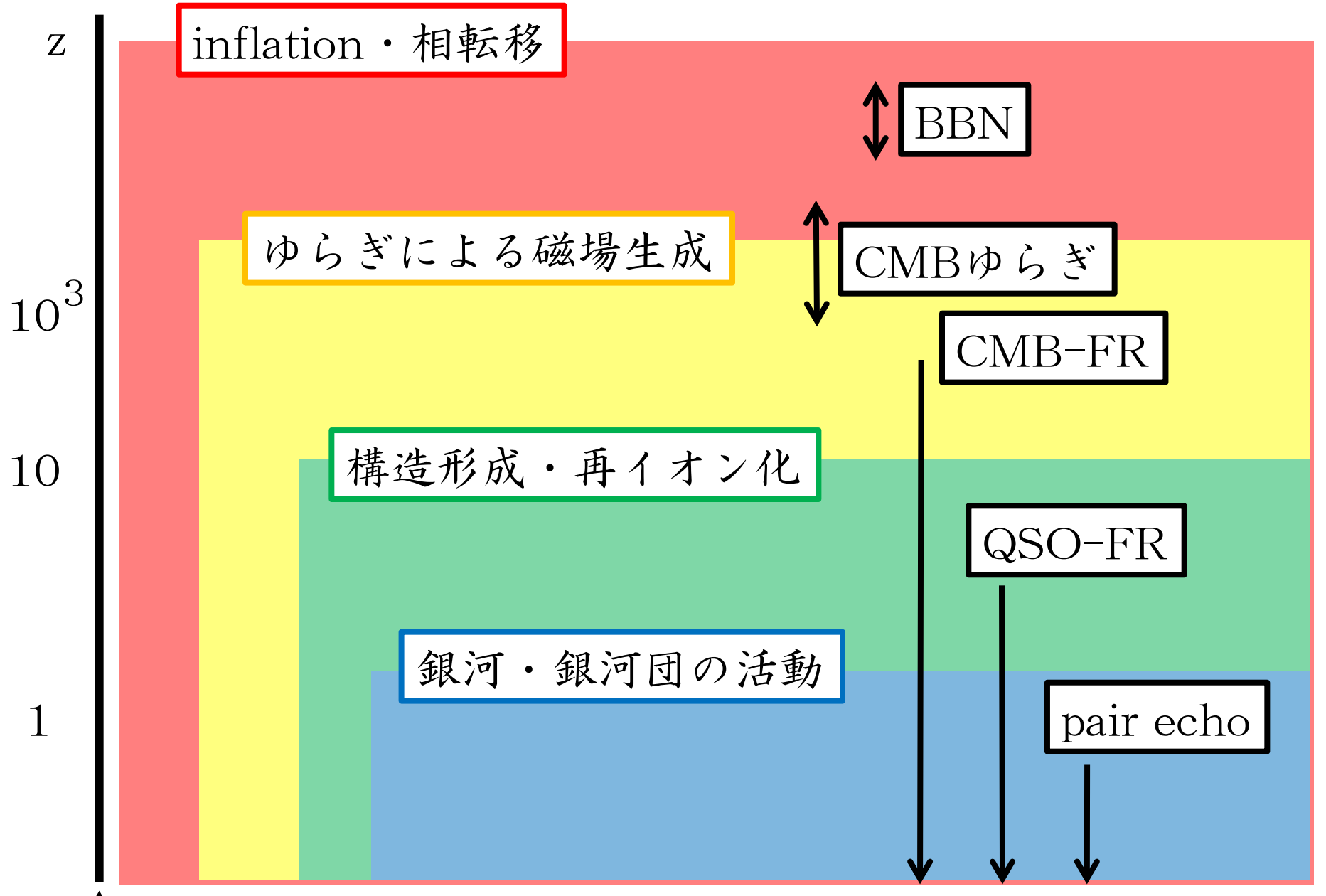
## 超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の軌道が曲げられてしまう。

## ボイドの物理的状态

ボイドの中はどうなっている？銀河・銀河団との相互作用は？

# 宇宙論的磁場の生成と観測





# 今日の話

今後の宇宙論的磁場の観測は

- ・ 遠方QSOのFaraday rotation
- ・ pair echo

が中心になると思われる。

これらの観測で何が明らかになるのかを考えるため  
2章で宇宙論的磁場生成のレビューをする。

3章で宇宙論的なFaraday rotationについて  
最近考えていることを話す。

## 2、宇宙磁場の生成

# 宇宙論的磁場の生成

物理による分類

● 量子論的

電磁場の共形不変性を破る  
相互作用を入れる

● radiation drag

光子・陽子・電子の系で  
光子が電子を引きずる

● Biermann battery

ポリトロープでないガスで  
密度と圧力の分布がずれる

時系列

インフレーション

相転移

ゆらぎによる生成

(第1世代星)

(原始銀河)

再イオン化

銀河やクェーサー  
からの流れ込み

# 量子論的生成

- インフレーション中に量子論的に生成 Turner & Widrow, 1988  
→ conformal invarianceを破る  
→ 重力との非最小結合、ディラトンなど

Bamba & Sasaki (2007)による一般的な定式化

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [R + I(R, \Phi, \dots) F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \dots]$$
$$A''(k, \eta) + \frac{I'}{I} A'(k, \eta) + k^2 A(k, \eta) = 0$$

superhorizon : 長波長近似

subhorizon : WKB近似

$$\Omega_B(k) \approx \left( \frac{T_r}{M_{\text{Pl}}}\right)^4 (-k\eta_r)^{4-\alpha} \frac{1}{I(\eta_r)}$$

Iを小さくすればいくらでも大きくなる。  
しかし最近反作用が議論されて磁場はほとんどできないということになった。

# 古典的磁場生成の一般論①

KT et al. (2008)

磁場生成には電場の回転が必要

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

普通は磁場生成は起こらず、なんらかの「外力」が必要

$$\frac{1}{\omega_p^2} \partial_t \vec{j} = \vec{E} - \eta_{\text{eff}} \vec{j} + \vec{C}$$

電子と陽子で異なる力



$$m_p n_p [\partial_t \vec{v}_p + (\vec{v}_p \cdot \nabla) \vec{v}_p]$$

$$= e n_p (\vec{E} + \vec{v}_p \times \vec{B}) - e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e) - m_p n_p \nabla \Phi, + \vec{F}_p$$

$$m_e n_e [\partial_t \vec{v}_e + (\vec{v}_e \cdot \nabla) \vec{v}_e]$$

$$= -e n_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e) - m_e n_e \nabla \Phi, + \vec{F}_e$$

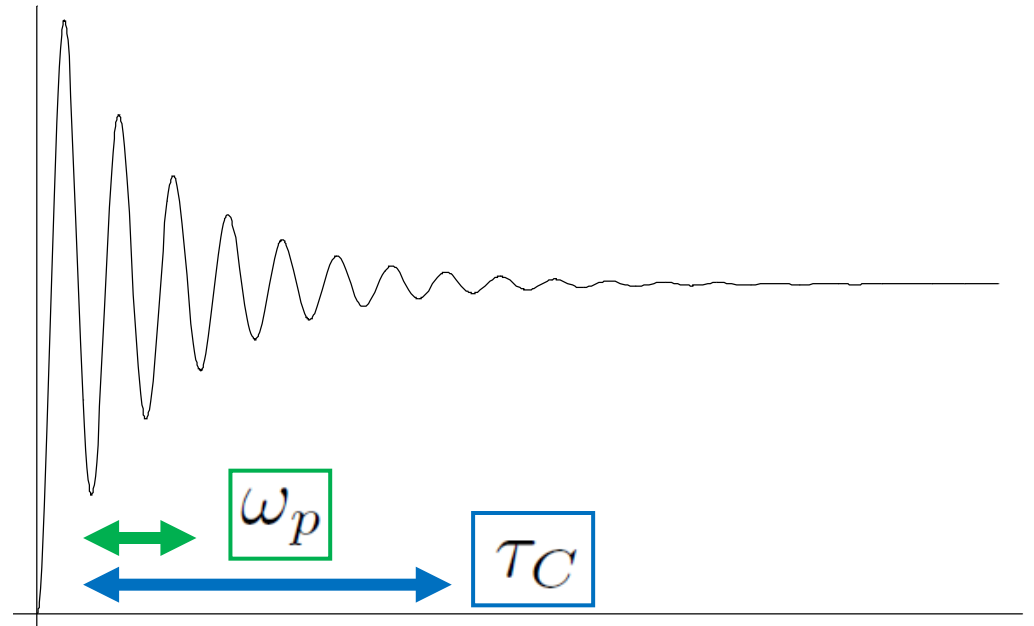
## 古典的磁場生成の一般論②

電荷密度の発展方程式（オームの法則の発散）

$$\partial_t^2 \rho + \frac{1}{\tau_C} \partial_t \rho + \omega_p^2 \rho = \omega_p^2 \nabla \cdot \vec{C}$$

電荷密度はプラズマ振動するがクーロン散乱で減衰し、  
やがてdynamical time scaleでは定常に落ち着く

$$\rho \approx \nabla \cdot \vec{C}$$



# 古典的磁場生成の一般論③

定常状態では次のような解になる

$$\rho = \nabla \cdot \vec{C},$$

$$\vec{j} = -\partial_t \vec{C} - \int dt \nabla \times \nabla \times \vec{C},$$

$$\vec{E} = \vec{C},$$

$$\vec{B} = - \int dt \nabla \times \vec{C},$$

- 電子が「外力」に押されるのと電場がつりあう
- 「外力」の回転が磁場になる
- 「外力」がなくなると、電場・電荷密度は消える  
磁場・電流は残る

「外力」は？ 光子 → radiation drag  
電子 → Biermann battery

# radiation drag①

radiation dragの場合、「外力」は

$$\vec{C} \equiv \frac{1 - \beta^3}{1 + \beta} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{e} \left( \delta\vec{v}_{\gamma b} - \frac{1}{4} \vec{v}_b \cdot \Pi_\gamma \right)$$

光子・荷電粒子の速度差      光子の粘性

磁場生成のために必要なこと

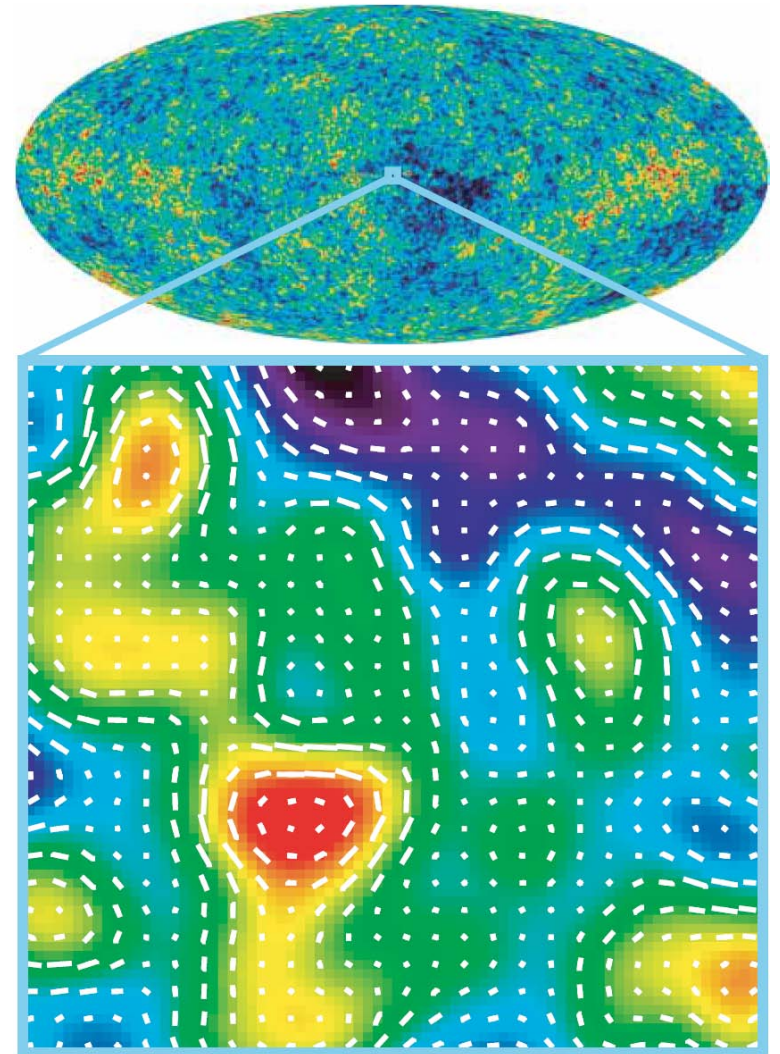
- ・ 光子、陽子、電子の3流体
  - ・ ある程度以上optically thickであることが必要
- 初期宇宙（再結合前）、再イオン化



## radiation drag②

初期宇宙のゆらぎ KT, Ichiki, Sugiyama et al., 05, 06, 07, 08

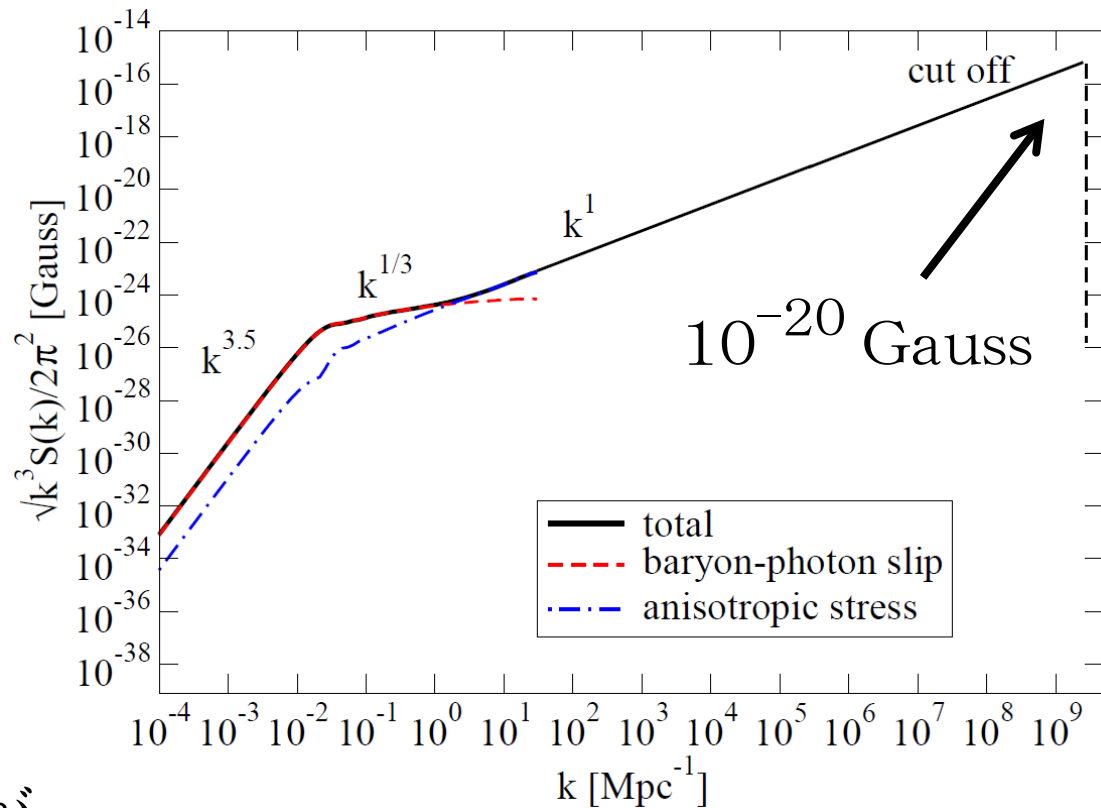
- ・光子ゆらぎ (CMBゆらぎ) が電子ゆらぎを引きずる  
→ CMBゆらぎと相関した磁場ができる
- ・回転成分は2次摂動でできる
- ・光子と電子の結合の強さ  
磁場は光子と電子のずれからできる



# radiation drag③

右図は磁場のスペクトル。  
ただし純粋な2次摂動の  
寄与が入っておらず、  
(1次) × (1次)  
という形の項だけを  
評価している。

ボルツマン方程式の  
2次の定式化は最近  
いろんな人が行っているが、  
細かいところで一致していないことが多々あった。  
最近C. Pitrou (2009)がかなり包括的な論文を出した。  
ポーツマスで彼からいろいろアドバイスをもらって  
ようやく磁場研究が完成に向かいつつある。

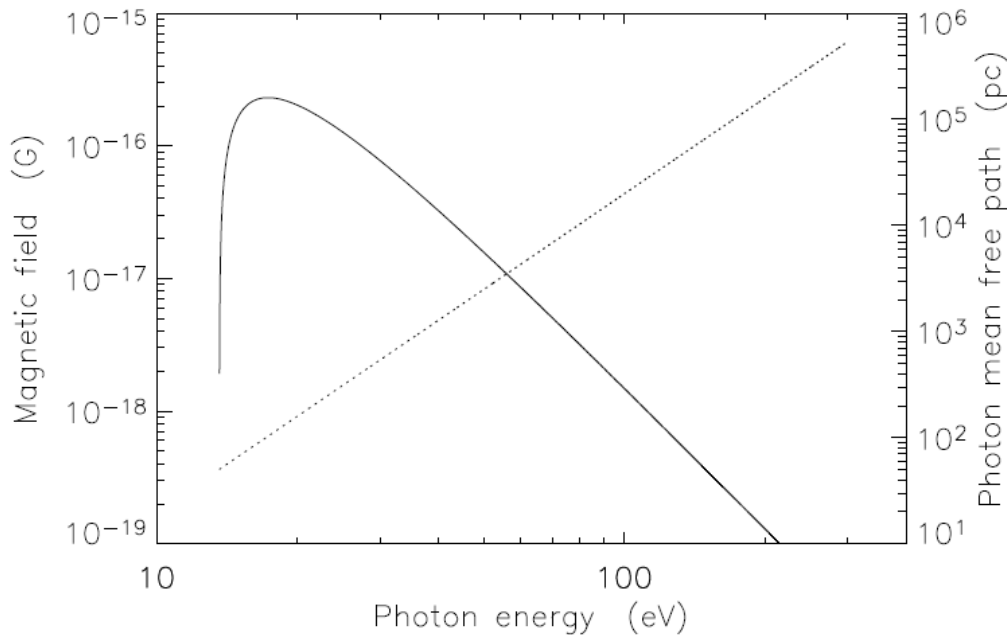
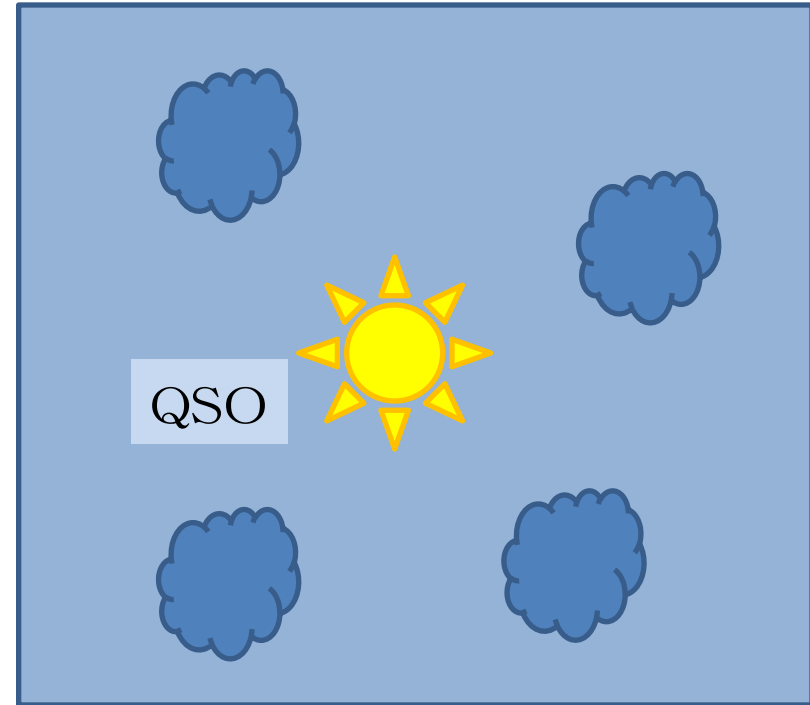


# radiation drag④

再イオン化 Langer et al., 03, 05

QSOなどからの紫外線がまわりの非一様なガスの中性水素をイオン化しながら電子を引きずる。

- ・ 低エネルギー紫外線  
近傍・強い磁場
- ・ 高いエネルギー紫外線  
遠方・弱い磁場



$$B \approx \begin{cases} 10^{-18} \text{ Gauss} & \text{源近傍} \\ 10^{-22} \text{ Gauss} & \text{宇宙全体} \end{cases}$$

# Biermann battery①

Biermann 1950

陽子・電子の2流体

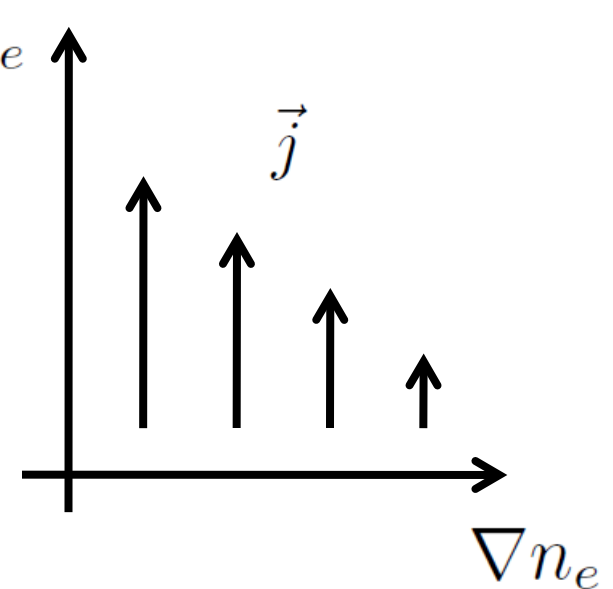
$$\vec{C} = \frac{\nabla p_e}{en_e}$$

$$\nabla \times \vec{C} = -\frac{\nabla n_e \times \nabla p_e}{en_e^2} = -\frac{\nabla n_e \times \nabla T_e}{en_e}$$

密度勾配と圧力勾配がずれると働くが、ポリトロープでは無理。

→ 衝撃波、放射加熱などが必要

→ 構造形成に伴う衝撃波、超新星残骸、再イオン化



$$B \approx \frac{T_e \tau}{eL^2} \approx \frac{T_e}{eVL}$$

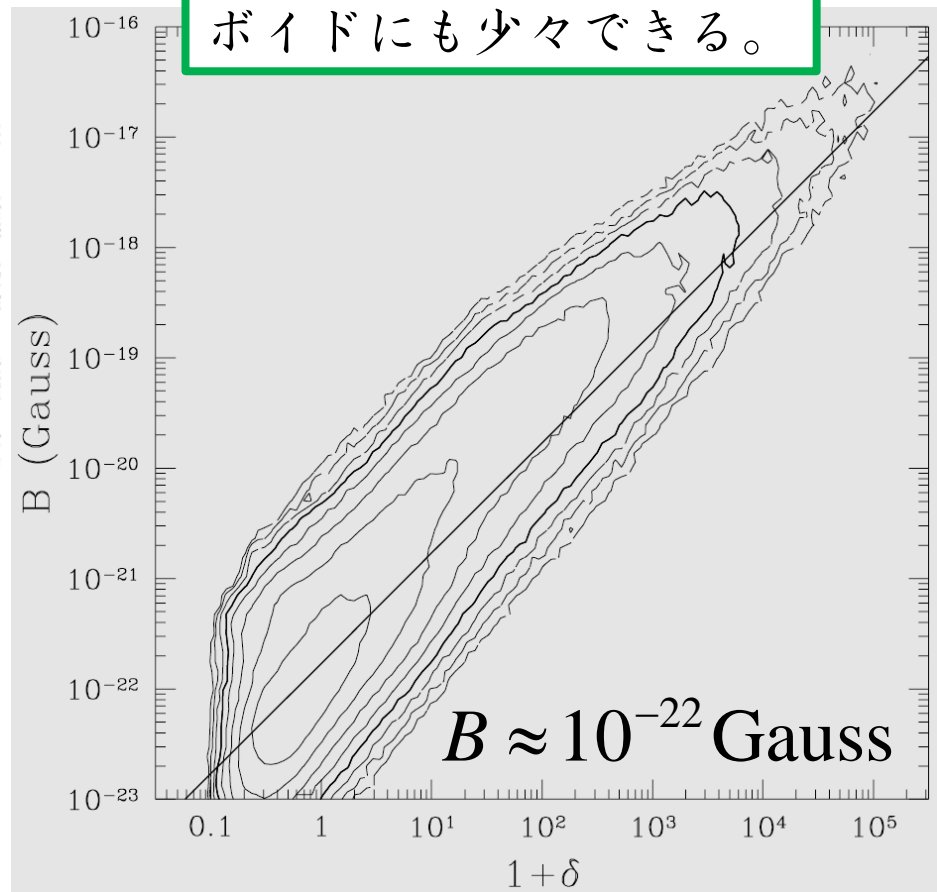
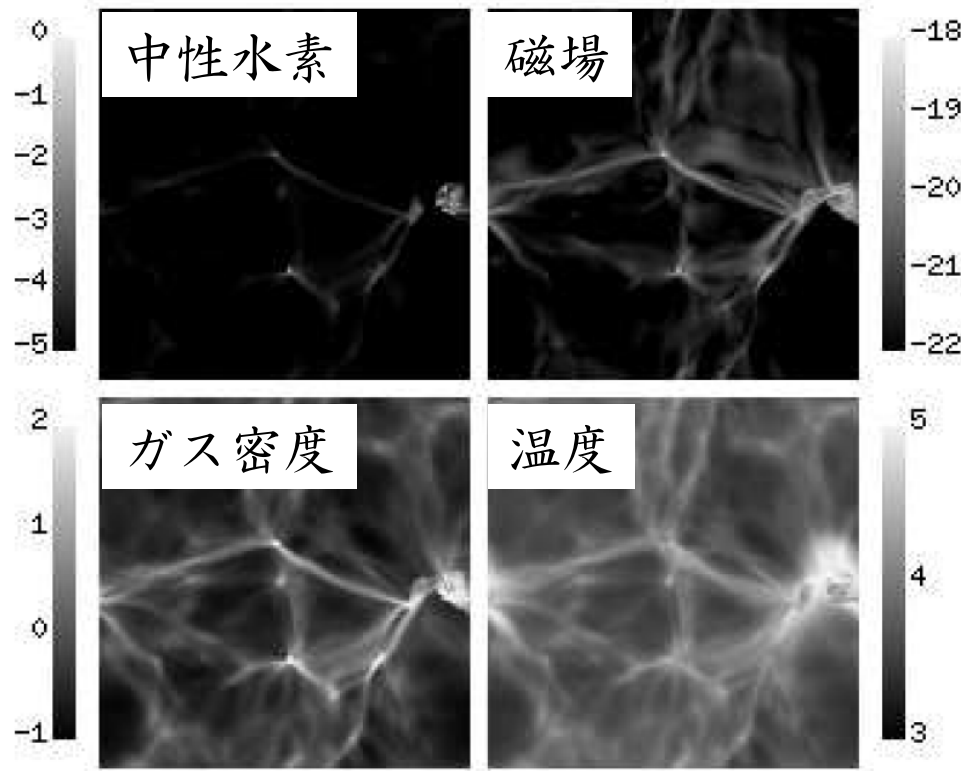
$$\approx 10^{-22} \text{ Gauss} \left( \frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right) \left( \frac{V}{0.01c} \right)^{-1} \left( \frac{L}{1 \text{ kpc}} \right)^{-1}$$

# Biermann battery②

再イオン化 Gnedin et al. 2000

宇宙論的流体シミュレーション  
適当な輻射輸送、適当な星形成  
Biermann + radiation drag

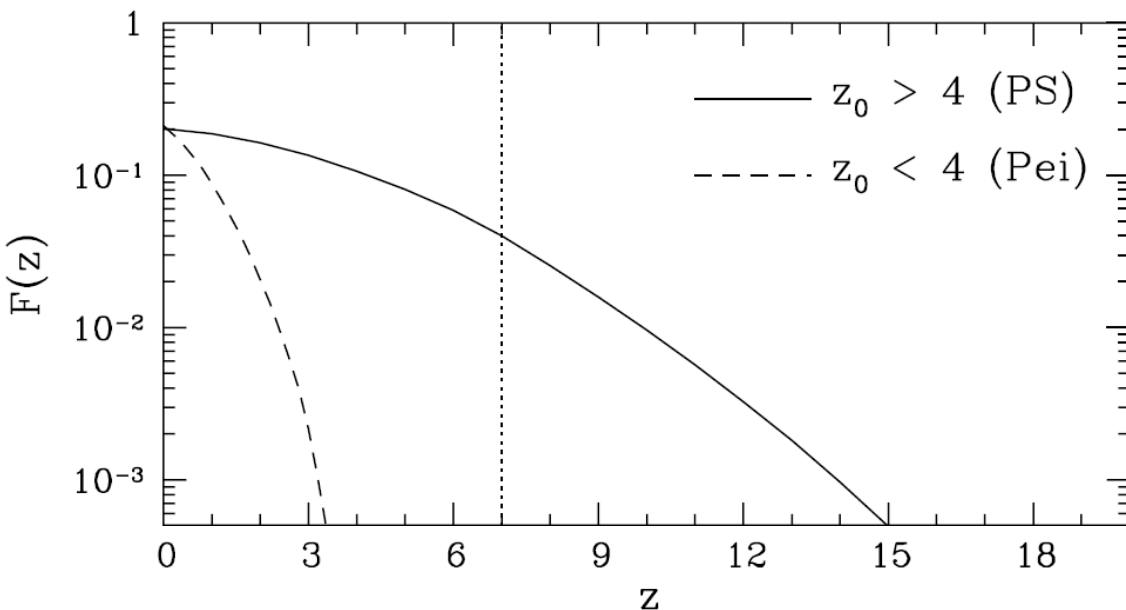
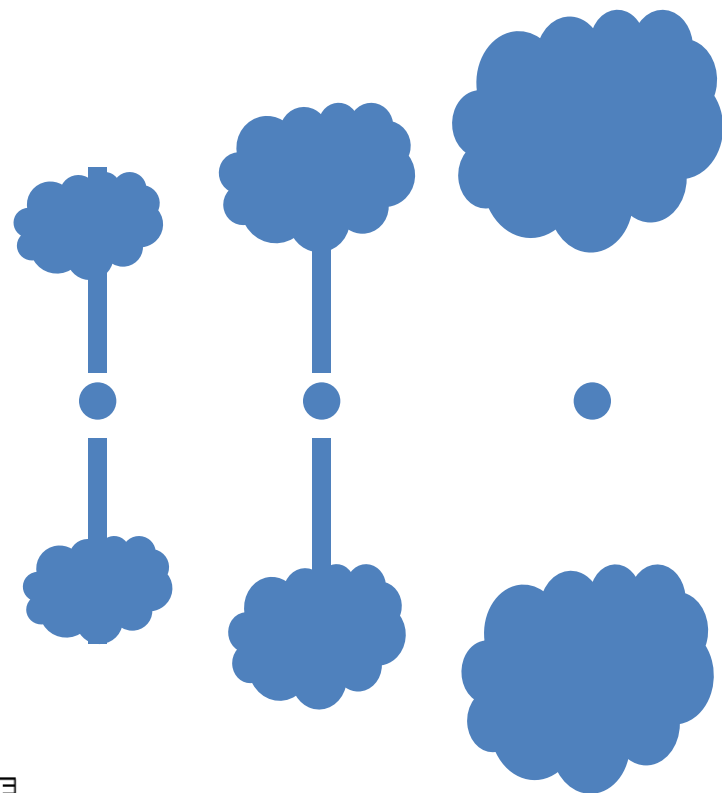
基本的には大構造に付随した磁場ができるがボイドにも少々できる。



# quasar outflow

Furlanetto & Loeb 2001

- 磁場を含んだガスをジェットで銀河間空間に放出
  - 活動が終わってもバブルは膨張
- 銀河間空間の内の一部は磁場に汚染される



宇宙の20%程度の空間が  
1nG程度の磁場に汚染  
参考：voidのmetal  
 $< 10^{-1.8} Z_{\text{sun}}$  ( $z < 0.1$ )  
(Stocke et al. 2007)  
 $< 10^{-3.5} Z_{\text{sun}}$  ( $z = 3-5$ )  
(Simcoe et al. 2004)

# 宇宙磁場の生成まとめ

ボイドに（微弱な）磁場が存在するのは間違いない

- ・生成（ $\sim 10^{-20}$  Gauss）

インフレーション、相転移、ゆらぎ、  
再イオン化、構造形成・・・

- ・流れ込み

クェーサー、銀河、銀河団・・・

磁場の強さ、分布、スペクトルなどを測ることが  
できれば磁場生成のメカニズムやクェーサーの  
活動性、ボイドと銀河・銀河団の相互作用を  
探ることができるだろう。

### 3、宇宙論的Faraday rotation



## 磁場の観測

様々な天体で様々な方法が用いられてきた。

- Zeeman効果：太陽、分子雲
- シンクロトロン：銀河、銀河団
- Faraday rotation：銀河、銀河団、銀河間空間
- 宇宙背景放射：宇宙論的
- ビッグバン元素合成：宇宙論的
- 超高エネルギー宇宙線：局所超銀河団
- pair echo：銀河間空間

# Faraday rotation

磁場のあるプラズマ中では左巻き・右巻きの円偏光の位相速度が異なる

→ 直線偏光の偏光面の角度がまわる

$$\phi = (\text{RM})\lambda^2 + \phi_0$$

rotation measure

$$\begin{aligned} (\text{RM}) &= \frac{e^3}{2\pi m_e^2} \int n_e(\ell) B_{\parallel}(\ell) d\ell \\ &= 0.08 [\text{rad m}^{-2}] \int \left( \frac{n_e}{10^{-6} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}}{1 \text{ nG}} \right) \left( \frac{d\ell}{100 \text{ Mpc}} \right) \end{aligned}$$

ただし光源から観測者までの積分なので、どこの磁場を測っているかについては不定性がある。特に銀河系内の磁場はよく邪魔になる。

# 宇宙論的Faraday rotation①

一様膨張宇宙での一様磁場によるFaraday rotation

ガスが濃くなる  $n_e(z) \propto (1+z)^3$

磁場が強くなる  $B(z) \propto (1+z)^2$

波長が短くなる  $\lambda(z) \propto (1+z)^{-1}$

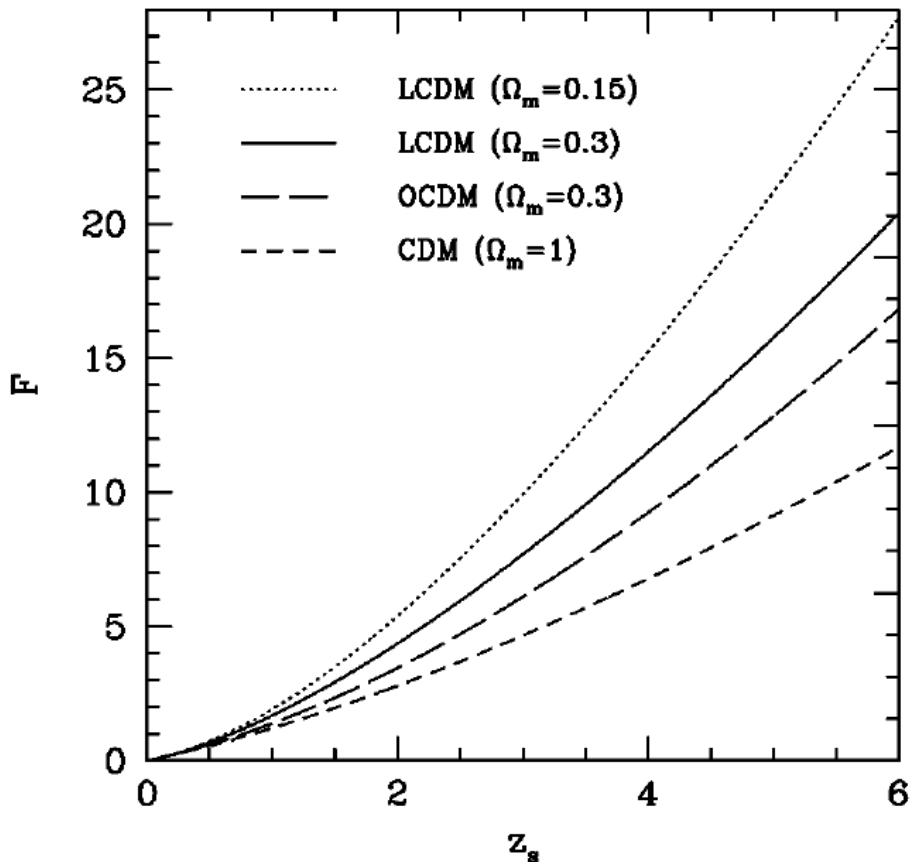
$$\begin{aligned}(\text{RM})_{\text{IGM}}(z) &= \frac{e^3 \cos \theta}{2\pi m_e^2} \int \frac{n_e(z) B(z)}{(1+z)^2} \frac{d\ell}{dz} dz \\ &= 3 [\text{rad m}^{-2}] \cos \theta \left( \frac{n_{e0}}{10^{-6} \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_0}{1 \text{ nG}} \right) \\ &\quad \times \int \frac{(1+z)^2}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} dz\end{aligned}$$

$\cos \theta$  : dipole的なRM分布になる

## 宇宙論的Faraday rotation②

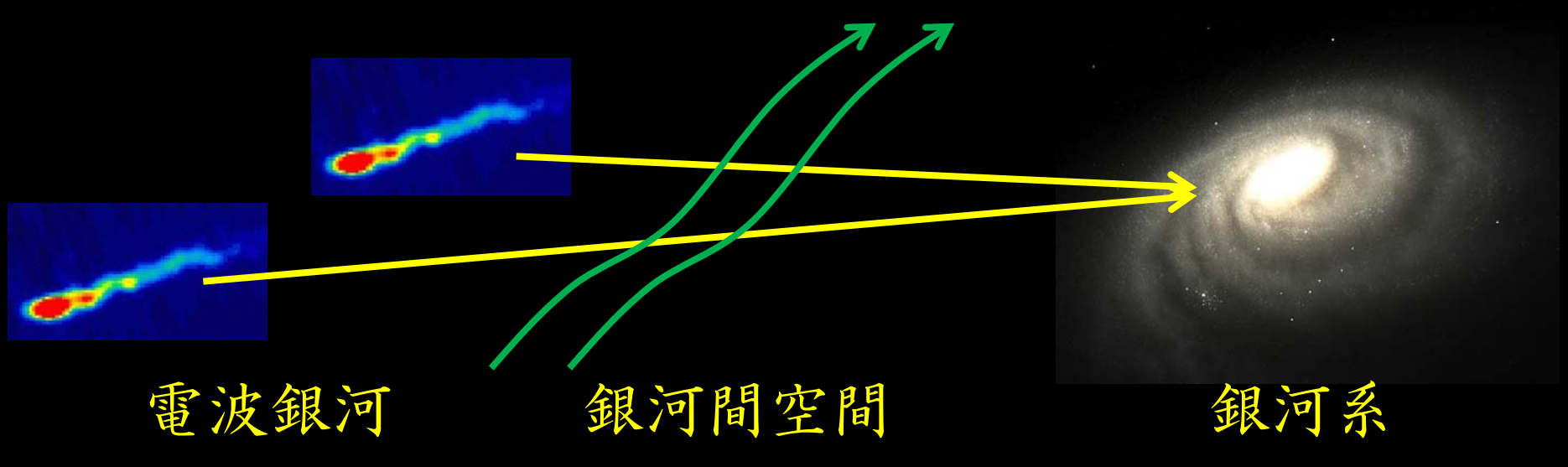
high  $z$ でのrotation measure

$$(\text{RM})_{\text{IGM}}(z) \propto \int \frac{(1+z)^2}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} dz \propto (1+z)^{3/2} \quad (z \gg 1)$$



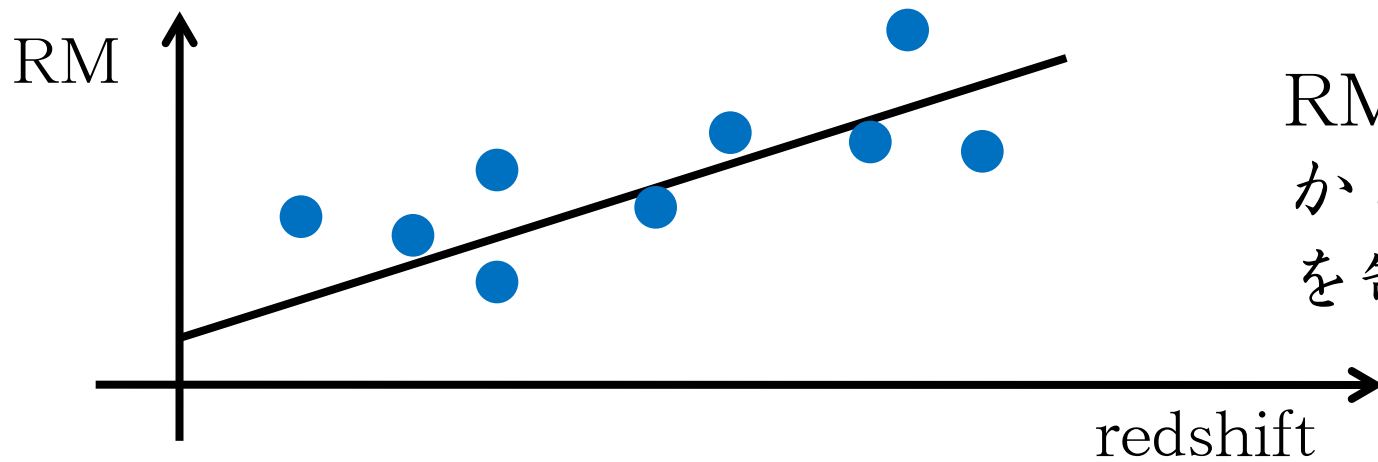
昔の方が磁場もガスも濃いので実はhigh  $z$ の方が効く。するともう少し弱い磁場まで探索できることがわかる。

# 宇宙論的Faraday rotation③



$$\text{RM} = \text{RM}_{\text{source}} + \text{RM}_{\text{IGM}} + \text{RM}_{\text{galaxy}}$$

(分散)  $\propto (1+z)^{3/2} \sim \text{const}$



RMのz依存性  
から銀河間磁場  
を制限する。

# 宇宙論的Faraday rotation④

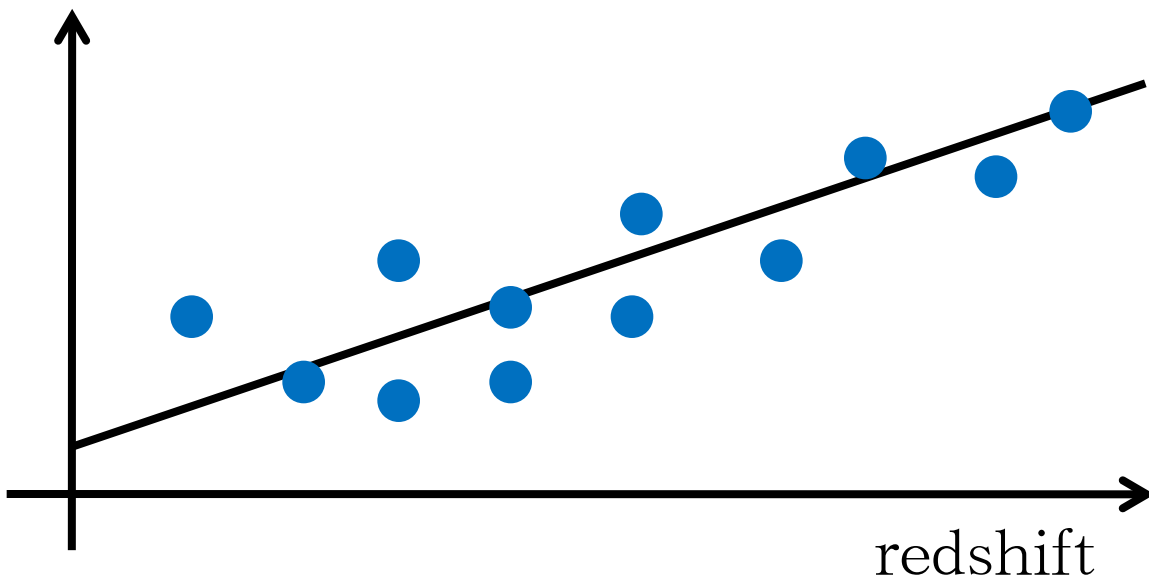
$$RM = RM_{\text{source}} + RM_{\text{IGM}} + RM_{\text{galaxy}}$$

$$\begin{matrix} \swarrow \\ \infty 1/(1+z)^2 & \propto (1+z)^{3/2} & \sim \text{const} \end{matrix}$$

波長のredshiftのため、high zではQSOのintrinsicなRMは重要でなくなる

→ high zで分散はどんどん小さくなるはず

RM

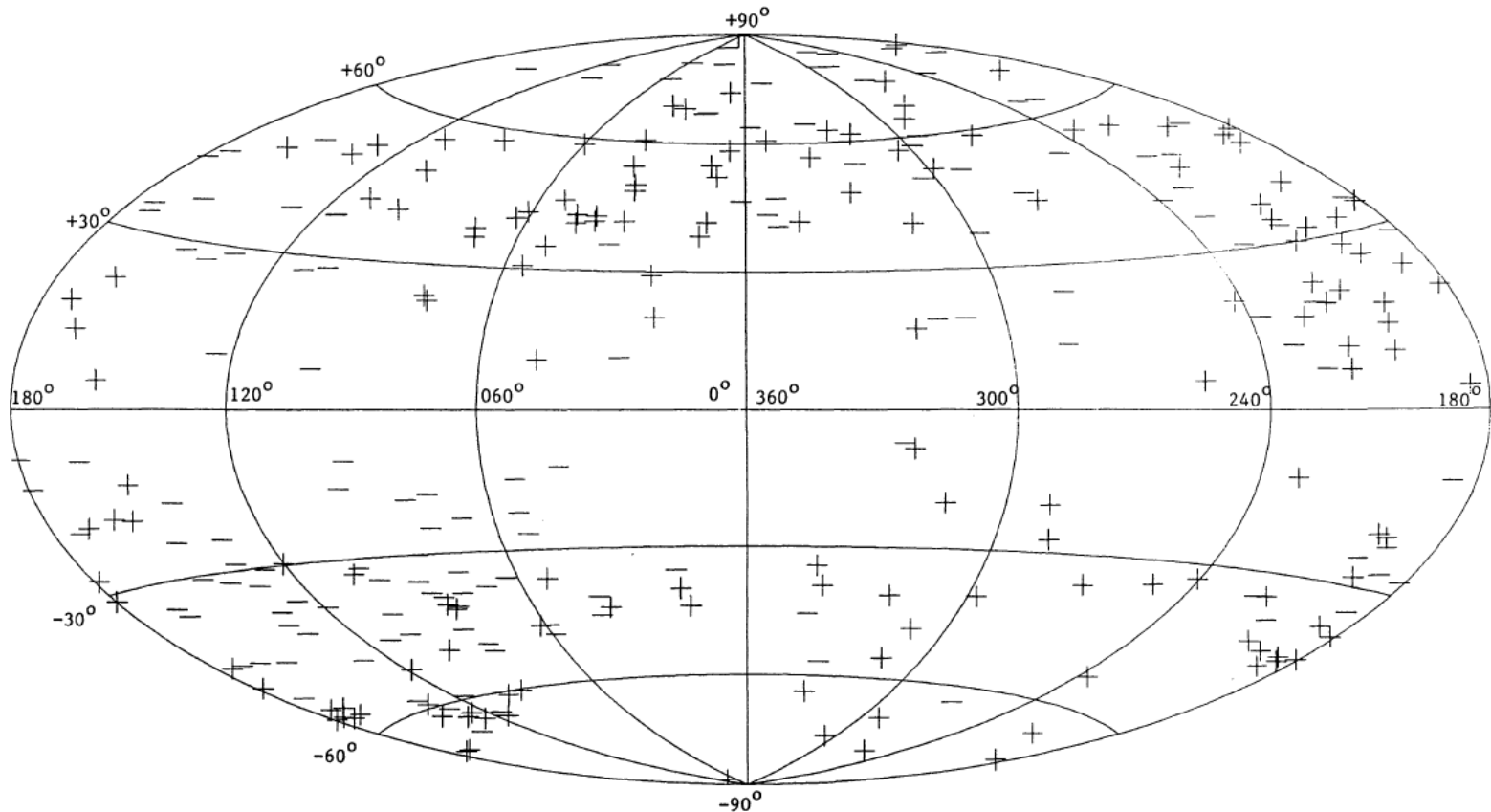


これが一様なIGM磁場から予想される形

# 宇宙論的磁場への制限①

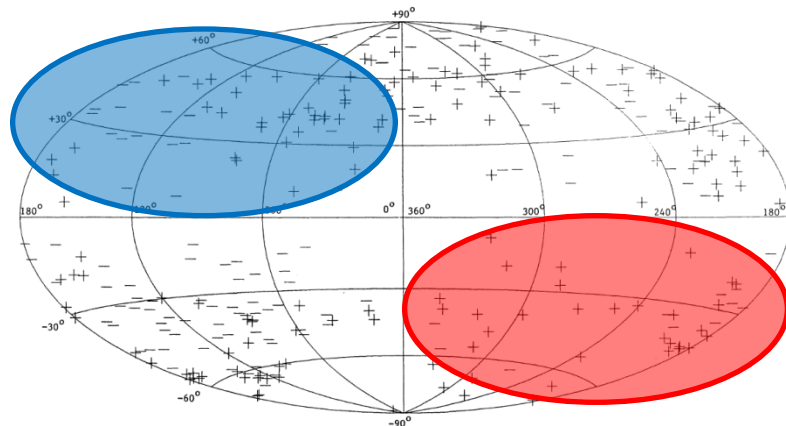
Vallee, 1990

redshiftが決まり、 $|RM| < 200 \text{ rad/m}^2$ の  
銀河とクエーサー309個（銀河系の寄与が小さい）

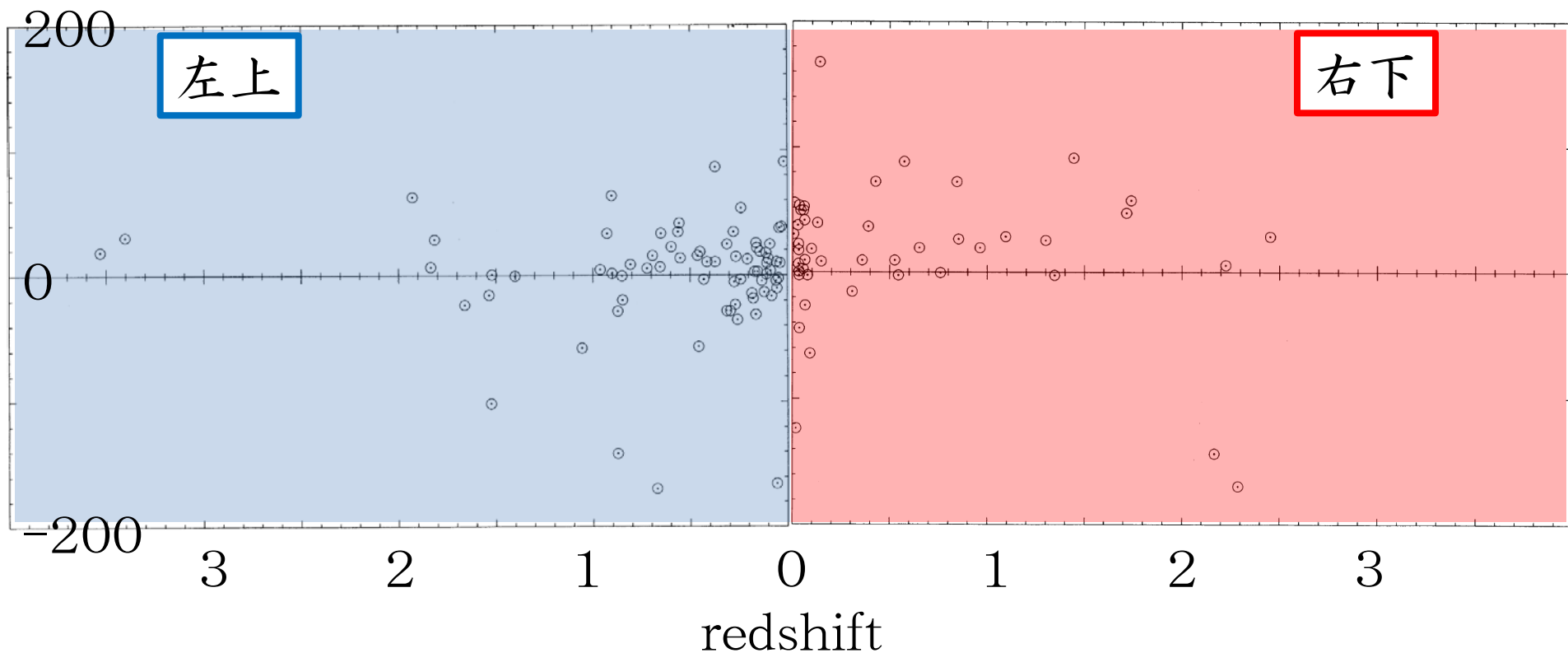


## 宇宙論的磁場への制限②

全天を4つの領域に分け  
対角領域の源で制限する。



RM(rad/m<sup>2</sup>)



一様な磁場への制限： $B < 6 \times 10^{-11} \text{ G}$

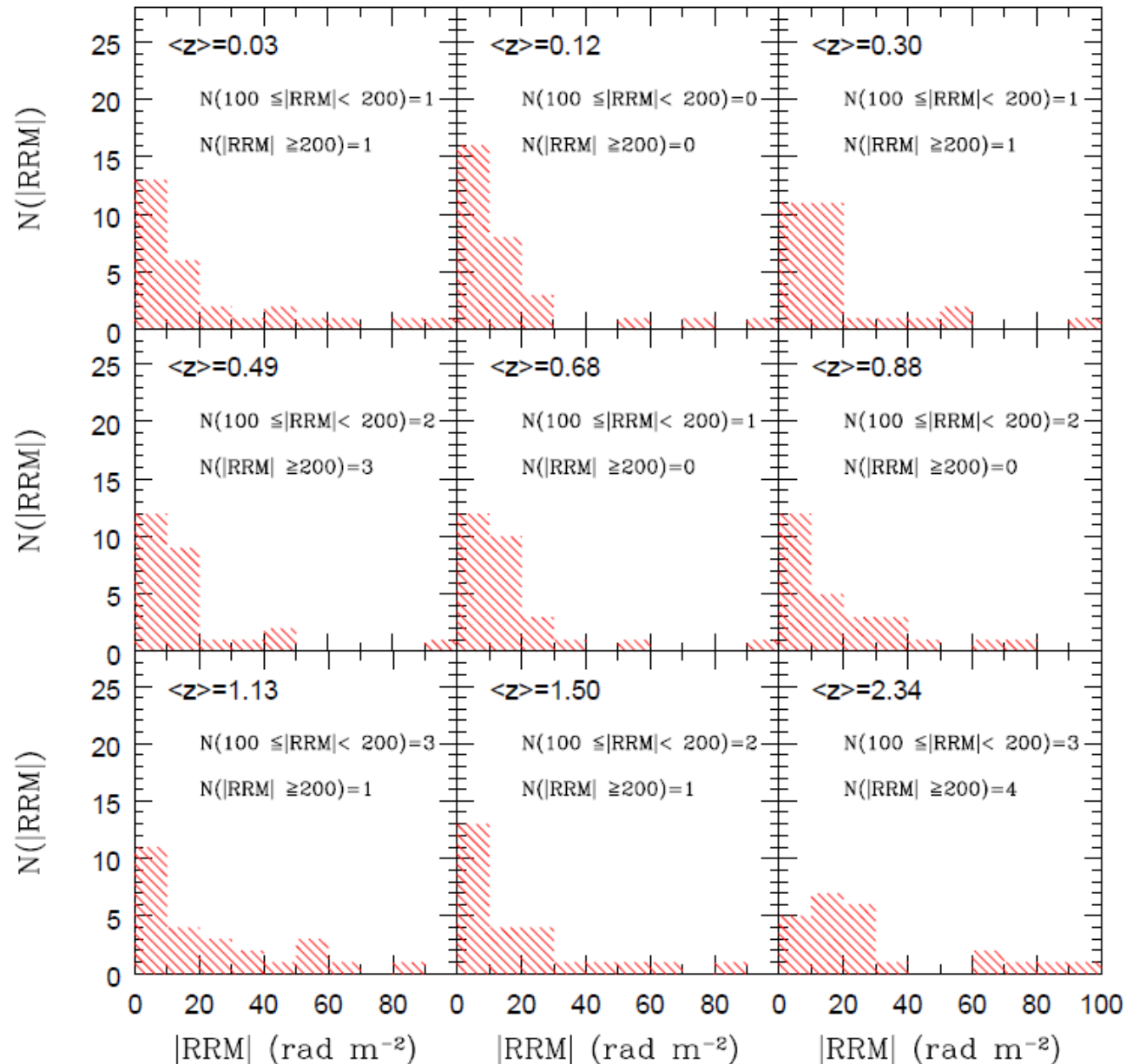


# 宇宙論的磁場への制限③

Kronberg et al., 2008

銀河系の寄与を差し引いたRMの分布を $z$ ごとに描く。

$z$ が大きくなると分散が大きくなるのが見て取れる。

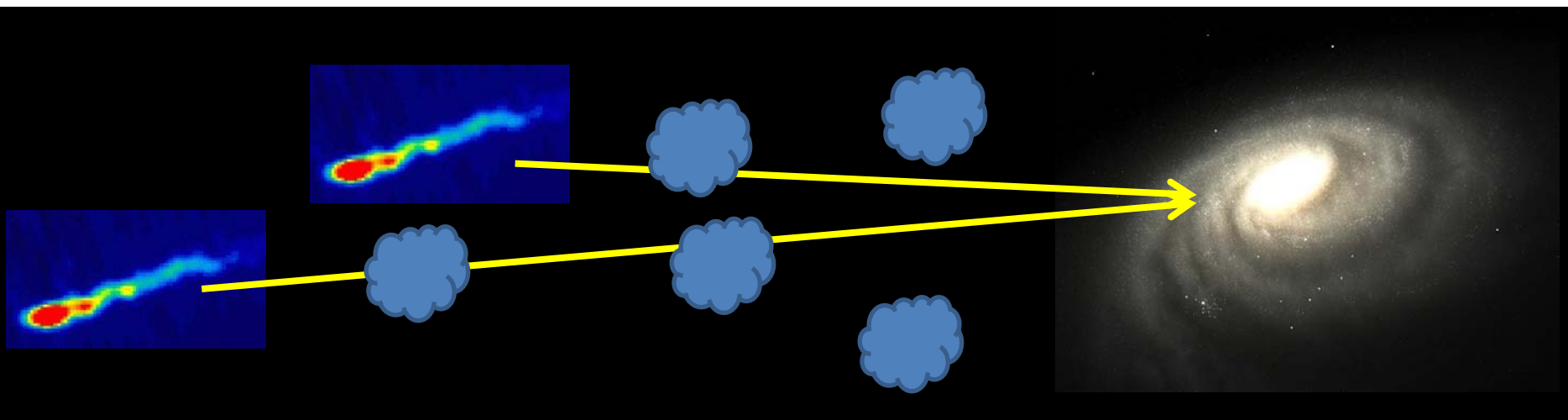


一様宇宙の  
一様磁場という  
描像が悪い？

## 宇宙論的磁場への制限④

high  $z$ での分散

- ・ intrinsic RMの進化
  - ・ 銀河系成分が引ききれてない
  - ・ 銀河間空間にcloudのようなものがある
    - 銀河、原始銀河雲 (Kronberg et al., 2008)
    - Ly  $\alpha$  雲 (Blasi et al., 1999)
- 定性的には説明可能。QSO吸収線と相関？



# RM evolutionのモデル化

Kronberg et al., 2008

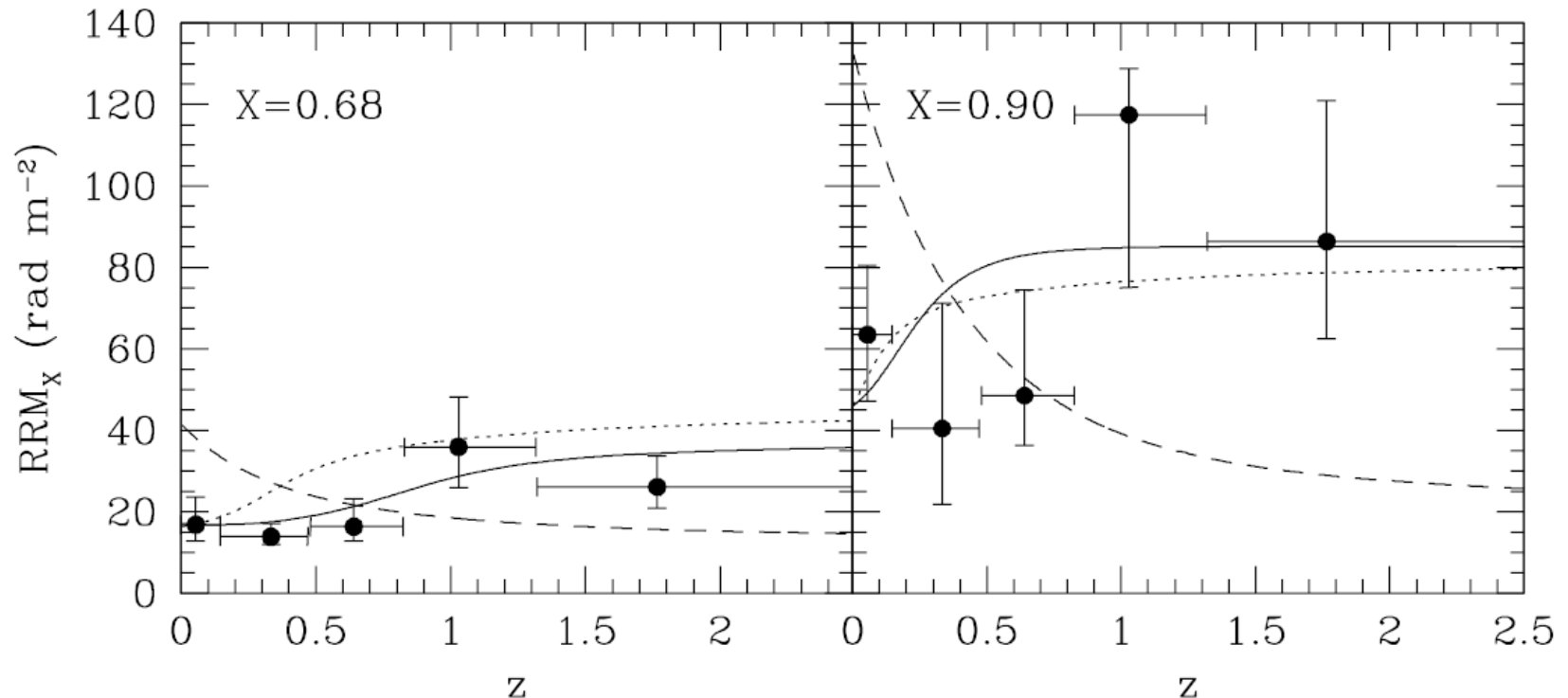
磁化したcloudをモデル化

$$RM = RM_{\text{source}} + RM_{\text{cloud}} + RM_{\text{galaxy}}$$

$$\propto 1/(1+z)^2 \quad \propto 1/(1+z)^2 \quad \sim \text{const}$$

cloudをMgII absorberとしてそのz分布からRMのz依存性を計算するとquantileの進化をよく説明。

high zに行くほどcloudをかする確率が高い。



# RMと吸収線の相関

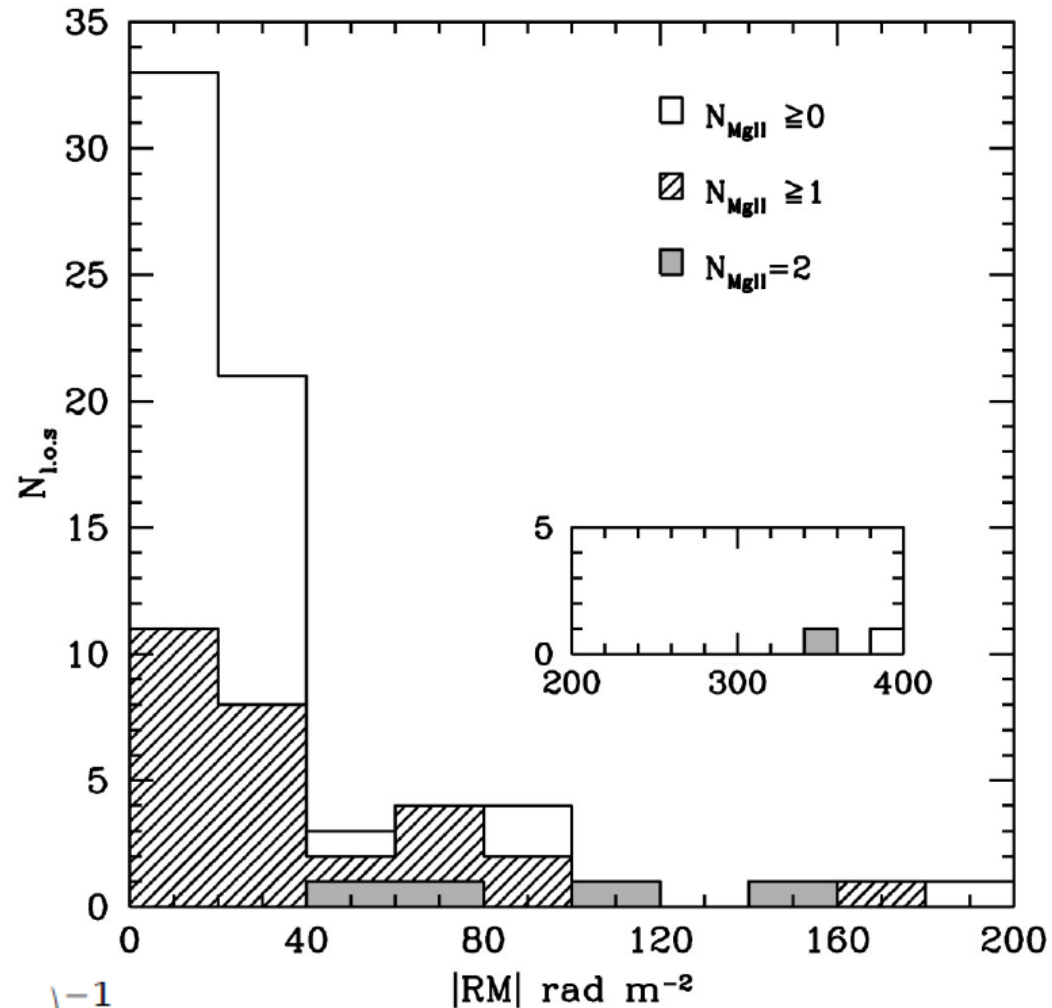
Bernet et al., 2009

RMとMgII吸収線との相関はどの程度あるか？

確かにMgII吸収のあるQSOが大きなRMを持つという傾向がある。

Bernetらはabsorberを銀河のhalo (~50kpc) と考えており、その磁場を見積もった。

$$B = 10 \left( \frac{\sigma_{MgII}}{140 \text{ rad/m}^2} \right) \left( \frac{N_e}{9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}} \right)^{-1} \mu\text{G}$$

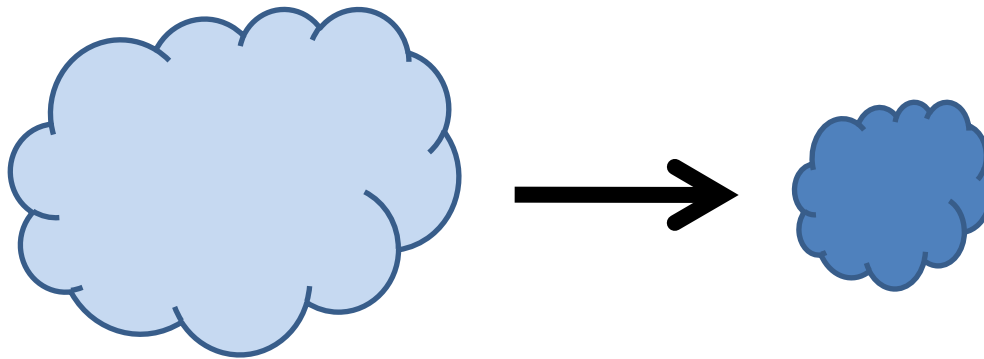


# 真の宇宙論的磁場観測に向けて

さらに一様磁場が足される。

でも本当に一様と考えていいのか？

→ primordial cloud (with Silk)



電子密度  $a^3$  倍、磁場  $a^2$  倍、経路  $1/a$  倍

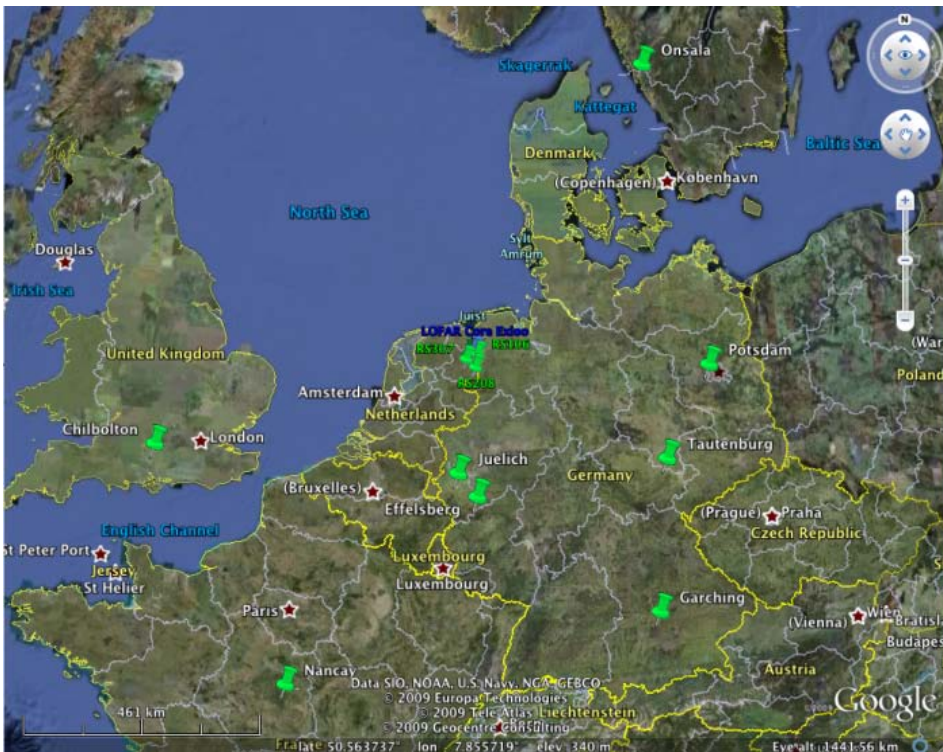
→ RMは  $a^4$  倍

→ 銀河や銀河団など、virializeしたものでなくても、  
宇宙を一様と近似するのはあまりよくないかも

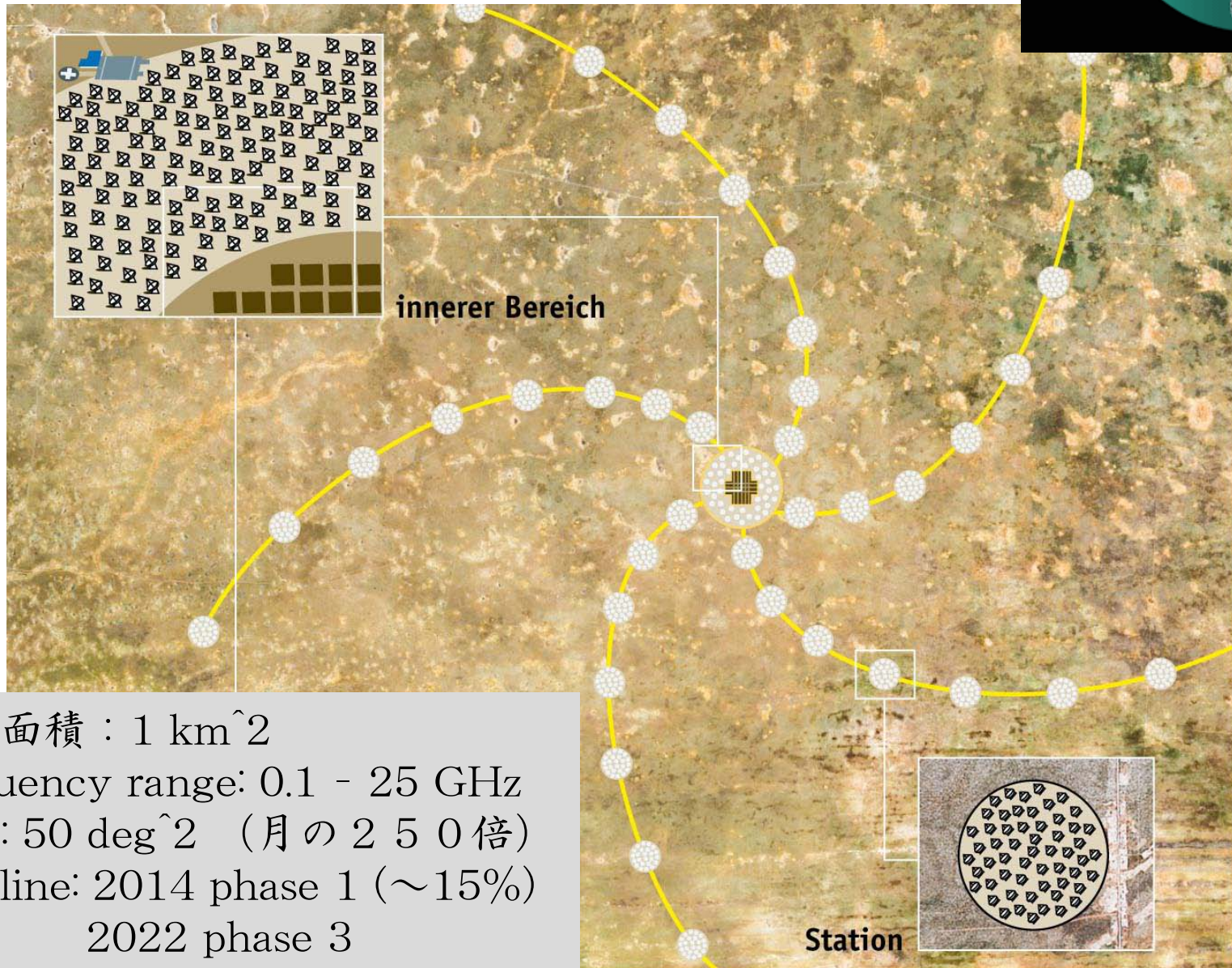
いずれにせよデータが少なくて確かなことは言えない

# LOFAR (LOW Frequency ARray)

- オランダ+ヨーロッパ各国
- 建設中
- 受光面積：1 km<sup>2</sup>
- frequency range: 30 - 240 MHz



# SKA (Square Kilometer Array)



- 受光面積 :  $1 \text{ km}^2$
- frequency range: 0.1 - 25 GHz
- f.o.v.:  $50 \text{ deg}^2$  (月の250倍)
- timeline: 2014 phase 1 (~15%)  
2022 phase 3

← 150 Kilometer →

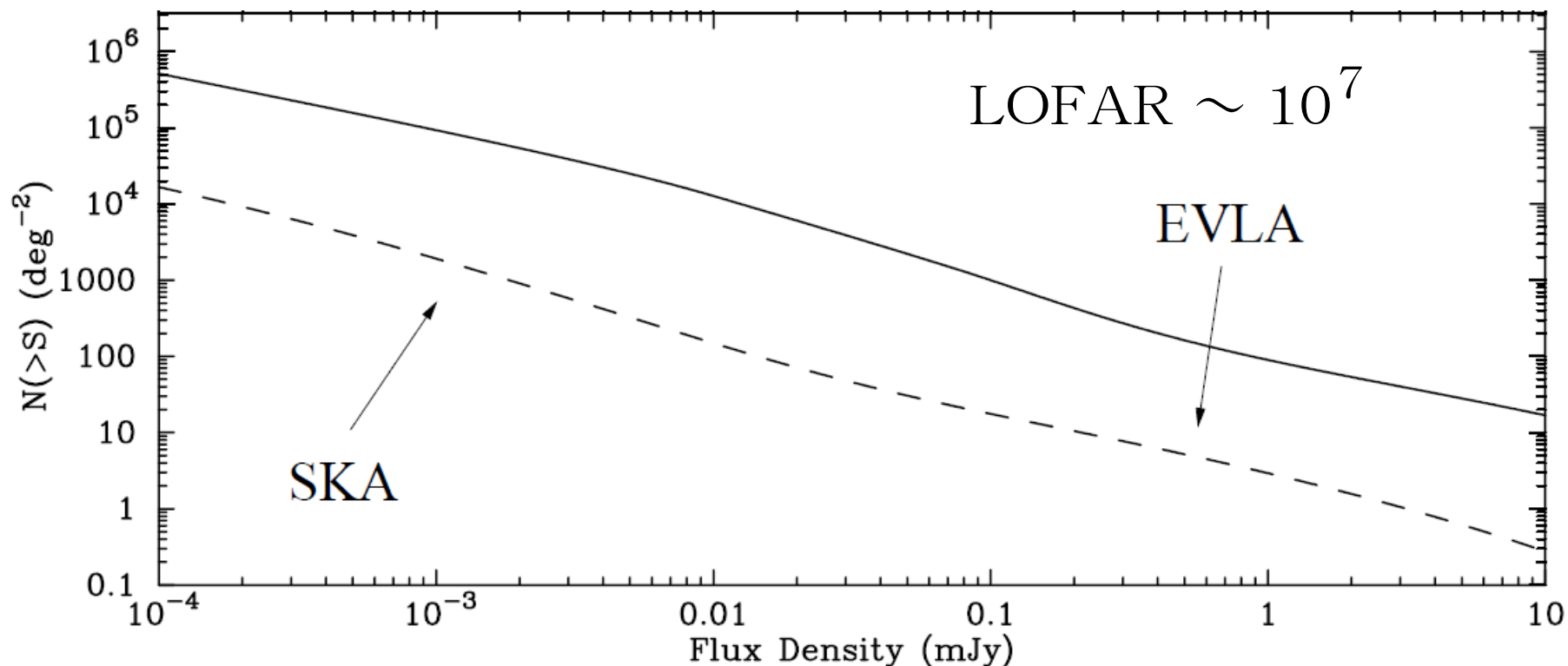
# Faraday rotation searchの将来

Vallee (1990) : 674個 → 309個

Kronberg et al. (2008) : 901個 → 268個

Bernet et al. (2009) : 72個 (高銀緯・optical spectrum)

EVLA (Extended VLA)、LOFARやSKAで数は  
とんでもなく増えるはず。





# まとめ

## 宇宙論的磁場の生成と観測

### 磁場生成

- ・ 初期宇宙、ゆらぎ、再イオン化
- ・ voidまたはhigh  $z$ 宇宙に痕跡が残っているかも

### 磁場観測

- ・ 遠方QSOのFaraday rotation
- ・ pair echo (GRB, blazar, high  $z$ )