

# 宇宙磁場の起源

高橋慶太郎

A t 研

2010年2月17日

GCOE研究発表会

# 目次

- 1、イントロダクション
- 2、密度ゆらぎによる磁場生成
- 3、高エネルギー天体による  
微弱宇宙磁場の観測

## 概要

- ・ 宇宙には様々なスケールの天体に磁場が存在
- ・ どうやって観測するのか？
- ・ 起源は？
- ・ 宇宙の歴史を磁場を通して探りたい

# 磁場の観測方法

## 1、Zeeman効果

磁場によって縮退していたエネルギー準位が分裂する現象

## 2、ファラデー回転

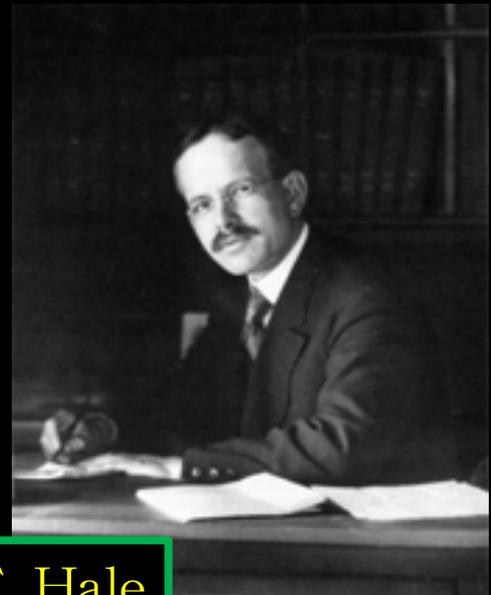
磁気を帯びたプラズマ中で偏光面が回転する現象

## 3、シンクロトロン

磁場中の荷電粒子が出す放射

# Zeeman効果

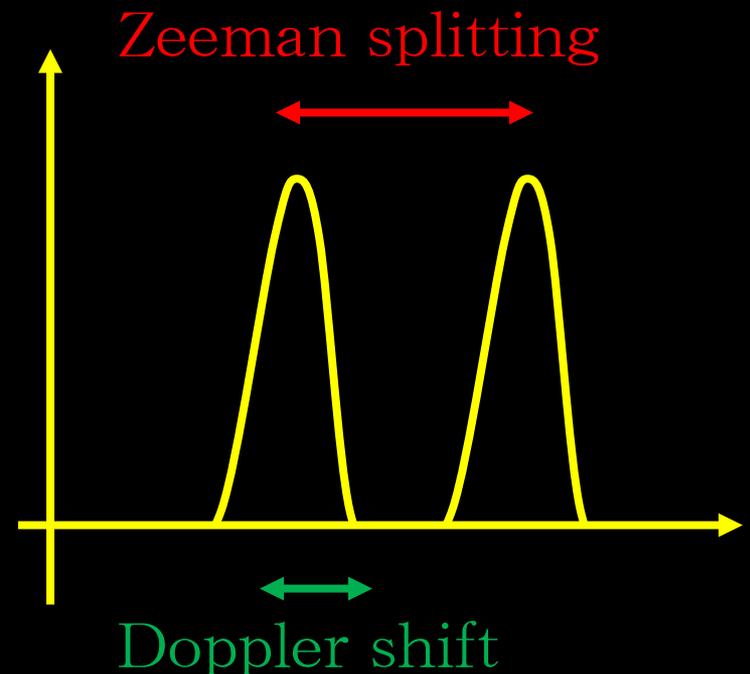
- ・ 磁場によるエネルギー準位の分裂を利用
- ・ 信頼性は高いが、強磁場・低温の環境でないと難しい
- ・ Hale (1908)により初めて地球外で磁場を発見 (太陽黒点)
- ・ 磁場の強い分子雲でも観測
- ・ それ以外はなかなか難しい



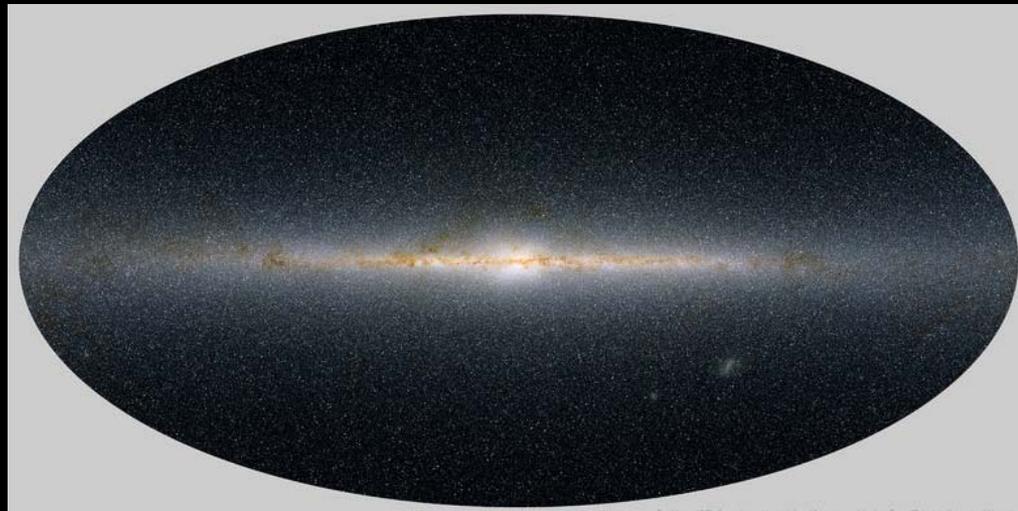
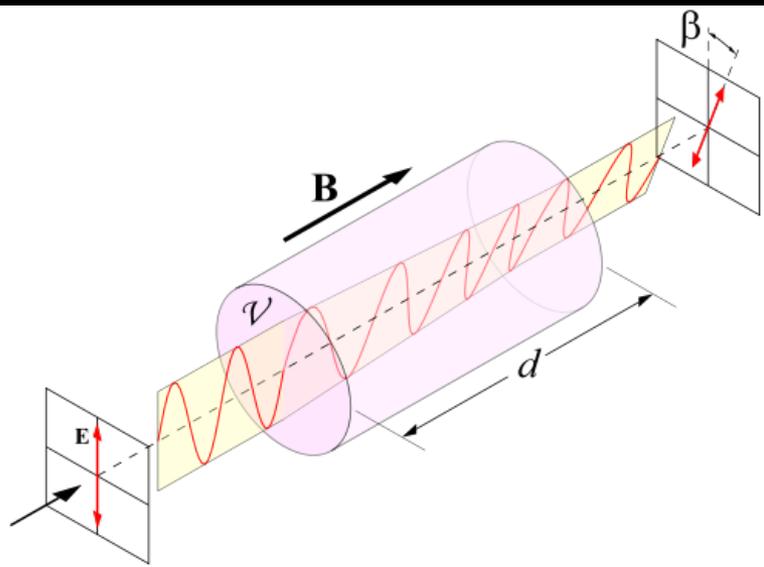
G. E. Hale

$$\frac{\Delta\nu_{\text{Zeeman}}}{\nu} = 10^{-9} g \left( \frac{B}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{\lambda}{21\text{cm}} \right)$$

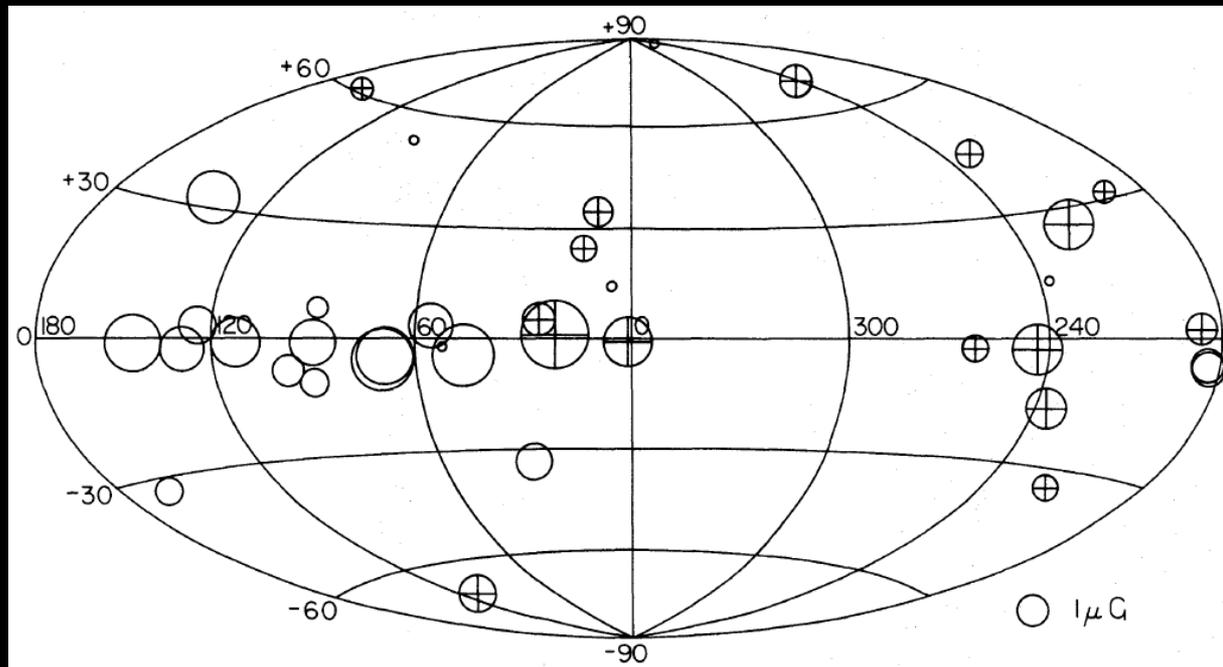
$$\frac{\Delta\nu_{\text{Doppler}}}{\nu} = 6 \times 10^{-7} \left( \frac{T}{100\text{K}} \right)^{1/2}$$



# ファラデー回転

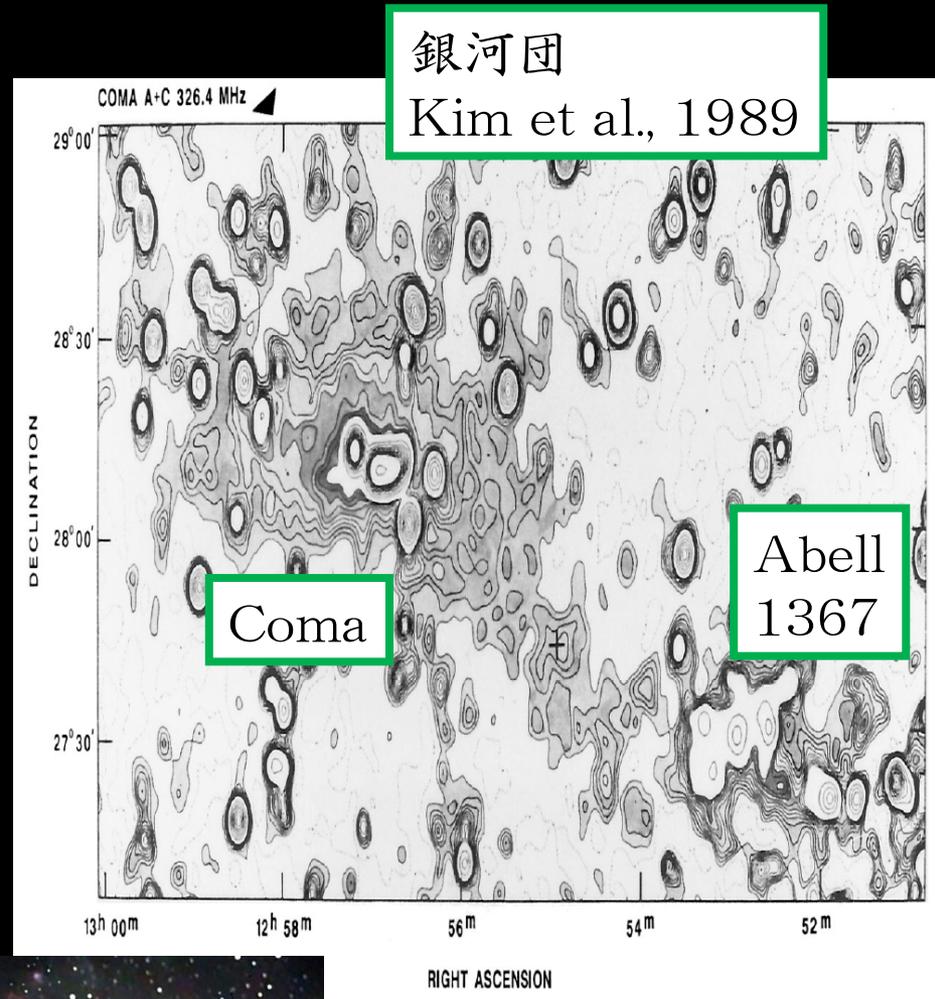
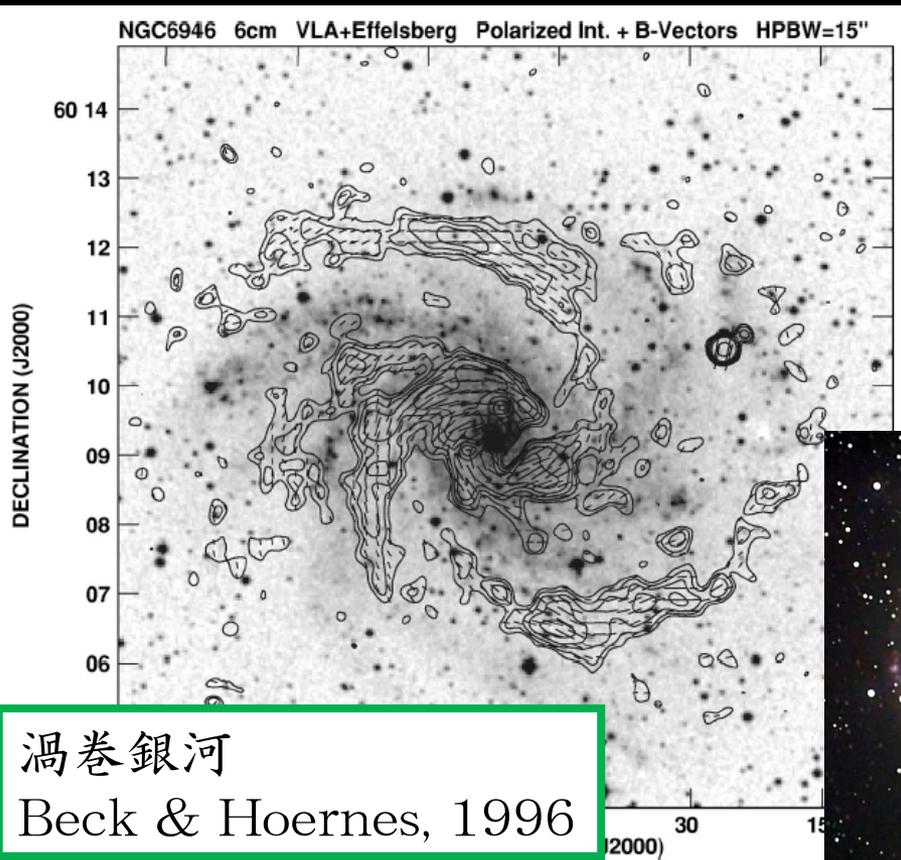


銀河系内の  
パルサーの放射から  
銀河系の磁場を探る  
(Manchester 1974)



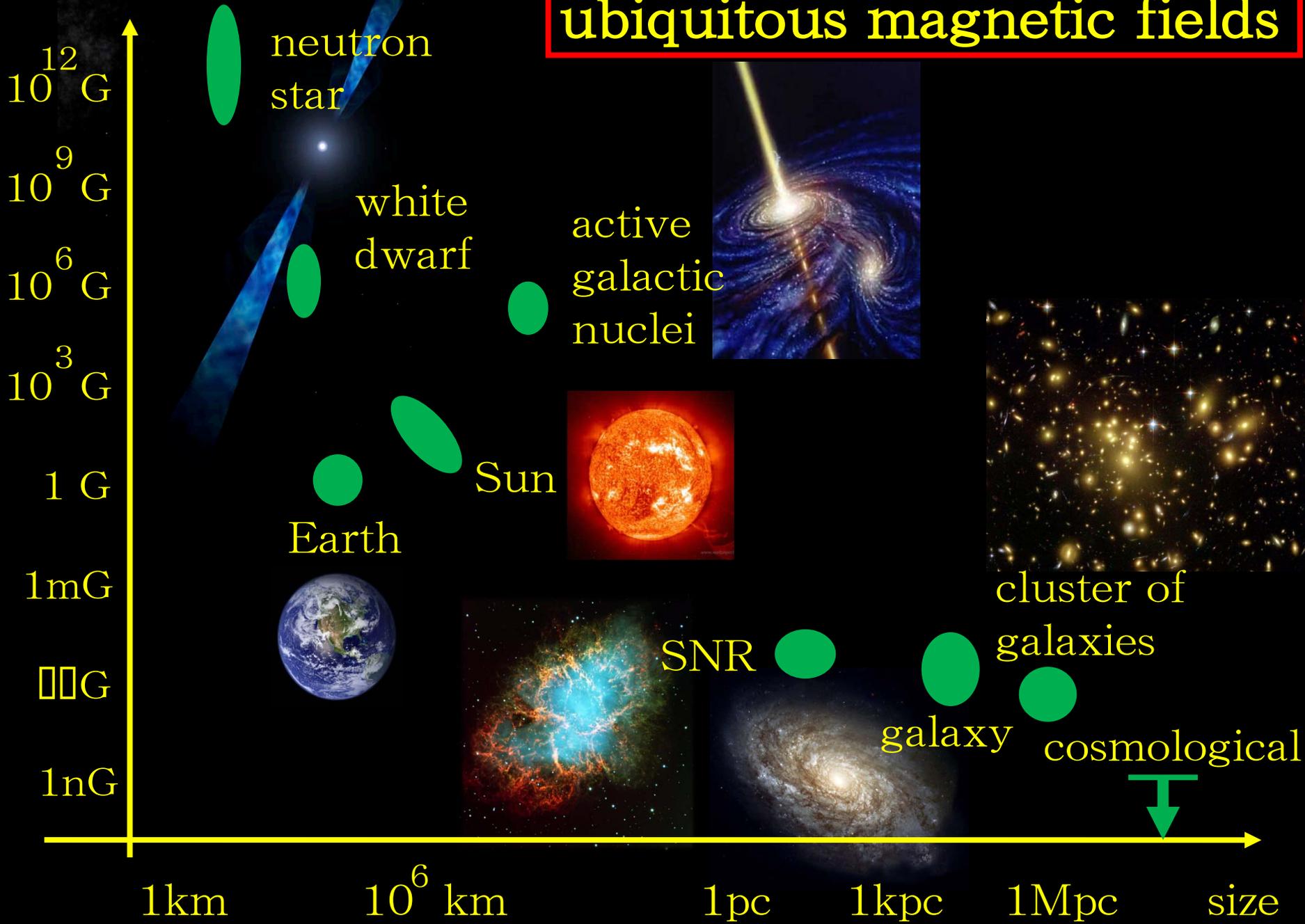
# シンクロトロン

- ・磁場中の電子が出す放射
- ・電子密度と縮退  
 $j \propto n_e B$
- ・様々な天体で観測



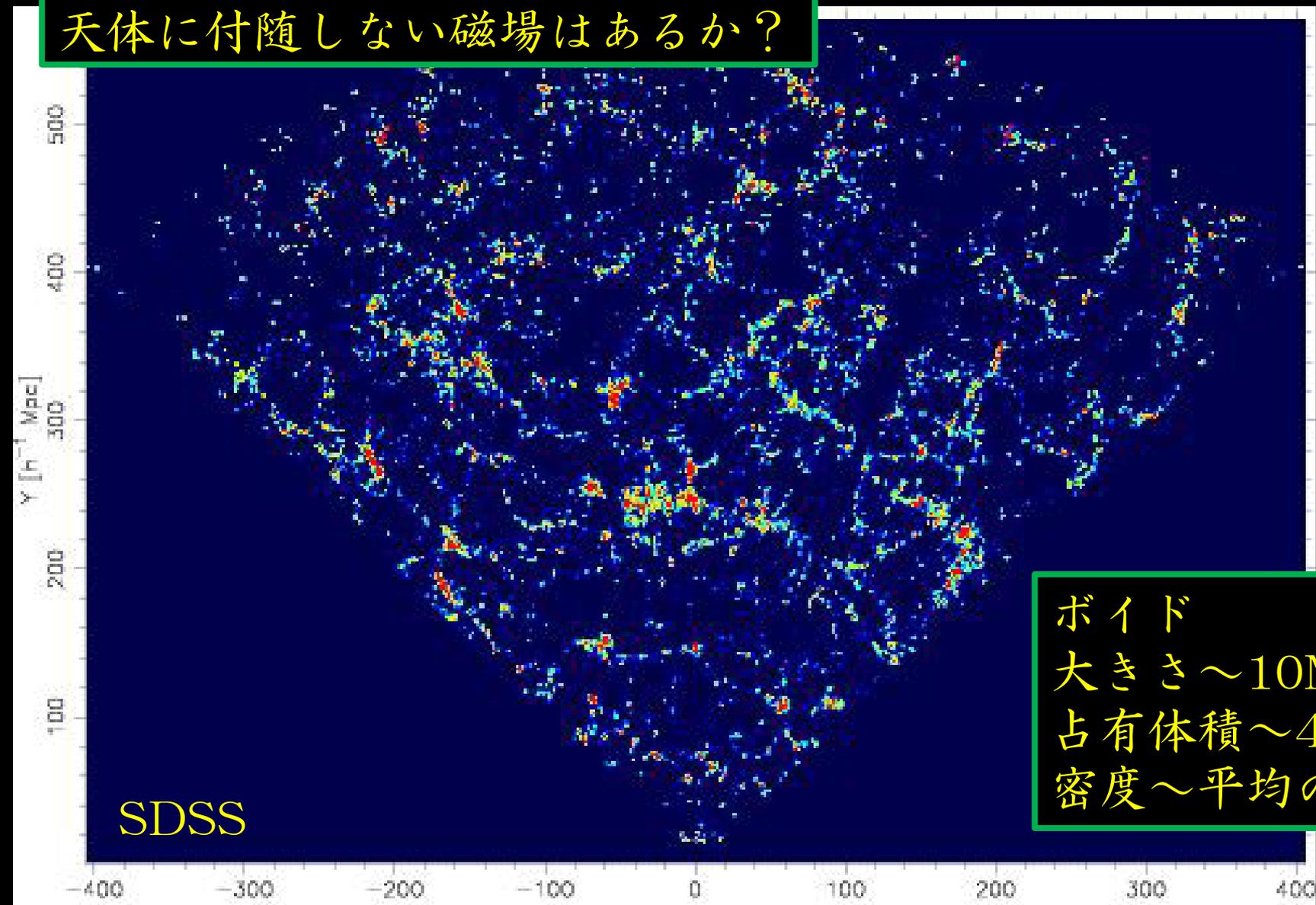
~ 1  $\mu$ G  
→ ガスの運動  
エネルギーと  
同じくらい

# ubiquitous magnetic fields



# 宇宙論的磁場

天体に付随しない磁場はあるか？



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

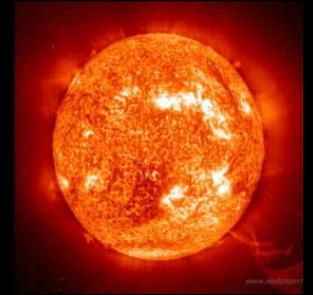
# 磁場の役割

天体の活動性：太陽、パルサー、超新星残骸  
活動銀河核、ガンマ線バースト

ダイナミクス：星形成、超新星爆発

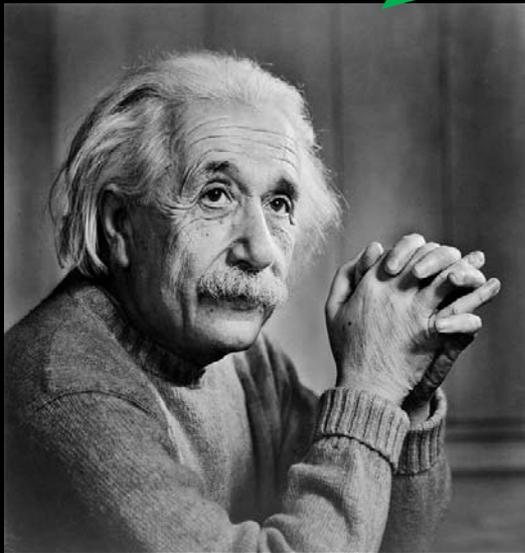
宇宙線の伝播：銀河系内への閉じ込め  
超高エネルギー宇宙線

\* プラズマには磁場に関連する不安定性が  
たくさんあり（磁気回転不安定性など）、  
どうも最初に多少磁場があれば  
どんどん増幅されてダイナミクスに  
寄与するようになるようだ。



# 磁場の起源

地球磁場の起源は  
現代物理学の最大の謎の  
1つである。



地球磁場

→ 様々な天体の磁場  
宇宙全体の磁場？



銀河磁場  $\sim 1 \mu\text{G}$



銀河ダイナモ  
(50 ~ 100 億年)



微弱だがマクロな種磁場  
( $10^{-20} \sim 10^{-25}$  Gauss)

宇宙初期 ( $z > 10$ )  
における磁場生成

# 宇宙の歴史

インフレーション

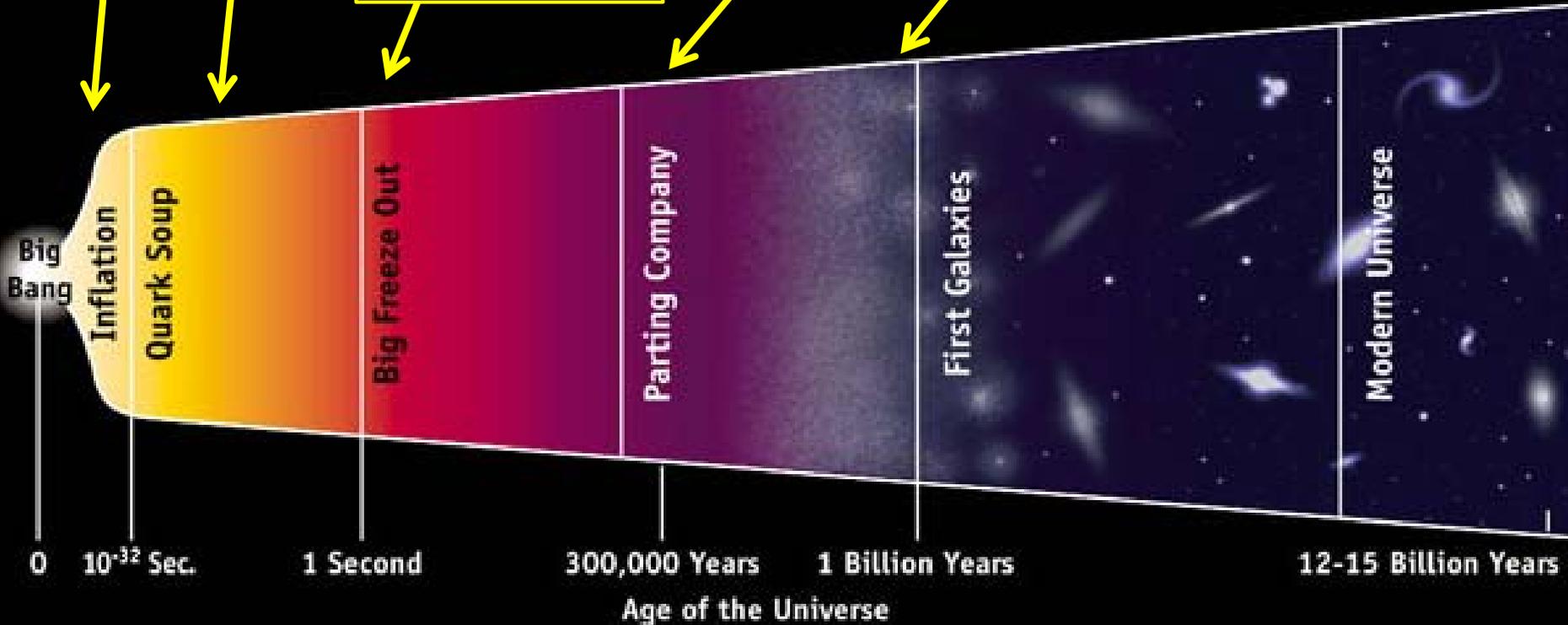
相転移

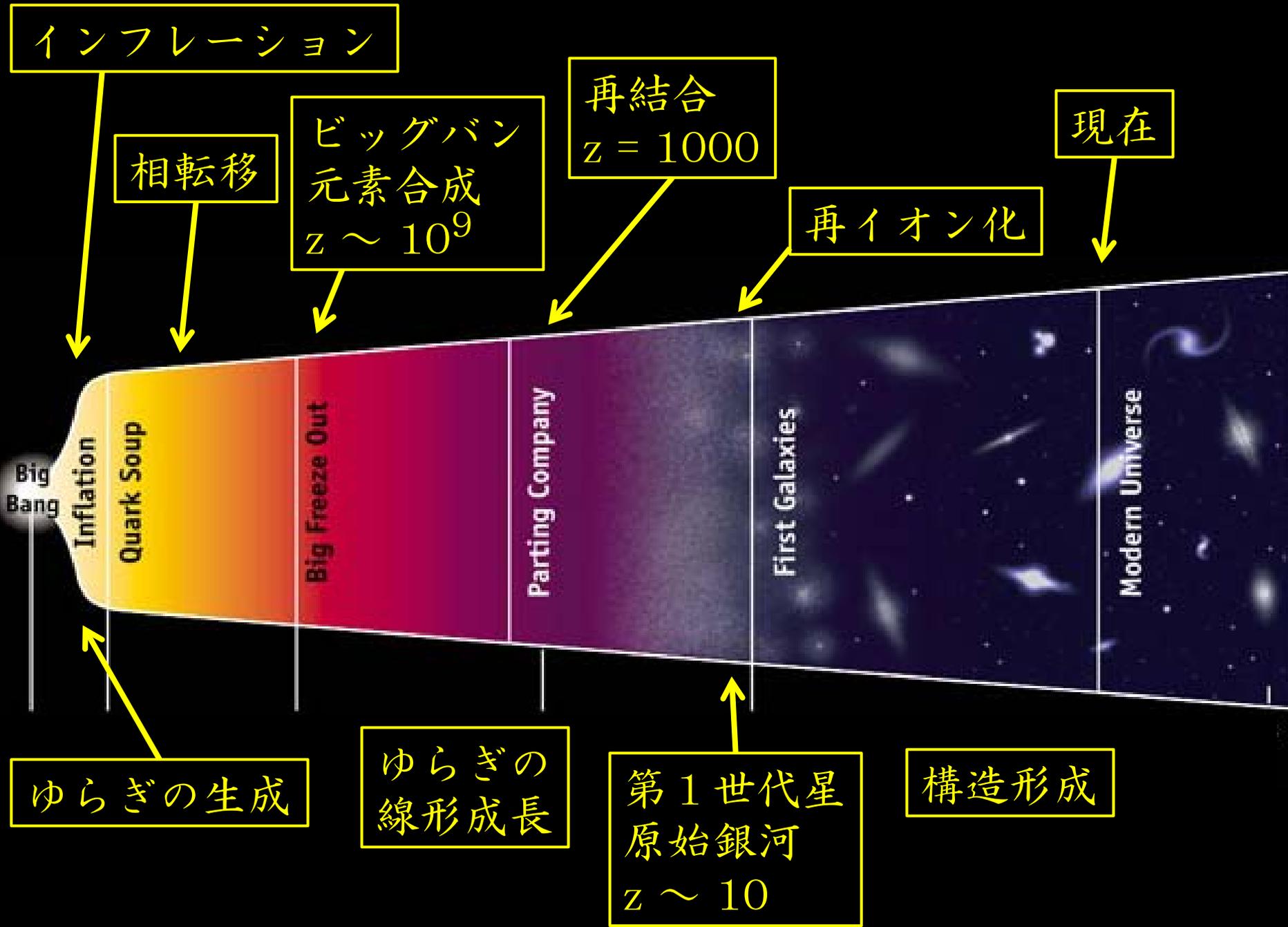
ビッグバン  
元素合成  
 $z \sim 10^9$

再結合  
 $z = 1000$

再イオン化

現在





インフレーション

相転移

ビッグバン  
元素合成  
 $z \sim 10^9$

再結合  
 $z = 1000$

現在

再イオン化

Big Bang

Inflation

Quark Soup

Big Freeze Out

Parting Company

First Galaxies

Modern Universe

ゆらぎの生成

ゆらぎの  
線形成長

第1世代星  
原始銀河  
 $z \sim 10$

構造形成

# 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

衝撃波などで密度と  
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

ダイナモ

# 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

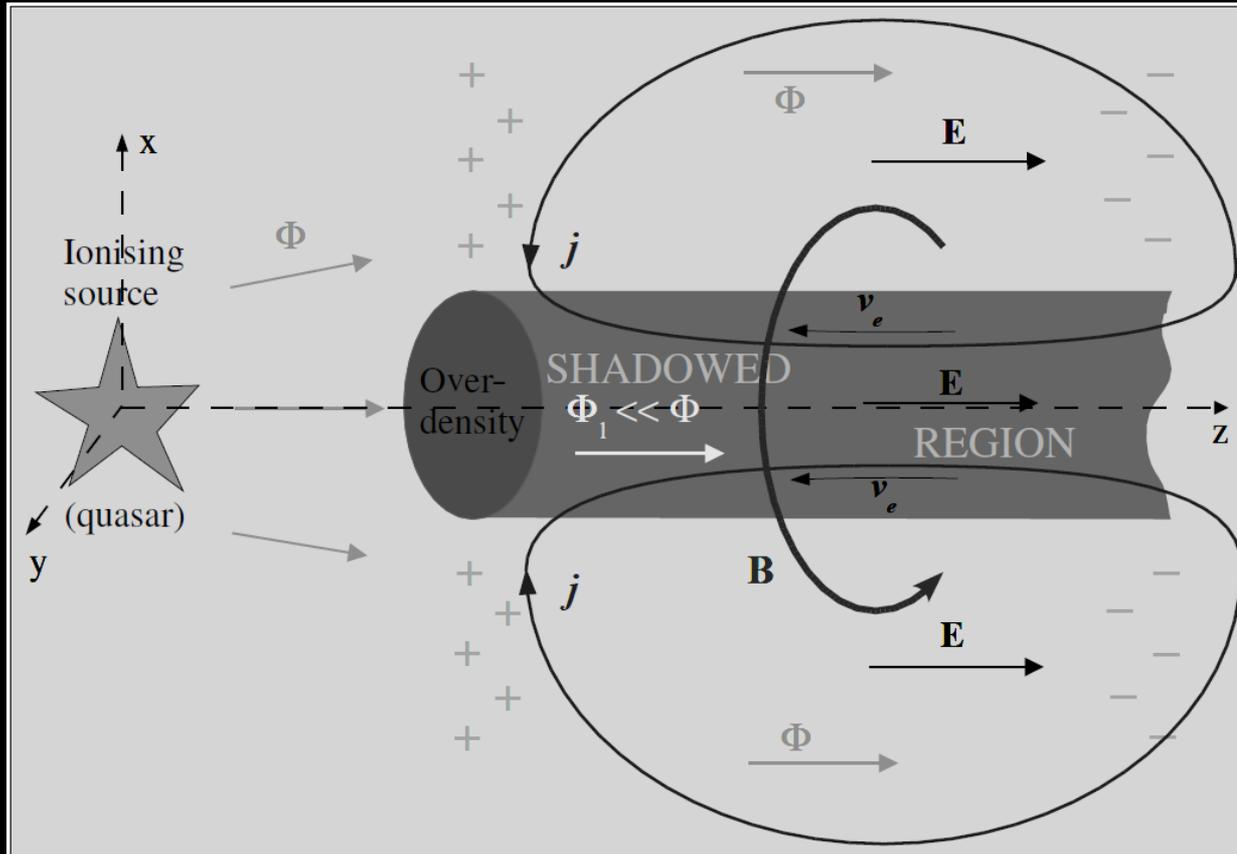
$$\Omega_B(k) \approx \left( \frac{T_r}{M_{\text{Pl}}} \right)^4 (-k\eta_r)^{4-\alpha} \frac{1}{I(\eta_r)}$$

しかし最近反作用や強結合の問題が指摘されて磁場はほとんどできないということになった。

# 再イオン化による磁場生成

Langer et al., 03, 05

- 初期宇宙 物質は全てイオン化している
- $z = 1000$  原子核と電子が結合して宇宙は中性化
- $z \sim 10$  何らかの天体からの紫外線で再びイオン化  
このとき磁場が生成されるかもしれない



再イオン化自体が  
まだあまり理解  
されていないので  
磁場の評価にも  
不定性があるが  
 $10^{-18}$  Gauss  
くらい?  
(我々も取組中)

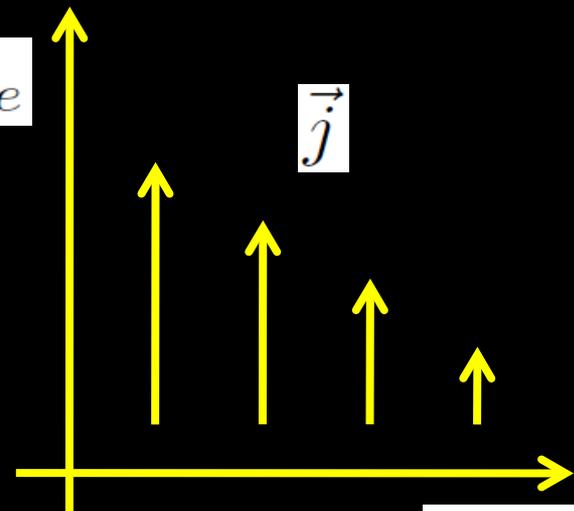
# 構造形成による磁場生成

Kulsrud et al. (1996)

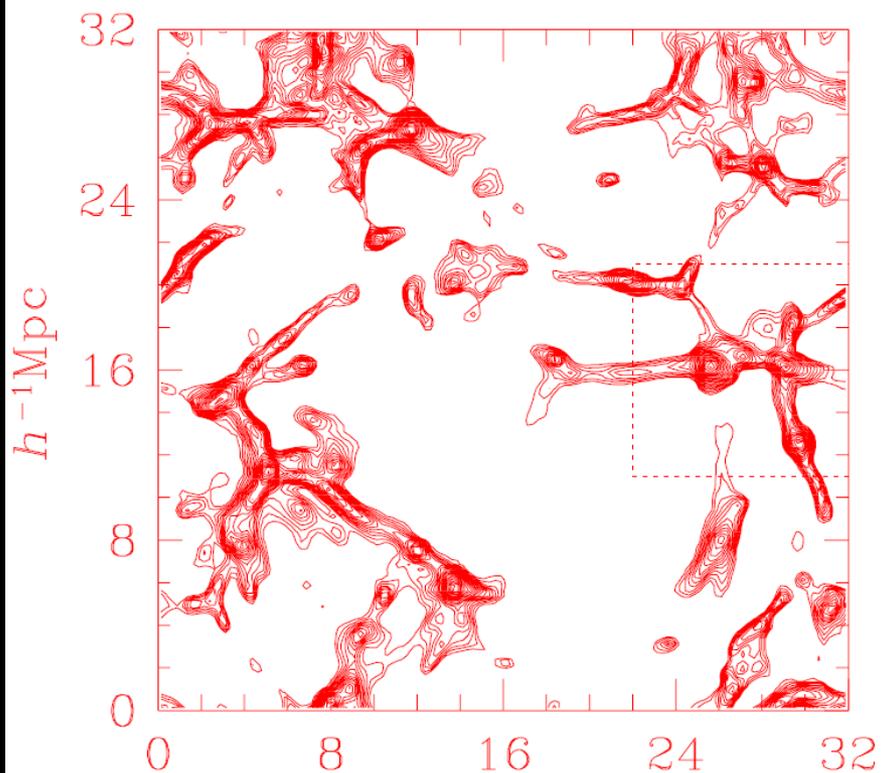
- ・ 宇宙論的流体シミュレーション
- ・ 構造形成に伴う衝撃波における Biermann効果で磁場生成

$$\nabla p_e$$

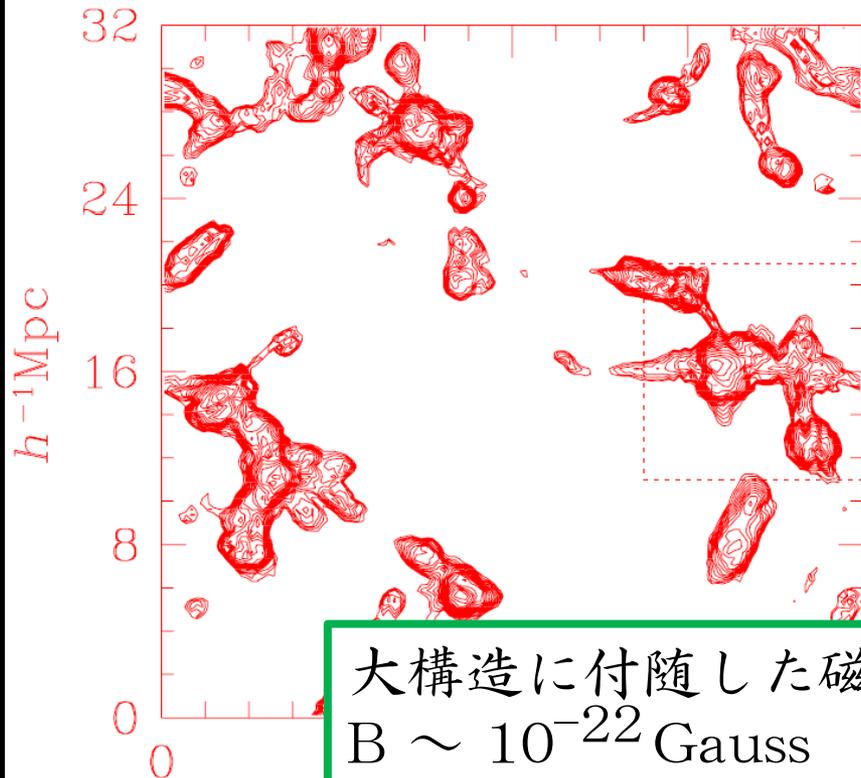
$$\vec{j}$$



$\rho$  at  $z=2$



$B$  at  $z=2$



大構造に付随した磁場  
 $B \sim 10^{-22}$  Gauss

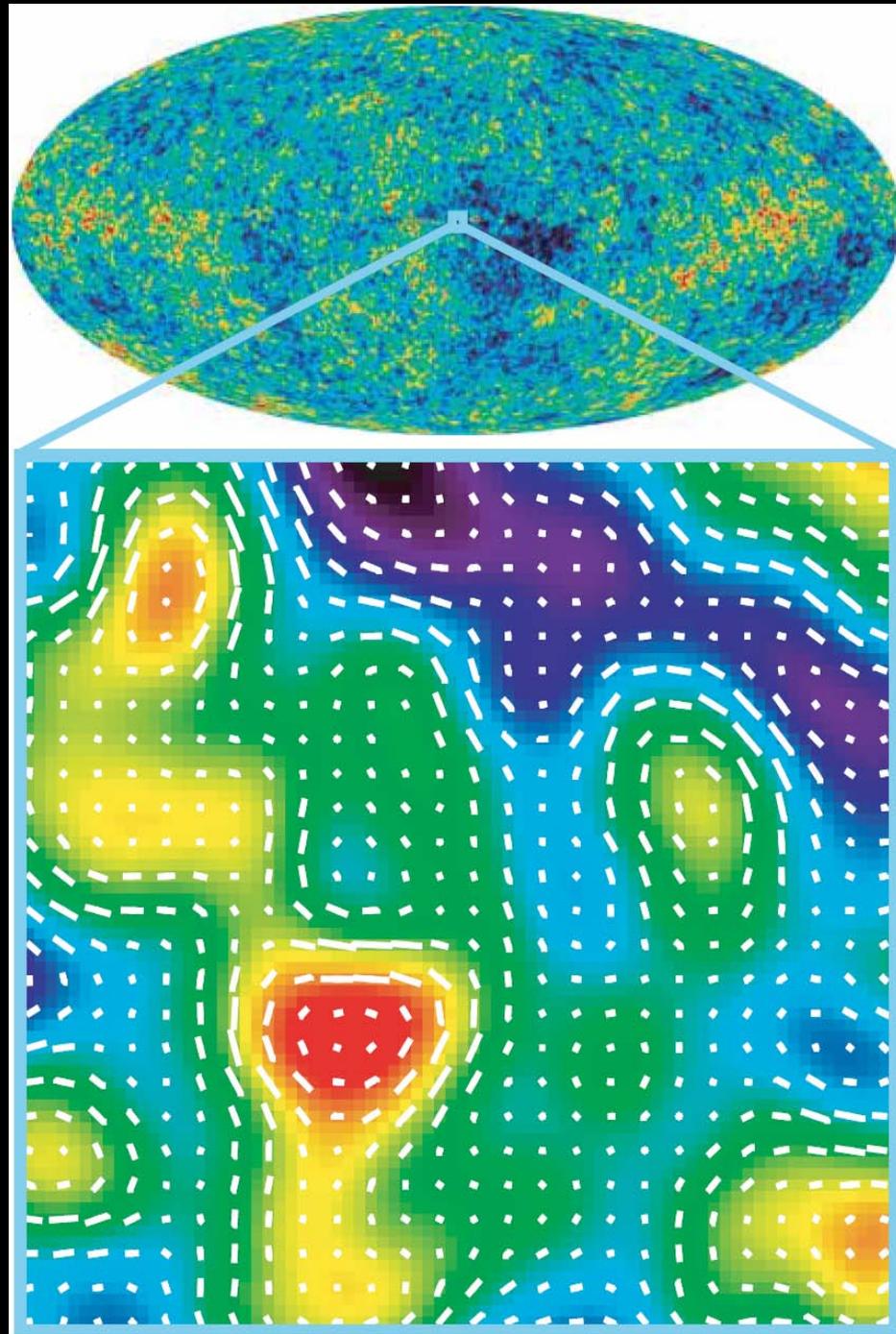
$$\nabla n_e$$

# 密度ゆらぎによる 磁場生成

KT, Ichiki, Sugiyama, 2005~

宇宙初期のプラズマの  
ゆらぎから磁場が生成

- ・ 宇宙論的摂動論
- ・ 不定性がとても小さい
- ・ CMBと相関 (右図)
- ・  $\sim 10^{-20}$  Gauss
- ・ ただしまだ未完成



# 宇宙磁場の生成まとめ

初期宇宙の様々なプロセスで磁場が生成

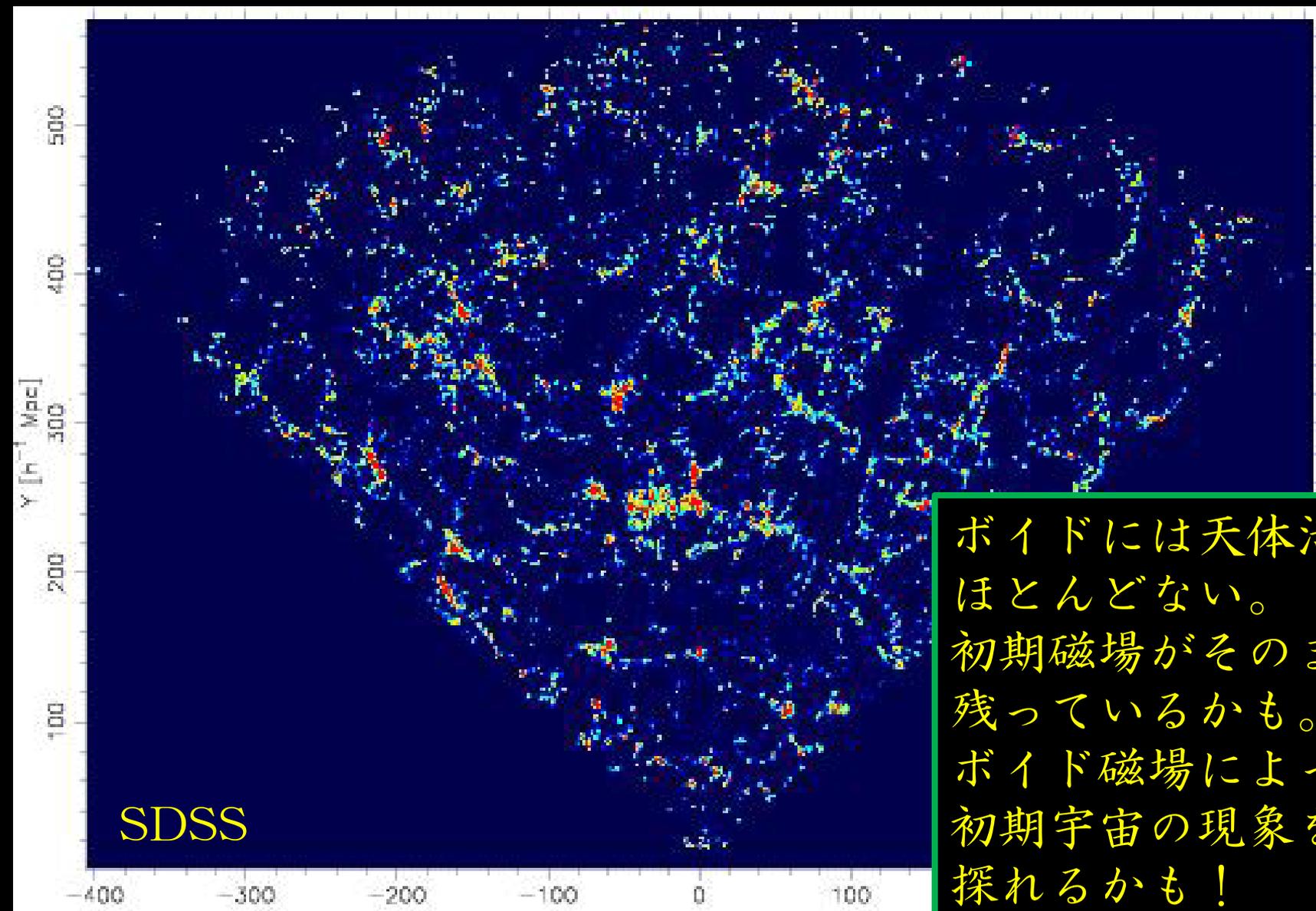
インフレーション、相転移、密度ゆらぎ、  
再イオン化、構造形成

このようにして生成された磁場が銀河形成のときに  
取り込まれ、ダイナモで増幅されるだろう。

## 問題点

- ・本当に起こるのか
- ・磁場の見積もりはどれだけ確かか
- ・どうやって検証するのか
- ・銀河に取り込まれなかった磁場は？

# ボイド磁場

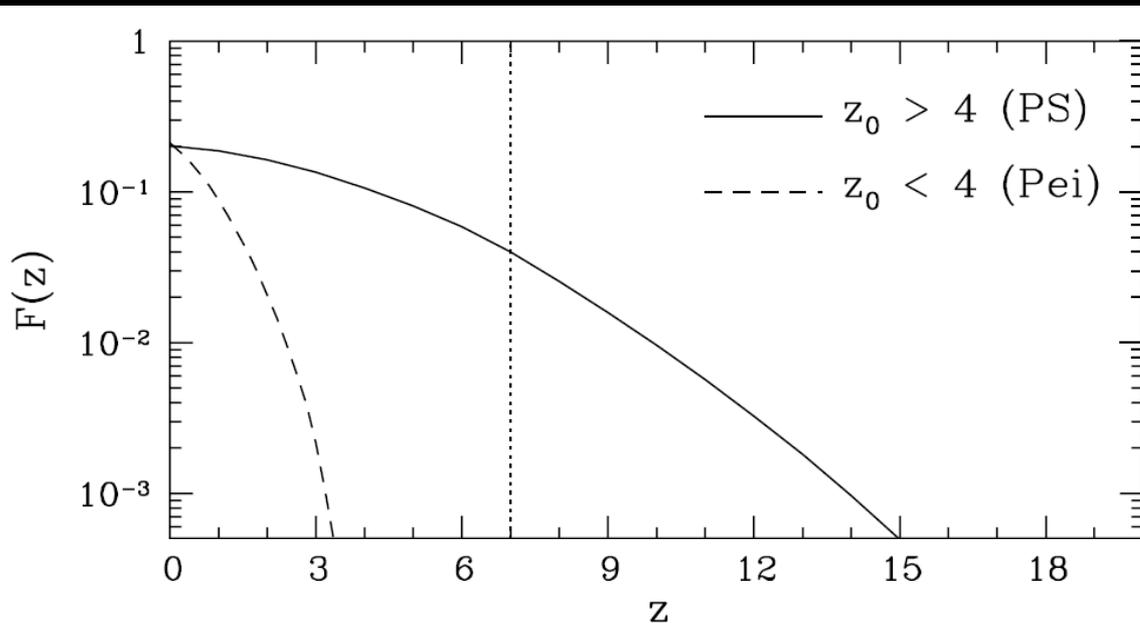
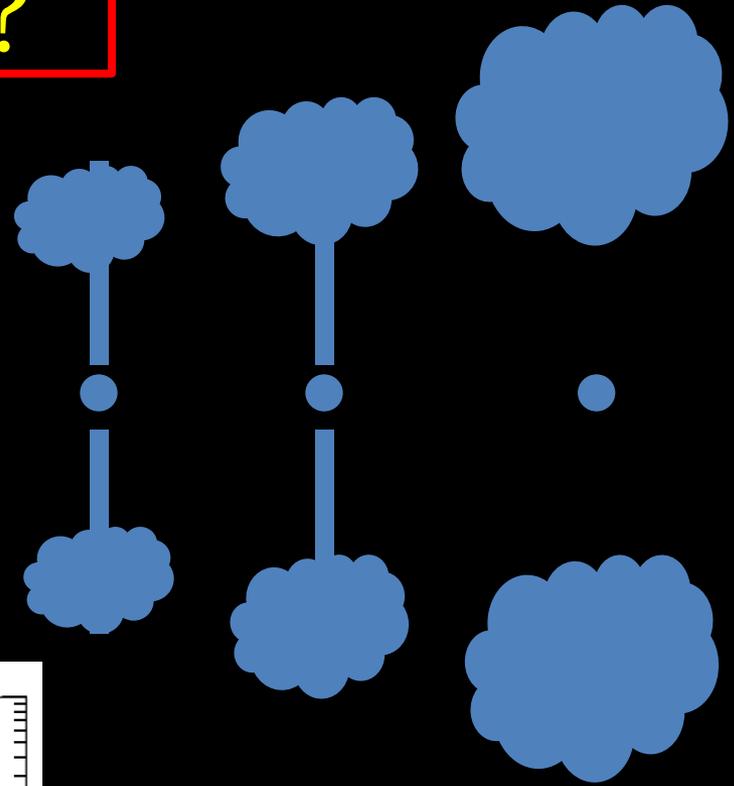


ボイドには天体活動がほとんどない。初期磁場がそのまま残っているかも。ボイド磁場によって初期宇宙の現象を探れるかも！

# ボイドは本当に「きれい」？

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程度の磁場に汚染される

# 宇宙磁場を通して宇宙の歴史を探る

ボイドに（微弱な）磁場が存在するのは間違いない。

- ・ 宇宙初期での磁場生成
- ・ 銀河からの流れ込み

これらは異なった特徴を持つはず。

- ・ 強さ
- ・ 相関長
- ・ 空間分布
- ・ 時間進化

磁場を通して宇宙の歴史を探ることができる可能性あり。

どうやって微弱な磁場を観測するのか？

# 宇宙論的磁場の観測・制限

## ビッグバン元素合成

磁場のエネルギーが宇宙膨張の速さに影響

→ 軽元素合成に影響

→  $B_0 < 1 \mu\text{G}$  (Cheng et al., 1996)

## 宇宙背景放射の非等方性

磁場によってゆらぎが生成される

→ 将来的に  $B_0 \sim 1\text{nG}$  の感度

(Yamazaki et al. Giovannini)

## 宇宙論的ファラデー回転

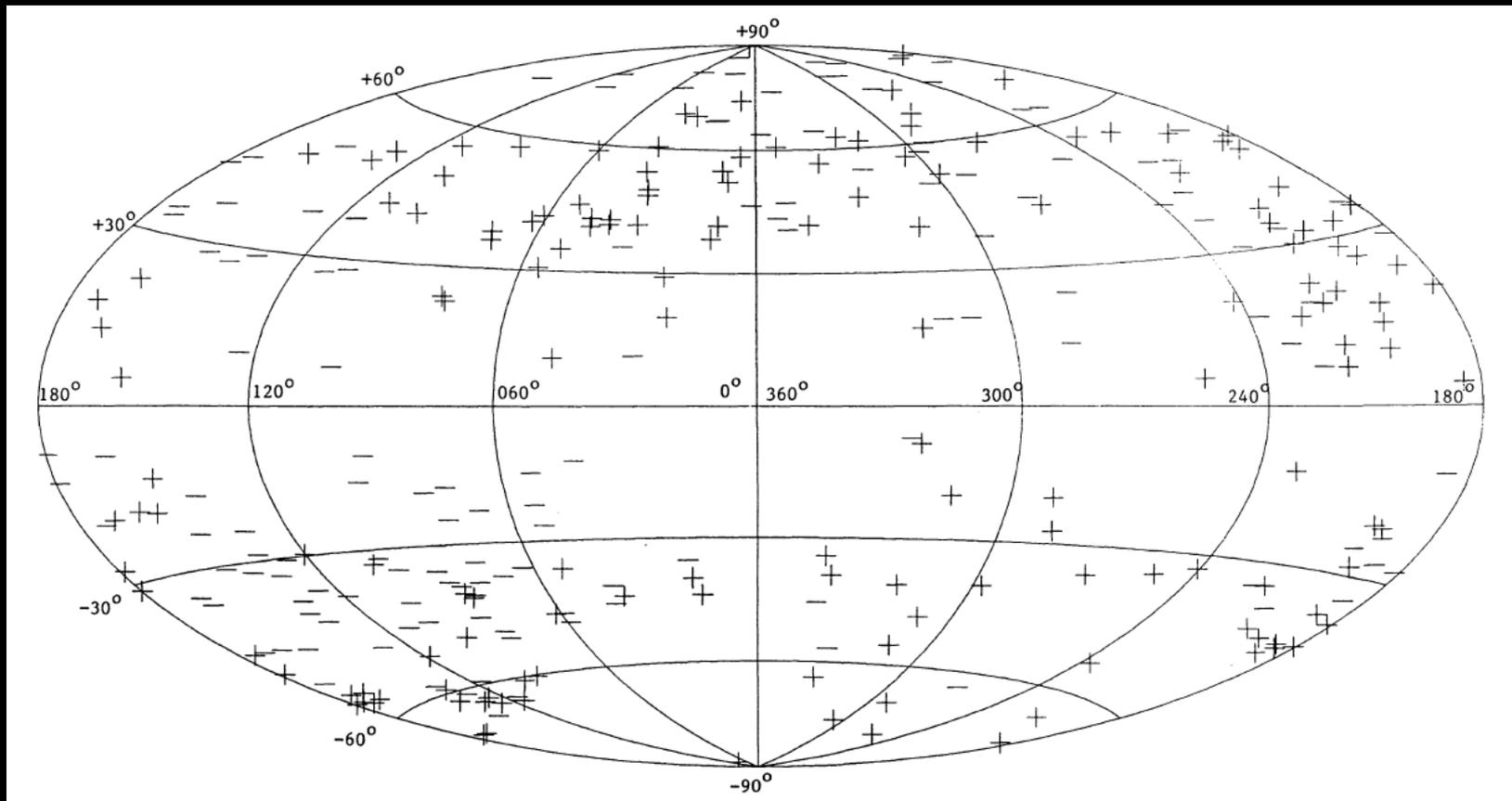
高エネルギー天体の pair echo

微弱な磁場を  
観測する上で  
将来有望

# 宇宙論的ファラデー回転

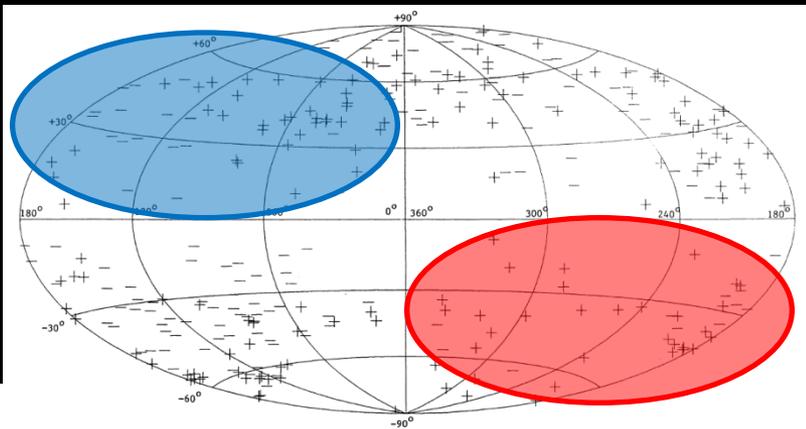
Vallee, 1990

遠方の銀河とクェーサーで宇宙磁場を探る  
309個 (redshiftあり、 $|RM| < 200 \text{ rad/m}^2$ )

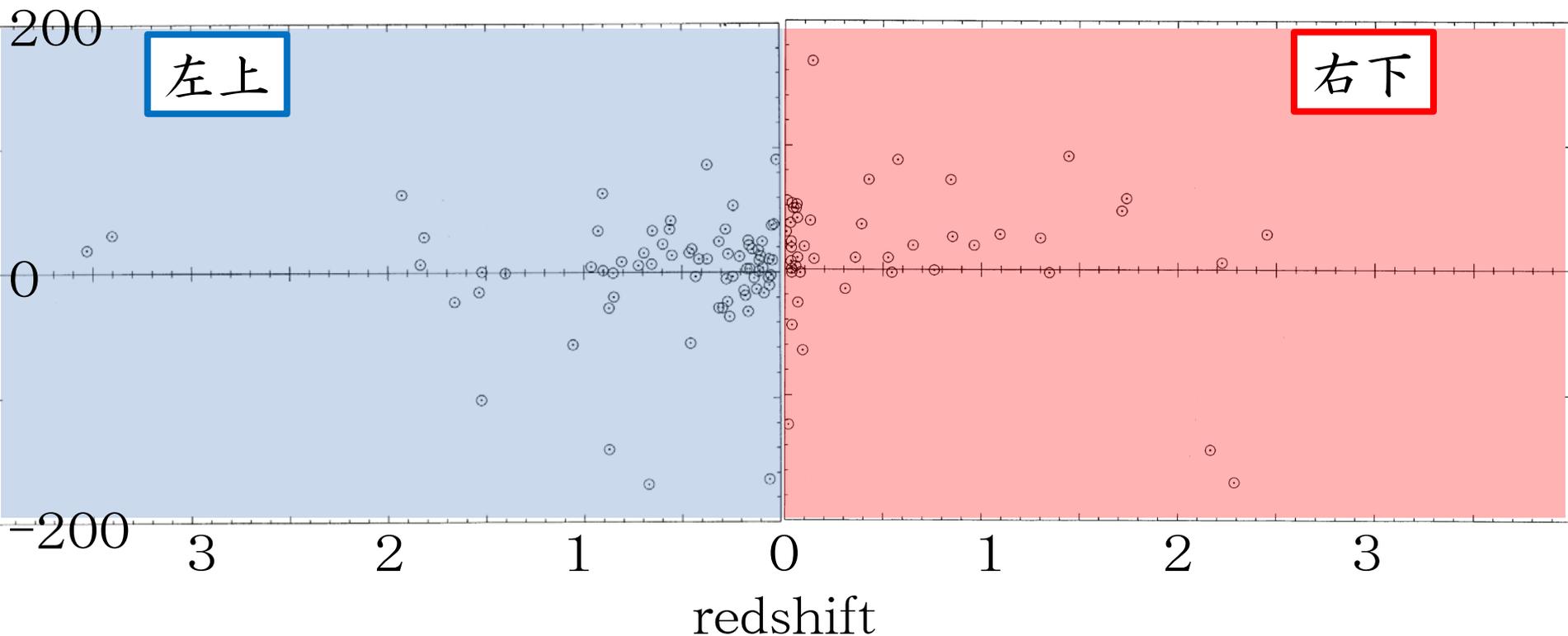


# 宇宙論的ファラデー回転

全天を4つの領域に分け  
対角領域の天体で制限する



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

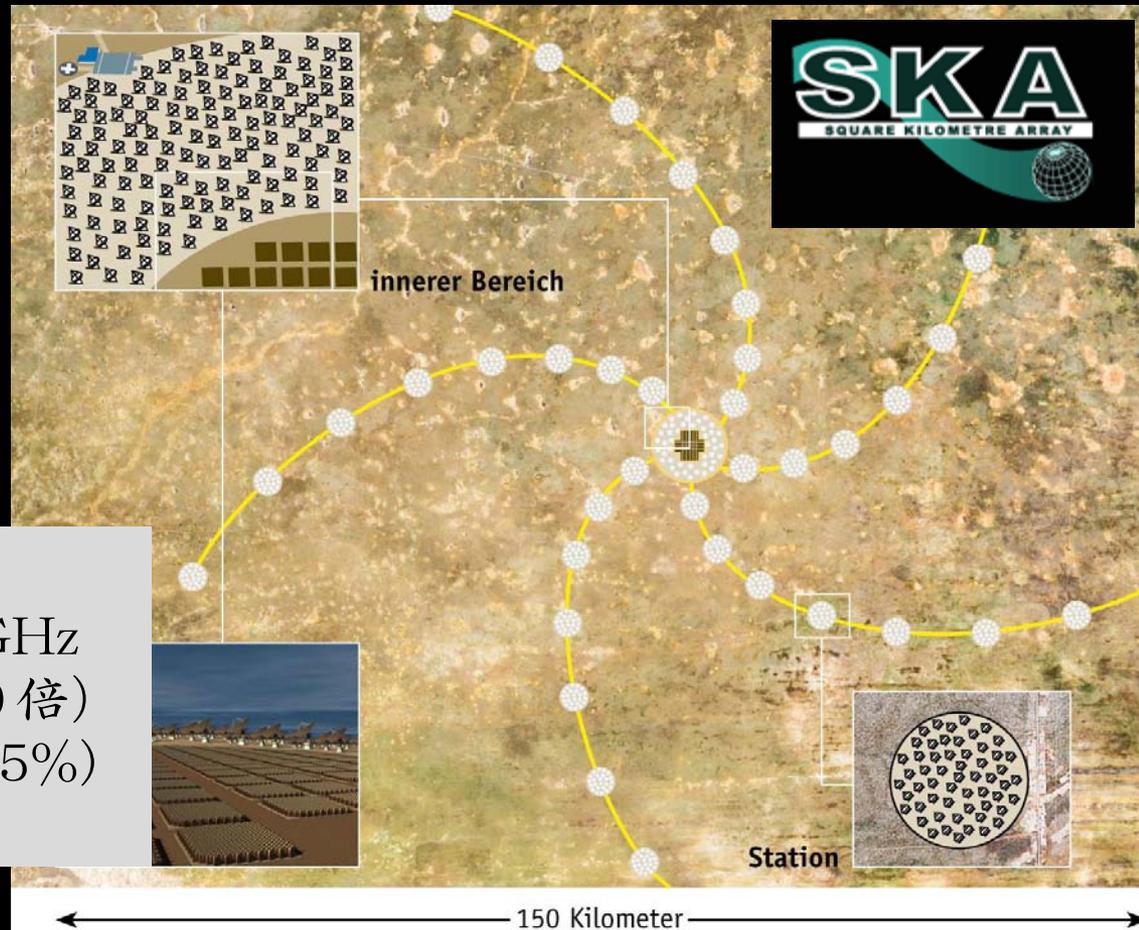


一様な磁場への制限： $B < 6 \times 10^{-11} \text{G}$

# ファラデー回転探索の将来

- 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)
- LOFAR ~  $10^7$  個
- SKA  
日本のscience  
working groupに  
参加予定

- 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



# 高エネルギー天体のpair echo

ガンマ線バーストやブレーザーを使った磁場測定法  
(Plaga, 1994)

- ・ pair echo
  - TeV  $\gamma$  線の対消滅による  
遅延2次 $\gamma$ 線
- ・  $10^{-15} \sim 10^{-20}$  Gaussの磁場に  
感度がある
  - 微弱な磁場の観測に関して  
最も強力
- ・ 未だ実際に用いられたことはない
- ・ 定式化  
KT, Ichiki, Inoue et al., 2007~



激しい $\gamma$ 線放射。  
ブラックホール  
からのジェットを  
正面から見ている？

# 宇宙磁場グランドシナリオ

## 宇宙初期に様々な磁場生成過程

- ・インフレーション
- ・密度ゆらぎ
- ・再イオン化
- ・構造形成

$10^{-20 \pm 5}$  Gaussを予言

## 磁場の行く末

- ・濃い領域 → 銀河の種磁場？
- ・薄い領域 → ボイド磁場として初期情報を保つ？
- 磁場によって宇宙初期の現象を探る

## 微弱磁場の観測

- ・ファラデー回転サーチ
- ・高エネルギー天体のpair echo

理論・観測の両面から宇宙磁場にアプローチ

## 2、ゆらぎによる磁場生成

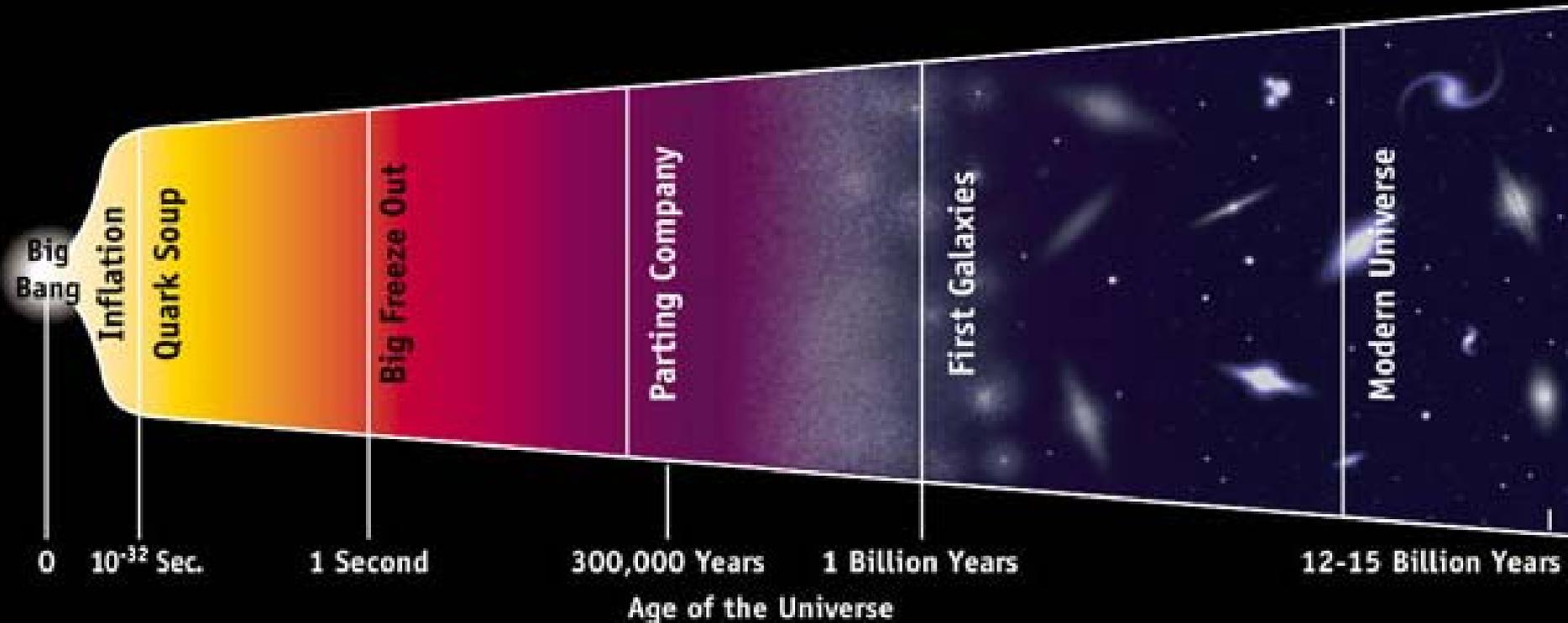
KT, K. Ichiki, N. Sugiyama 05, 06, 07, 08

KT, T. Kobayashi, R. Maartens, T. Shiromizu, 07

# 宇宙論的摂動

摂動 = 一様等方宇宙からのずれ

- ・インフレーションで量子的に生成  
→ 密度ゆらぎ、重力波
- ・インフレーション後、線形に成長  
→ CMBゆらぎ、構造形成



# 原始ゆらぎ

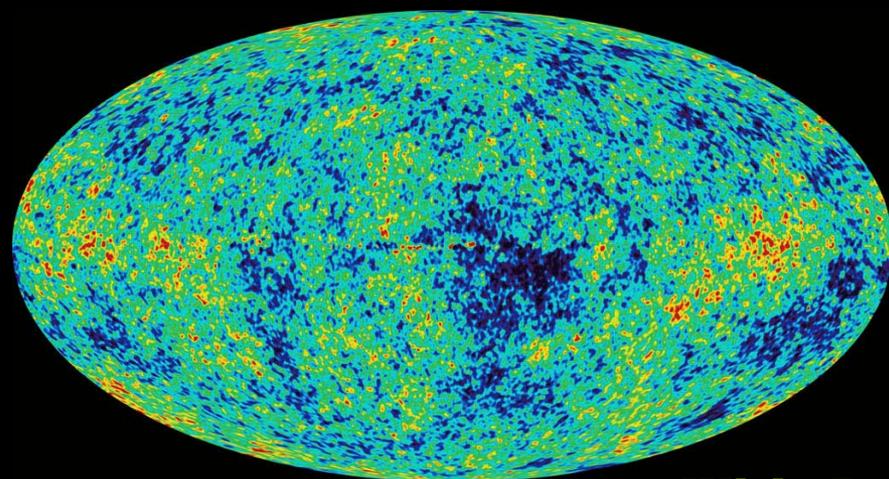
## 観測

- ・ 宇宙背景放射
- ・ 銀河分布

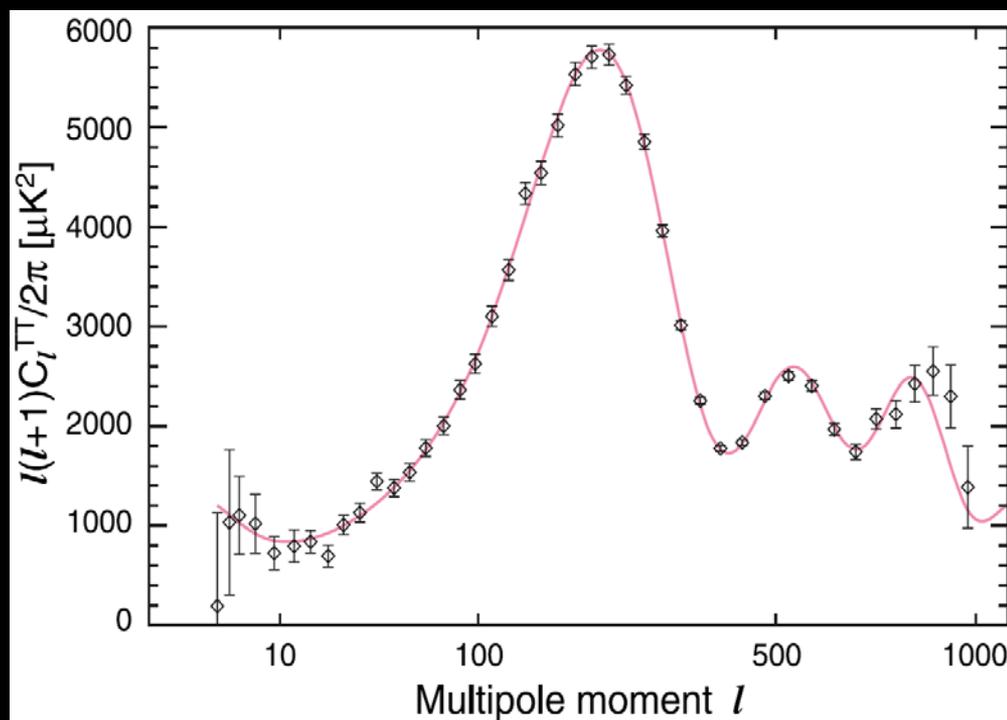
## 理論

- ・ インフレーション  
(初期条件)
- ・ 宇宙論的摂動論  
(線形)

ゆらぎは理論的にも  
観測的にもよく  
確立されている。



WMAP



# 磁場生成

再結合以前でのゆらぎによる  
磁場生成

Hogan (00)

Berezhiani & Dolgov (04)

Matarrese et al. (05)

Gopal & Sethi (05)

KT et al. (05, 06, 07, 08)

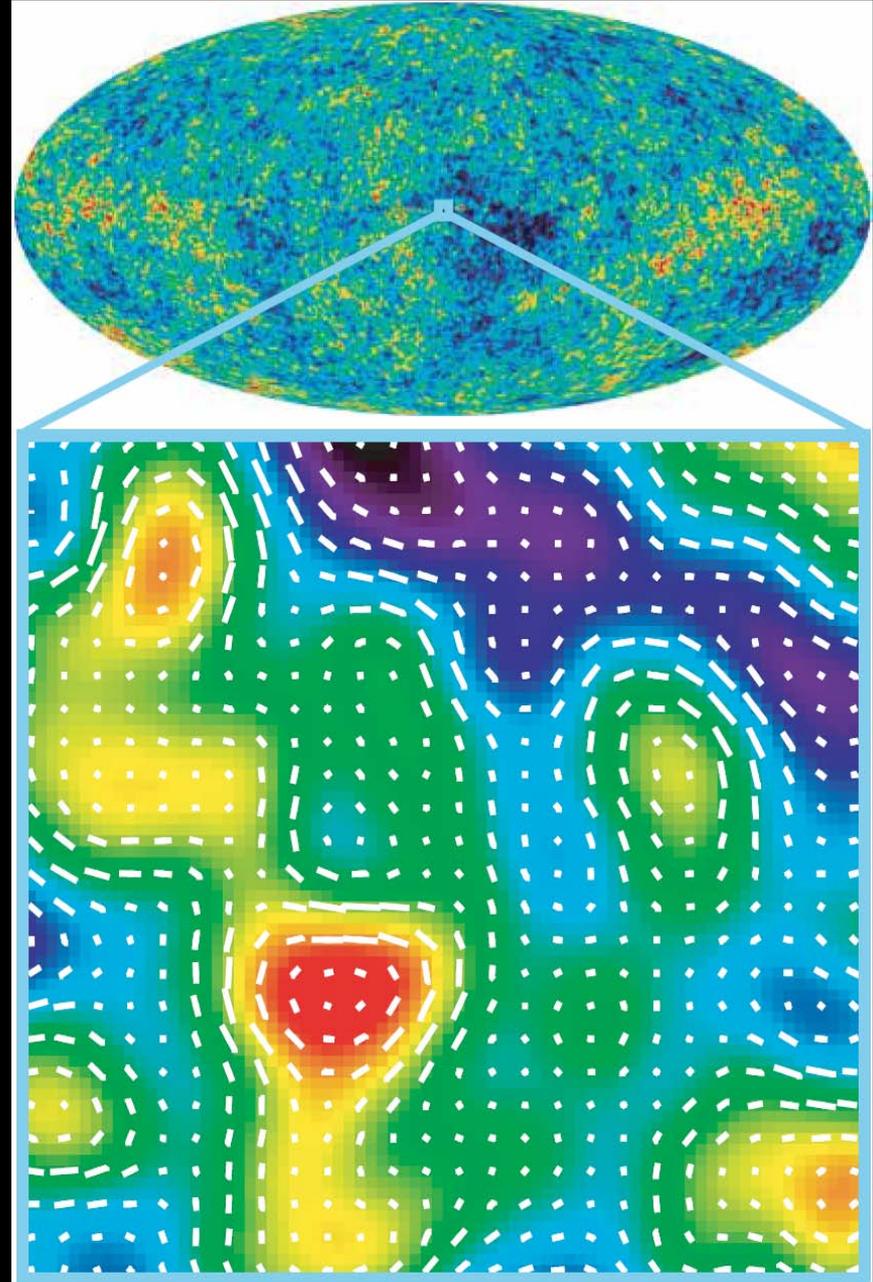
Siegel & Fry (06)

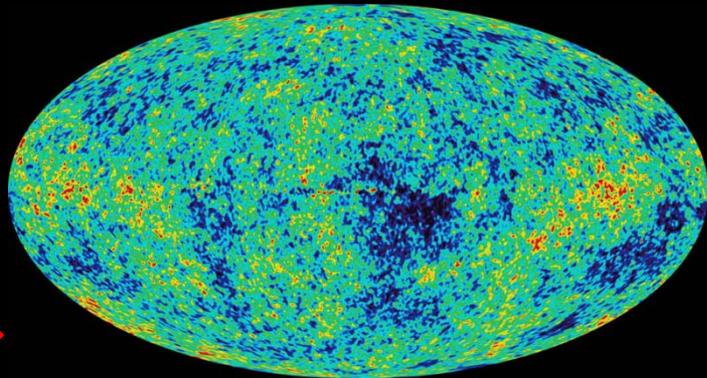
Hollenstein et al. (08)

Maeda et al. (09)

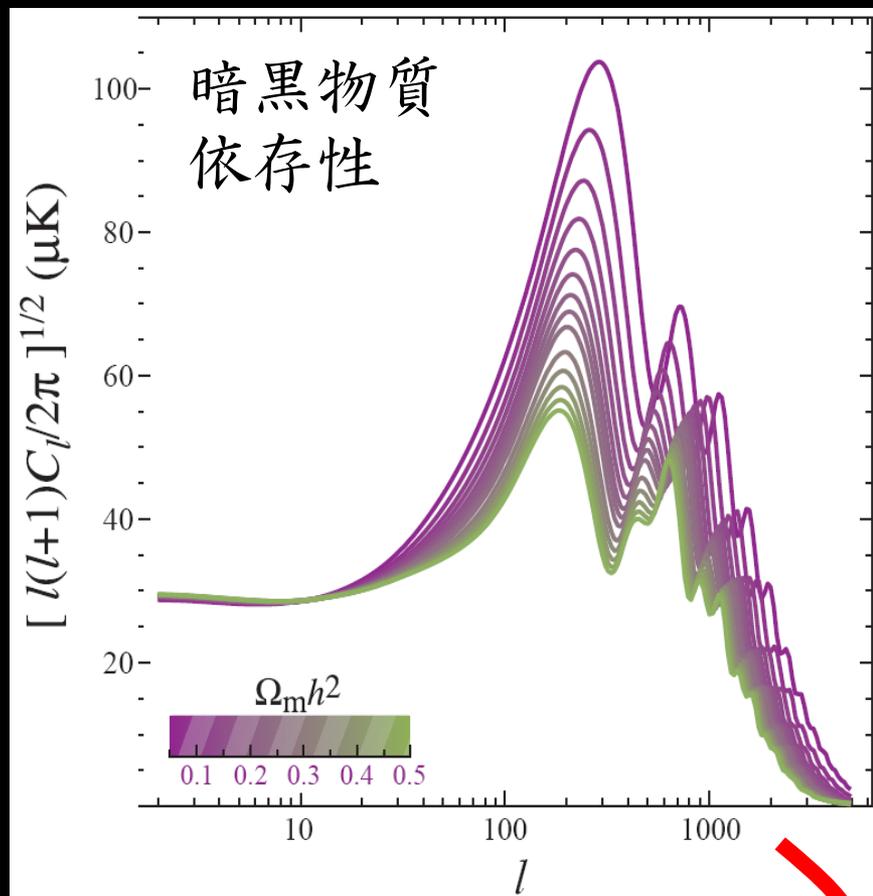
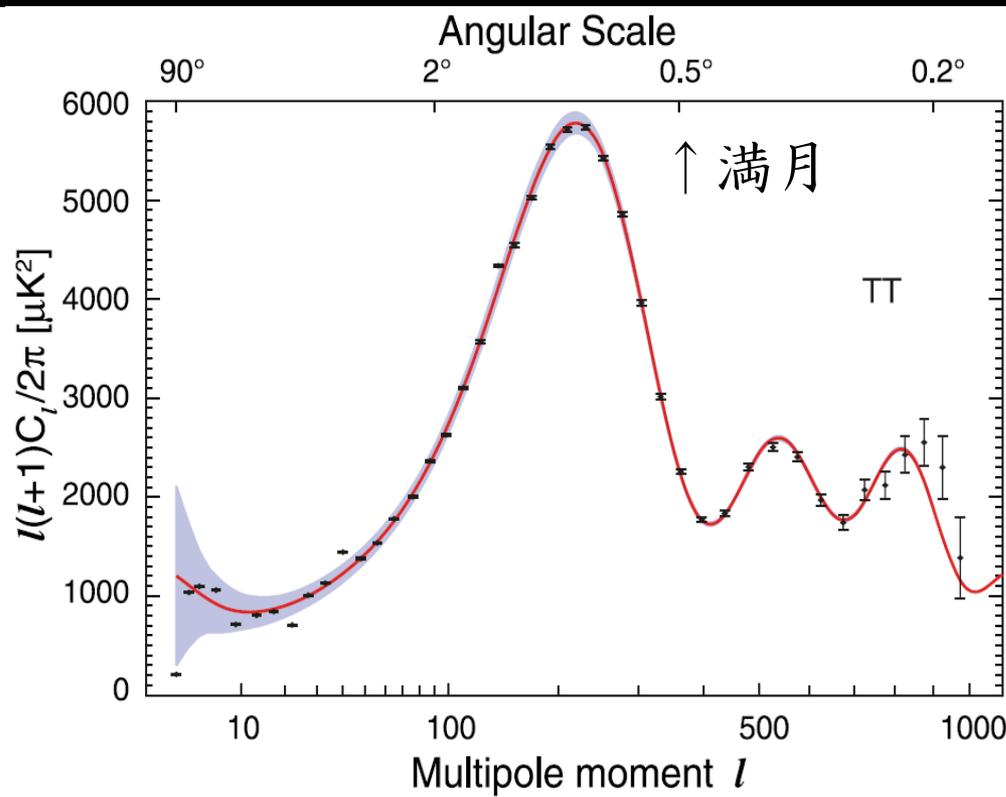
これは以下に基づいている

- ・ 宇宙論的摂動論  
(非線形)
- ・ 観測的事実
- ・ 物理的仮定なし



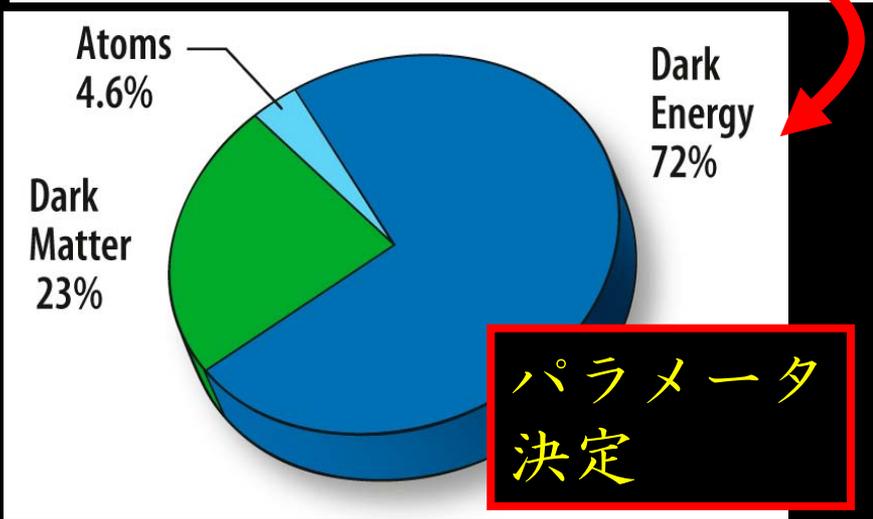


球面調和関数展開



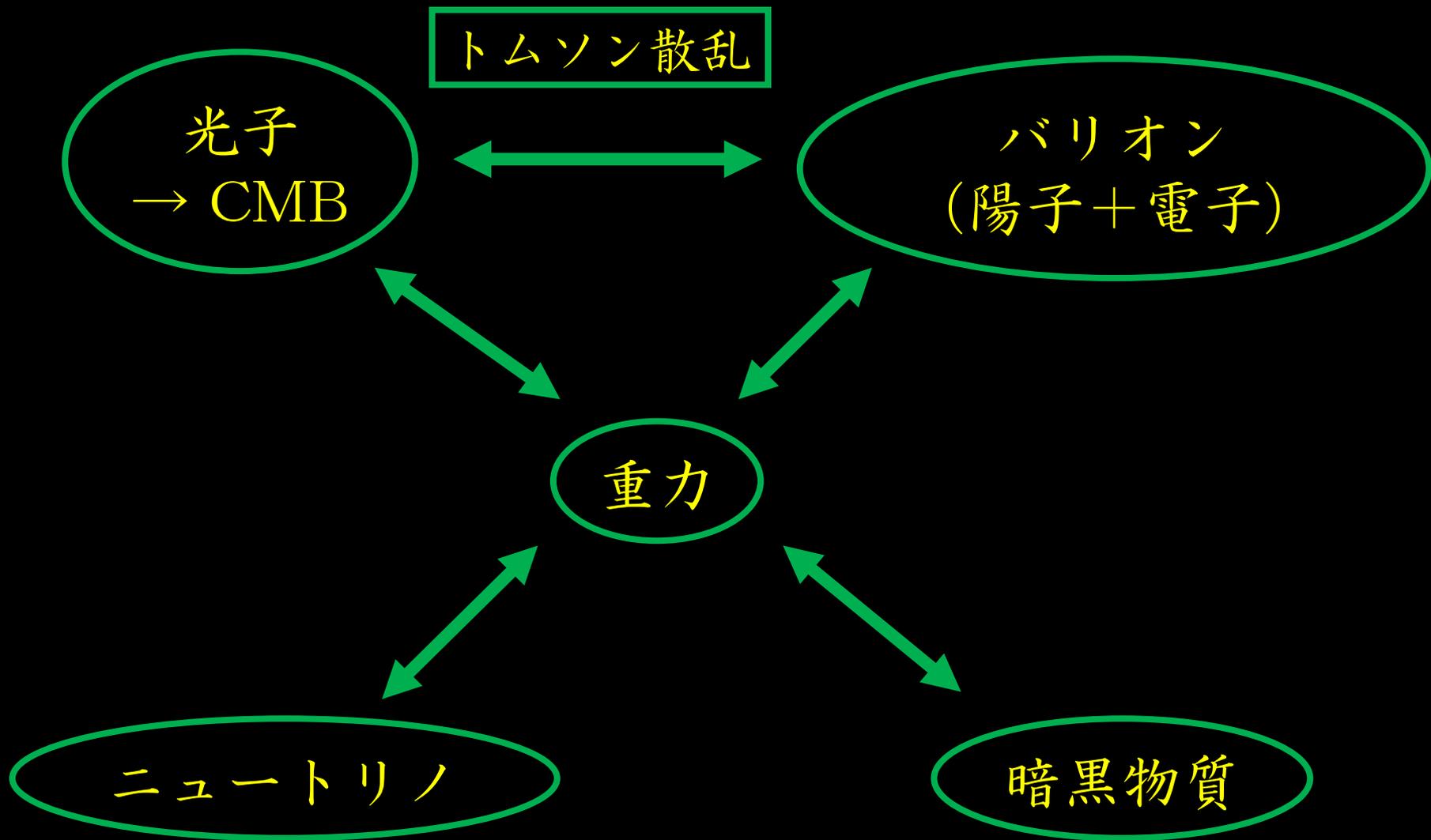
暗黒物質  
依存性

$\Omega_{\text{m}}h^2$   
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5



パラメータ  
決定

# 宇宙の組成とダイナミクス



# 方程式系

## 方程式系

光子・ニュートリノのボルツマン方程式

バリオン・暗黒物質の流体方程式

アインシュタイン方程式

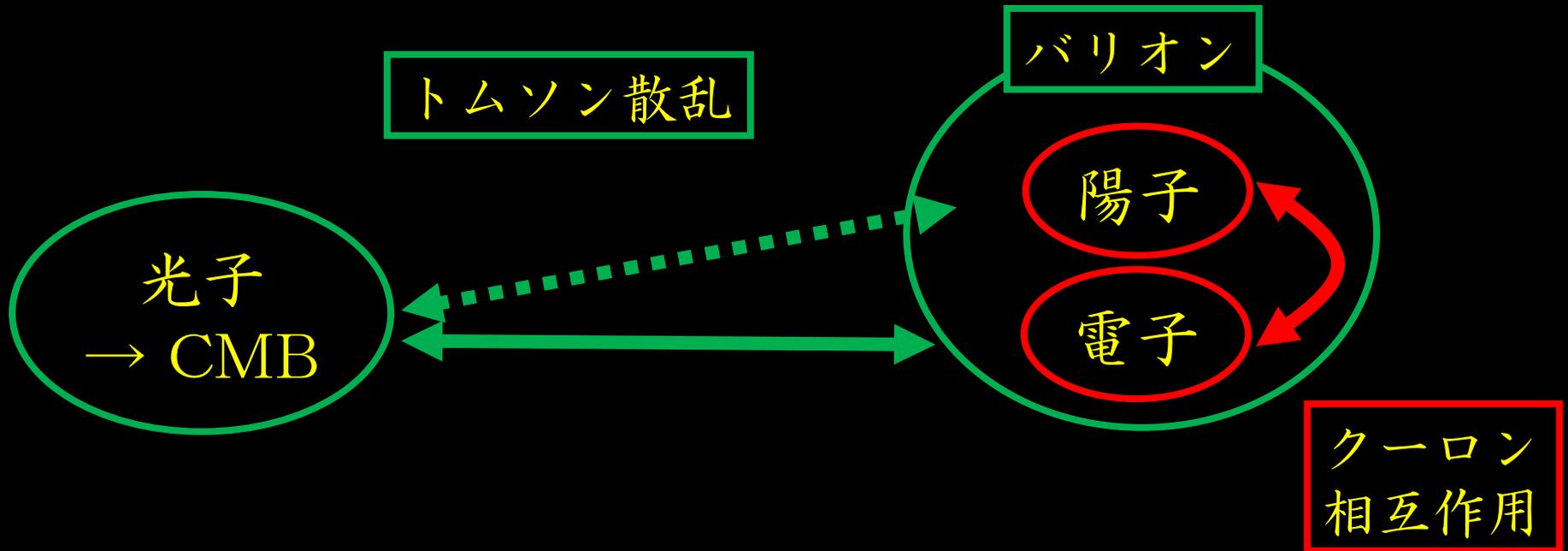
これらを一様等方からのずれが小さいとして  
摂動的に解く。

$$\rho(t, x) = \rho^{(0)}(t) + \rho^{(1)}(t, x) + \dots$$

$$\vec{V}(t, x) = \vec{V}^{(1)}(t, x) + \dots$$

$$\phi(t, x) = \phi^{(1)}(t, x) + \dots$$

# 磁場生成のイメージ



陽子・電子はクーロン相互作用で固く結びついている。

しかし…

トムソン散乱

→ 軽い電子の方がより光子の風を感じる

→ 電流・電場の生成

→ 磁場の生成

# これまでの枠組みの拡張

磁場生成には何が必要か？

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

電場とその回転

電場

- ・従来はバリオン

(CMBだけが問題なら陽子と電子の運動の違いなど重要でないので無視されていた。)

- ・陽子と電子を別々に扱う

回転成分

- ・線形では回転成分はない
- ・非線形効果で回転成分が生成

(CMBゆらぎには線形で十分だが磁場生成には十分でない)

2つの点でこれまでの枠組みを拡張

# 初期宇宙におけるオームの法則

陽子と電子の（特殊相対論的）運動方程式

$$\begin{aligned}
 & m_p n_p [\partial_t \vec{v}_p + (\vec{v}_p \cdot \nabla) \vec{v}_p] \\
 &= en_p (\vec{E} + \vec{v}_p \times \vec{B}) - \underbrace{e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e)}_{\text{Coulomb}} + \underbrace{\frac{m_e^2}{m_p^2} \sigma_T n_p \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_p)}_{\text{Thomson}} - m_p n_p \nabla \Phi, \\
 & m_e n_e [\partial_t \vec{v}_e + (\vec{v}_e \cdot \nabla) \vec{v}_e] \\
 &= -en_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + \underbrace{e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e)}_{\text{Coulomb}} + \underbrace{\sigma_T n_e \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_e)}_{\text{Thomson}} - m_e n_e \nabla \Phi,
 \end{aligned}$$

一般化オームの法則

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

光子の「風」

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

磁場の発展方程式

$$\partial_t \vec{B} = \eta_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{B} + \nabla \times \vec{C}$$

源がなければ  
減衰するだけ

# 電荷密度のふるまい

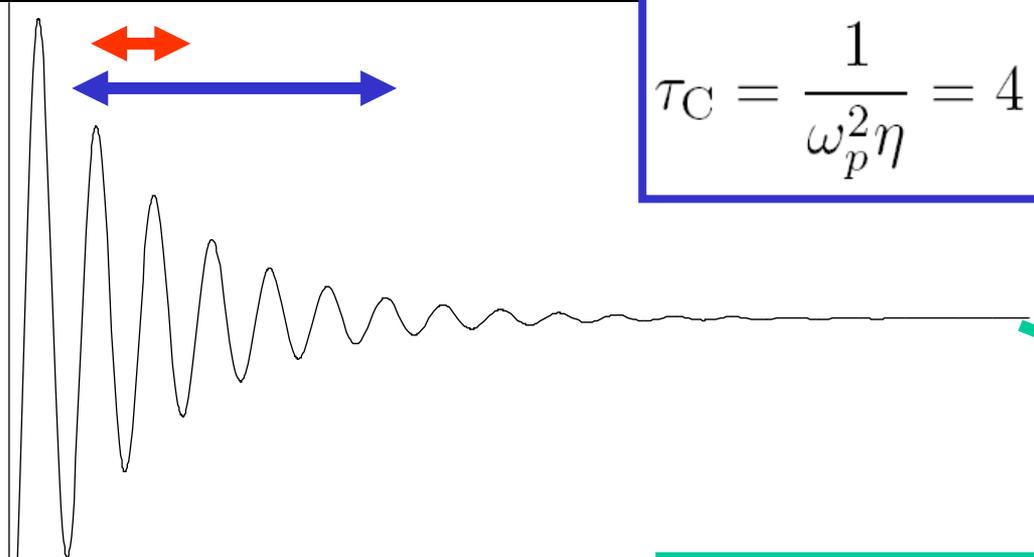
オームの法則の発散

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

外力入りの  
減衰振動

$$\omega_p^{-1} \equiv \sqrt{\frac{m_e}{e^2 n(0)}} = 2 \times 10^{-9} \text{ sec} \left( \frac{1+z}{10^5} \right)^{-3/2}$$

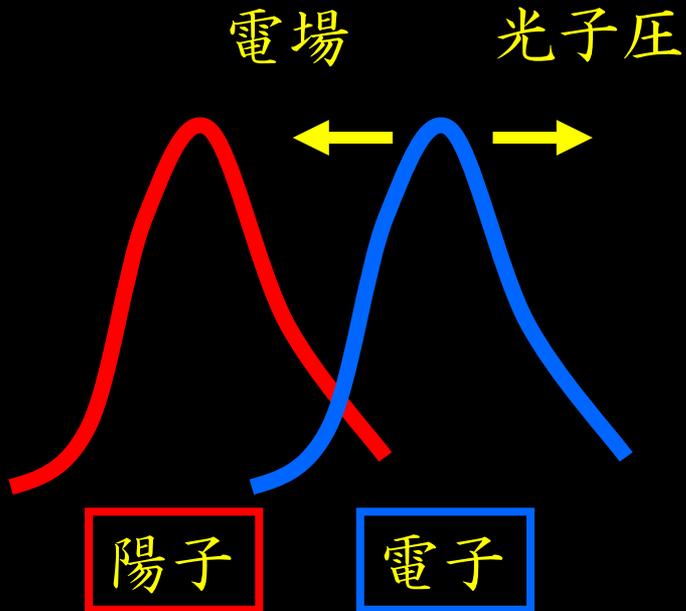
$$\tau_C = \frac{1}{\omega_p^2 \eta} = 4 \times 10^{-3} \text{ sec} \left( \frac{1+z}{10^5} \right)^{-3/2}$$



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

宇宙論的時間スケールではプラズマ振動は減衰。  
しかし源があるので平衡状態はゼロではない。

# 初期宇宙の電磁氣的性質



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

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

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

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

- ・ オームの法則で抵抗項は重要でない  
→ オームの法則で電場と外力がバランス
- ・ 電流 → (変位電流) + (磁場)
- ・ 光子の風がなくなると・・・  
→ 電場は消えるが磁場は残る (時間積分のため)

# 定量的解析

KT et al. (05, 07)

- ・ソース項の一般相対論的導出

$$\partial_t B^i = \frac{8\sigma_T \rho_\gamma^{(0)}}{3e} \epsilon^{ijk} \left[ \frac{\rho_{\gamma,k}^{(1)}}{\rho_\gamma^{(0)}} \delta v_{b\gamma j}^{(1)} + \delta v_{b\gamma j,k}^{(2)} + \frac{1}{8} \left( v_{bl}^{(1)} \Pi_{\gamma j}^{(1)l} \right)_{,k} \right]$$

確かにどれも摂動2次。

- ・磁場スペクトルを数値的に評価

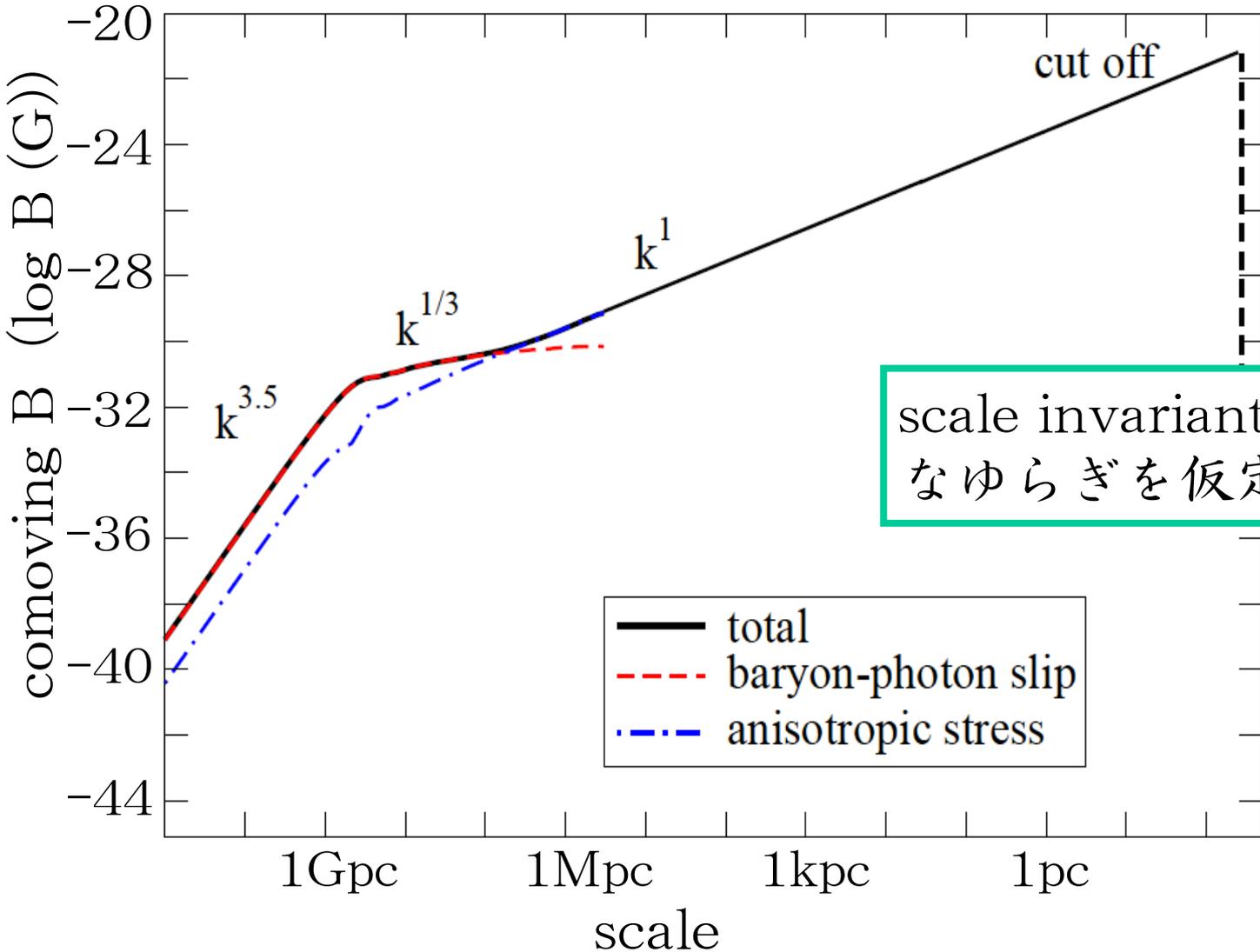
(1st order) × (1st order) の形のものだけ

(purely 2nd order) は無視

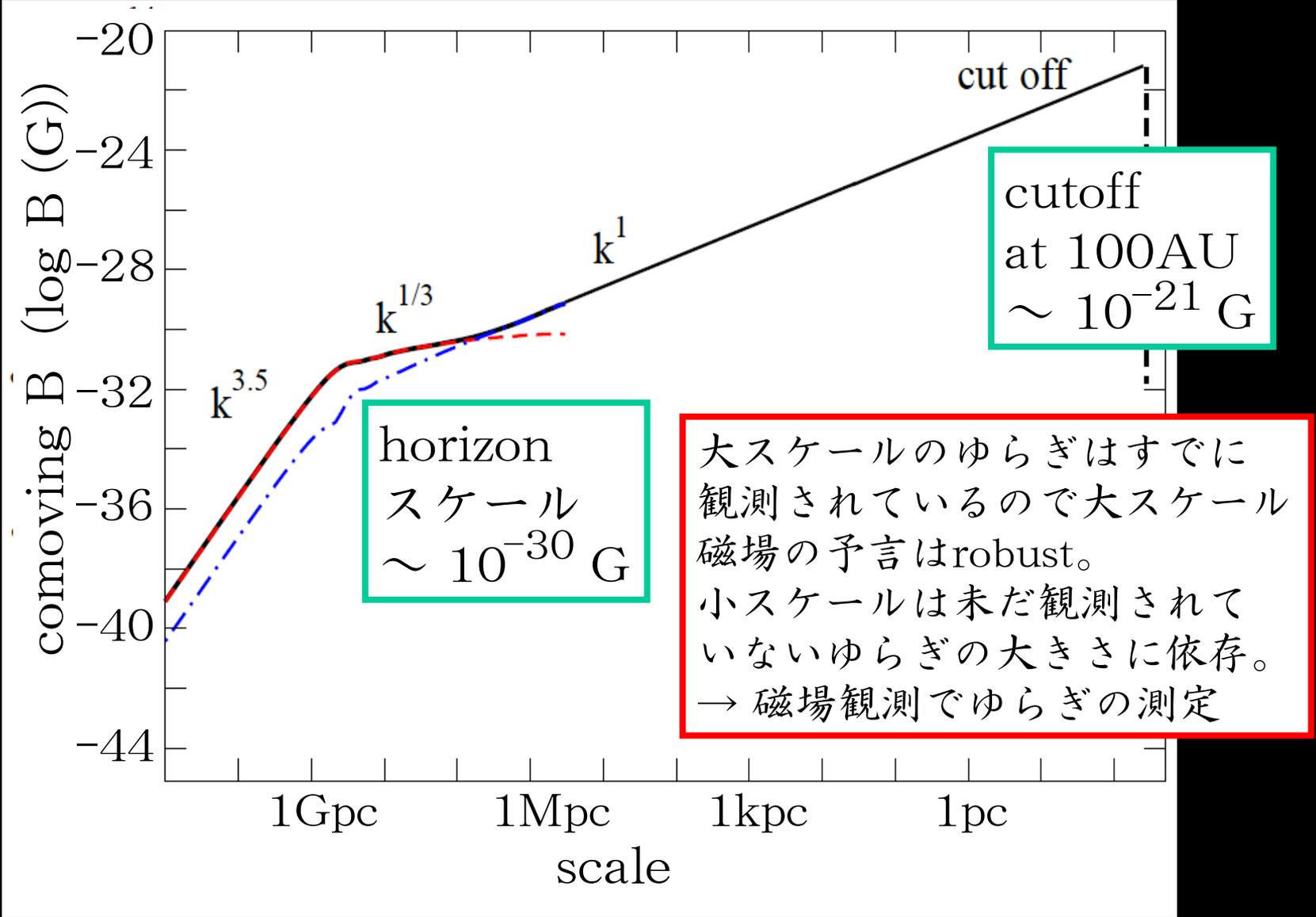
(1次の量は簡単に計算できるのでその積も「簡単に」評価できる。しかしvorticityを評価するには2次のボルツマン方程式を解く必要があり、ただいま取組中。)

# スペクトル

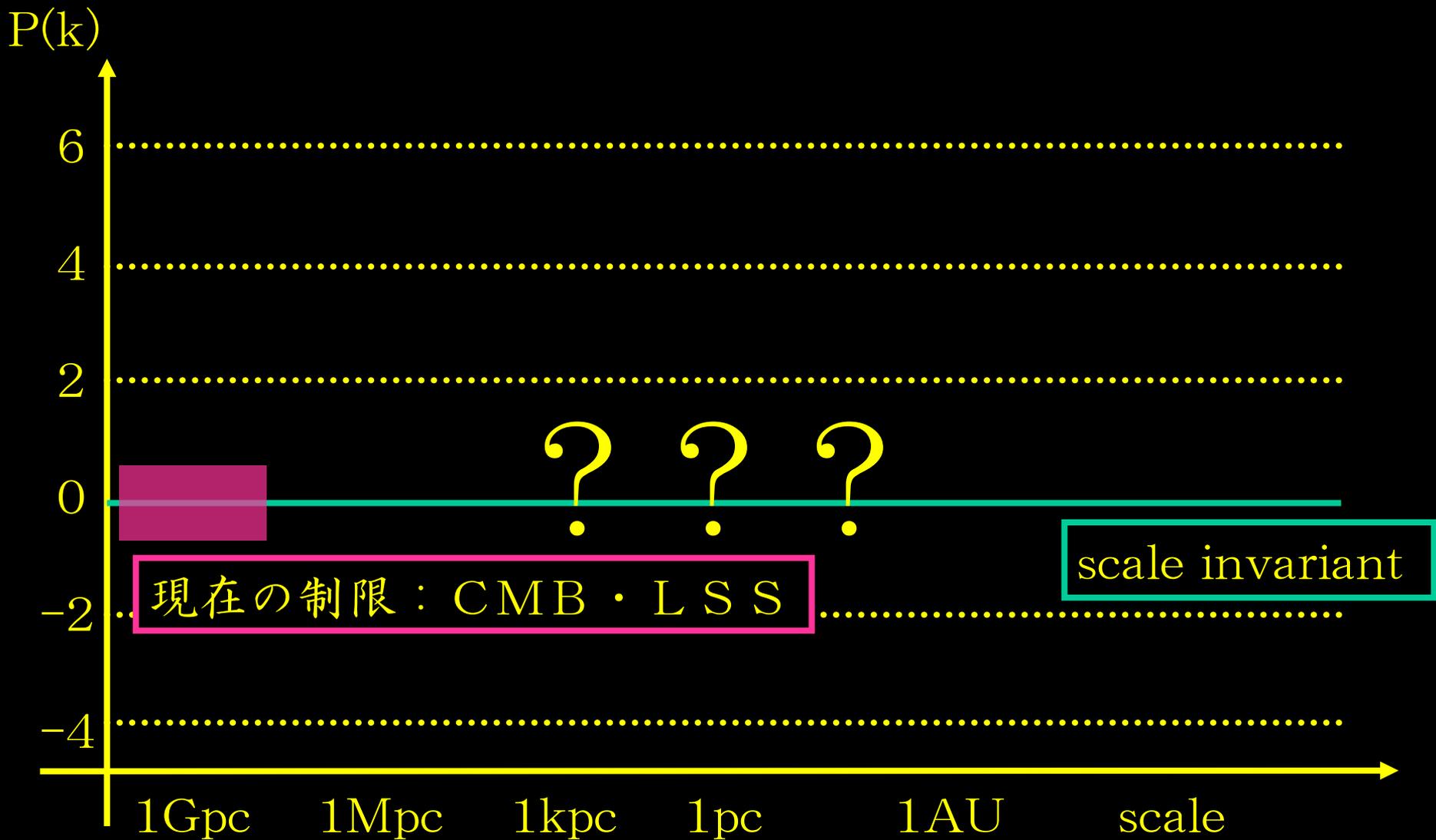
$$\partial_t B^i = \frac{8\sigma_T \rho_\gamma^{(0)}}{3e} \epsilon^{ijk} \left[ \frac{\rho_{\gamma,k}^{(1)}}{\rho_\gamma^{(0)}} \delta v_{b\gamma j}^{(1)} + \delta v_{b\gamma j,k}^{(2)} + \frac{1}{8} \left( v_{bl}^{(1)} \Pi_{\gamma j}^{(1)l} \right)_{,k} \right]$$



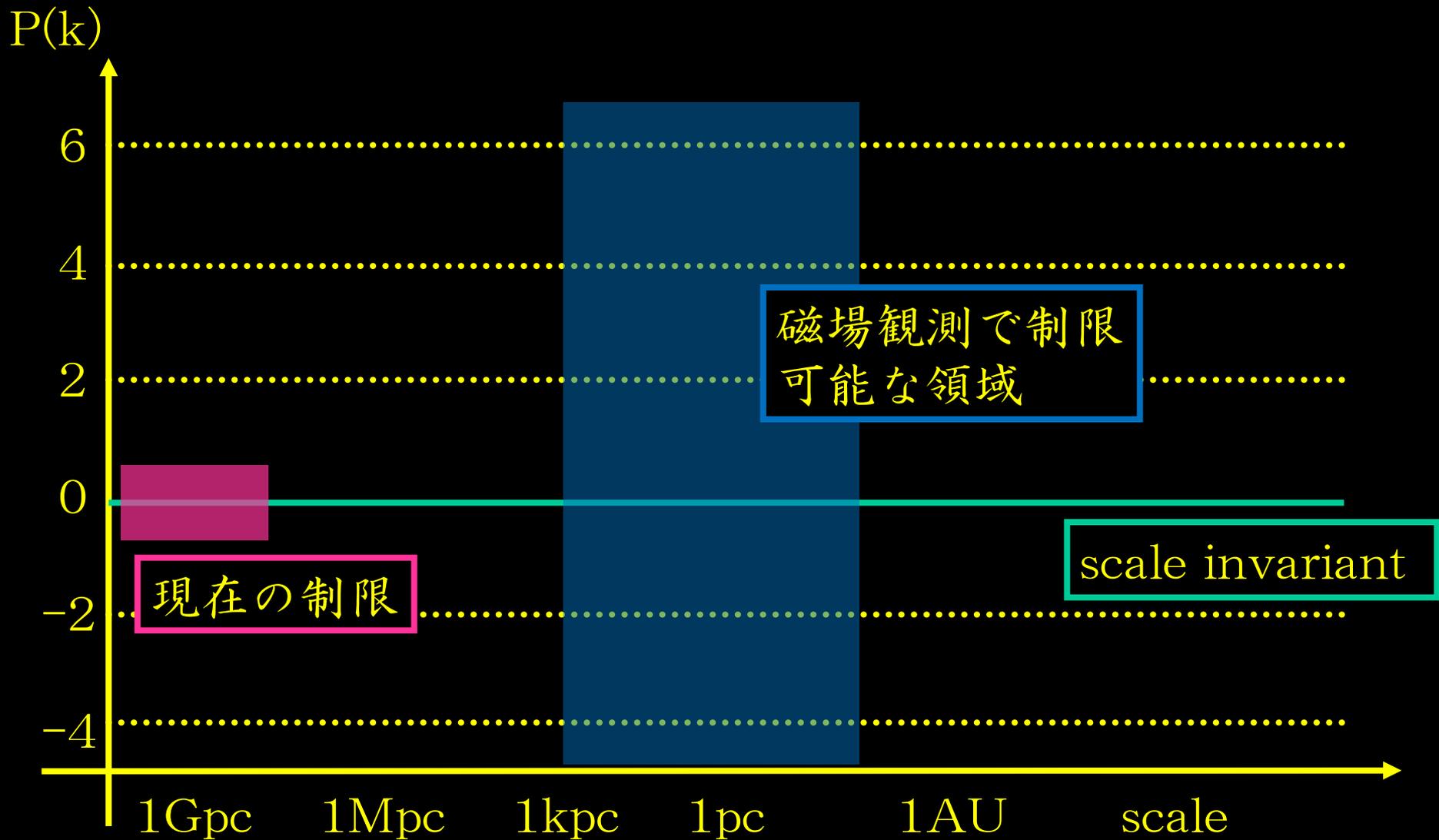
# スペクトル



# 原始ゆらぎへの制限



# 原始ゆらぎへの制限



# ゆらぎによる磁場生成まとめ

## ゆらぎによる磁場生成

- ・ トムソン散乱による陽子と電子の運動の差  
→ 磁場生成
- ・ 2つの拡張
  - 陽子電子を独立に扱う
  - 非線形効果
- ・ 100AU~horizonスケールまであらゆるスケールで宇宙全体を満たす磁場が存在
- ・ 大スケールではrobust
- ・ 小スケール磁場の観測でゆらぎの測定？
- ・  $B \sim 10^{-21}$  Gauss (preliminary)

# 3、高エネルギー天体による 微弱宇宙磁場の観測

KT, K. Ichiki, S. Inoue, K. Murase, S. Nagataki, 07, 08, 09

# 宇宙磁場の観測

どうやって磁場生成理論を検証できるか？

銀河・銀河団など

→ 増幅により初期条件は残っていない  
ボイド

→ 初期条件は残っている？

初期宇宙

→ 増幅される前

# 磁場観測の方法

BBN :  $B < 1 \mu\text{G}$

CMBゆらぎ :  $B < 1 \text{nG}$

→ それほど発展が期待されない  
 $10^{-20} \text{ G}$ まで到達するのはたぶん不可能

ファラデー回転 :  $B < 0.06 \text{nG}$

→ 今後発展が期待される

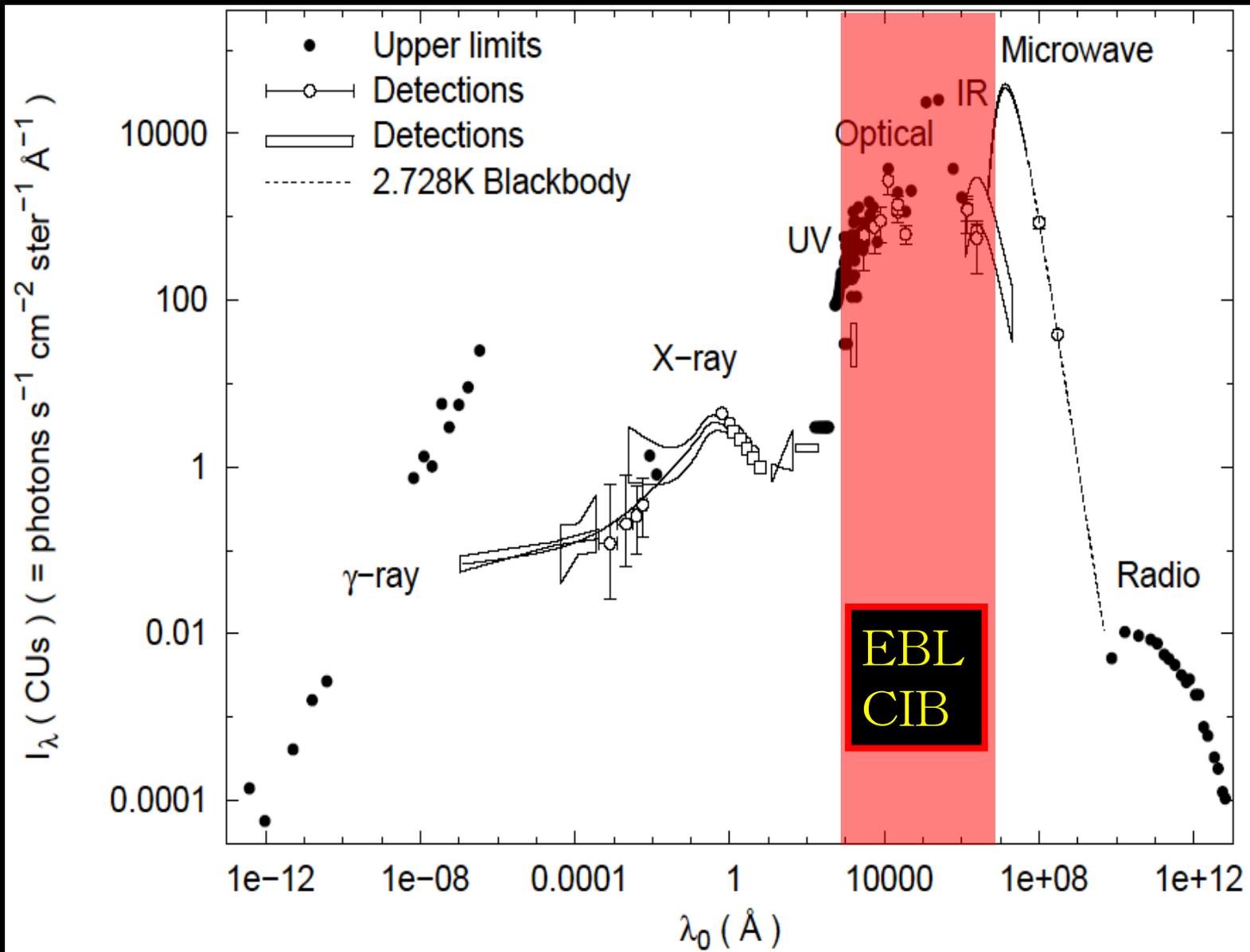
Plagaの方法 (Plaga, 1994)

高エネルギー天体 (GRB・blazar) からの  
遅延ガンマ線によって微弱な磁場を観測

→  $B = 10^{-15} \sim 10^{-20} \text{ G}$

→ 微弱磁場に対して最もポテンシャルが高い

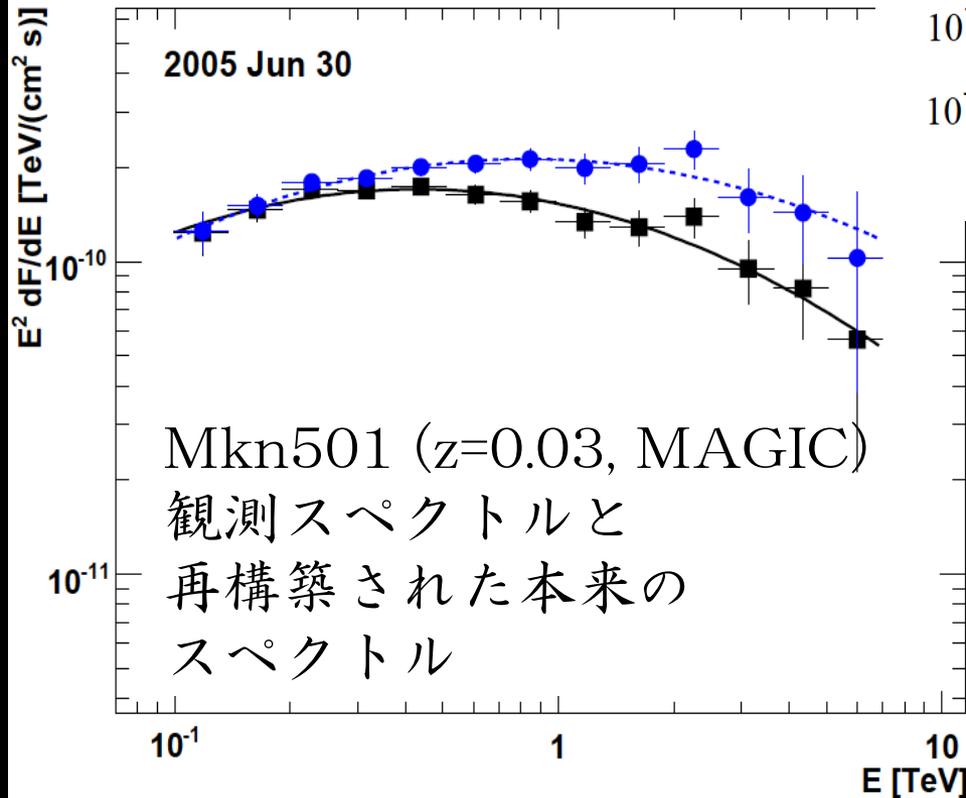
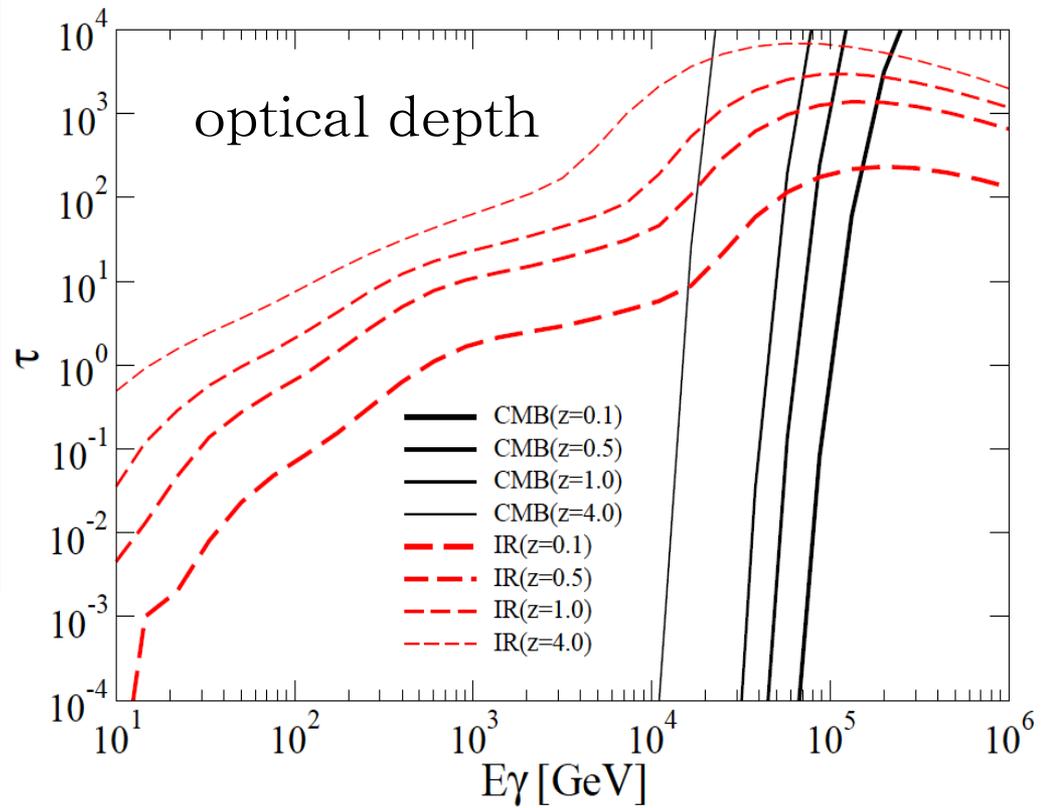
# 背景放射



# ガンマ線吸収

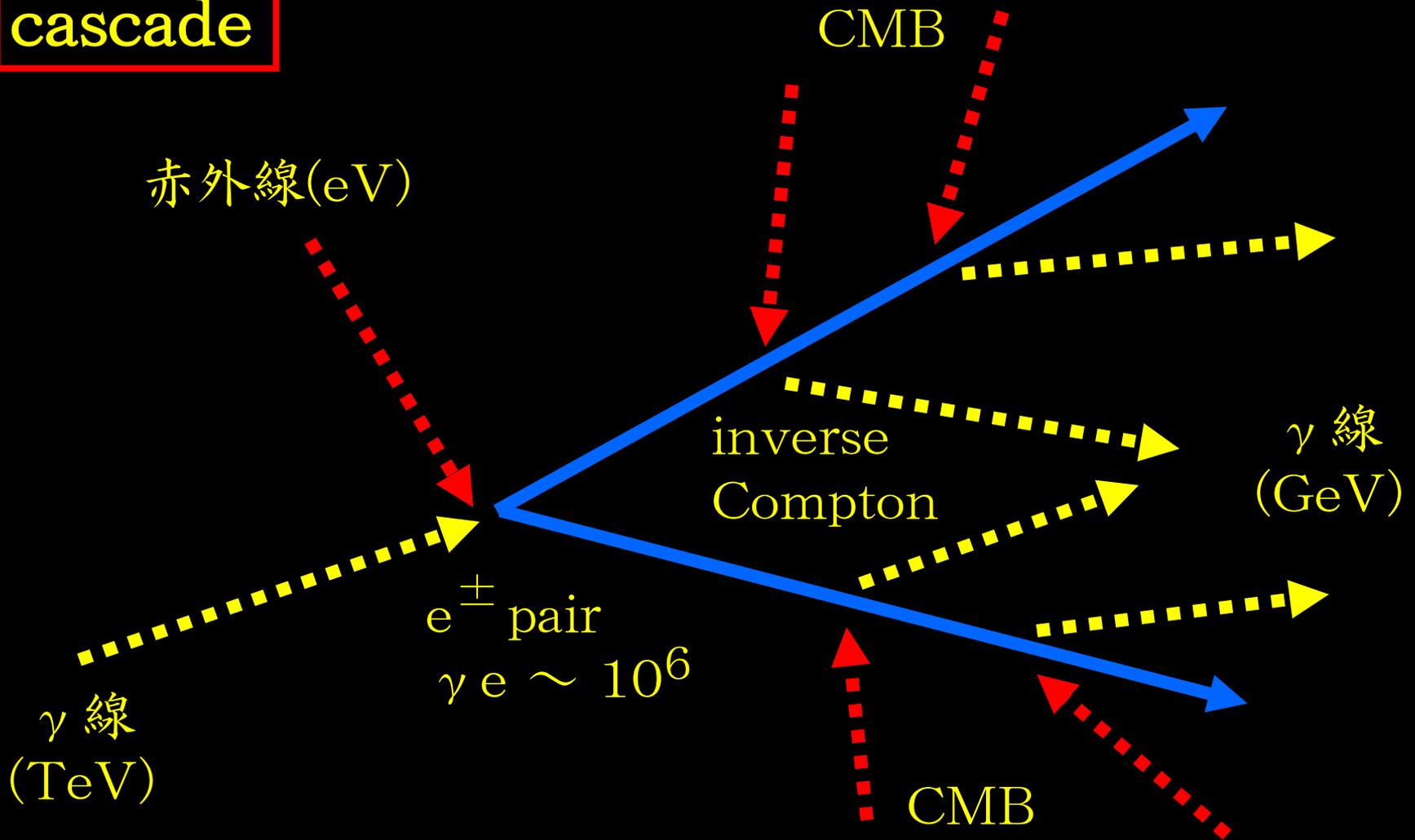
遠方にある天体から来る  
TeV以上のガンマ線は  
途中で吸収

$$E_\gamma E_{\text{bg}} = m_e^2$$



吸収されたエネルギーは  
どうなるのか？

# cascade



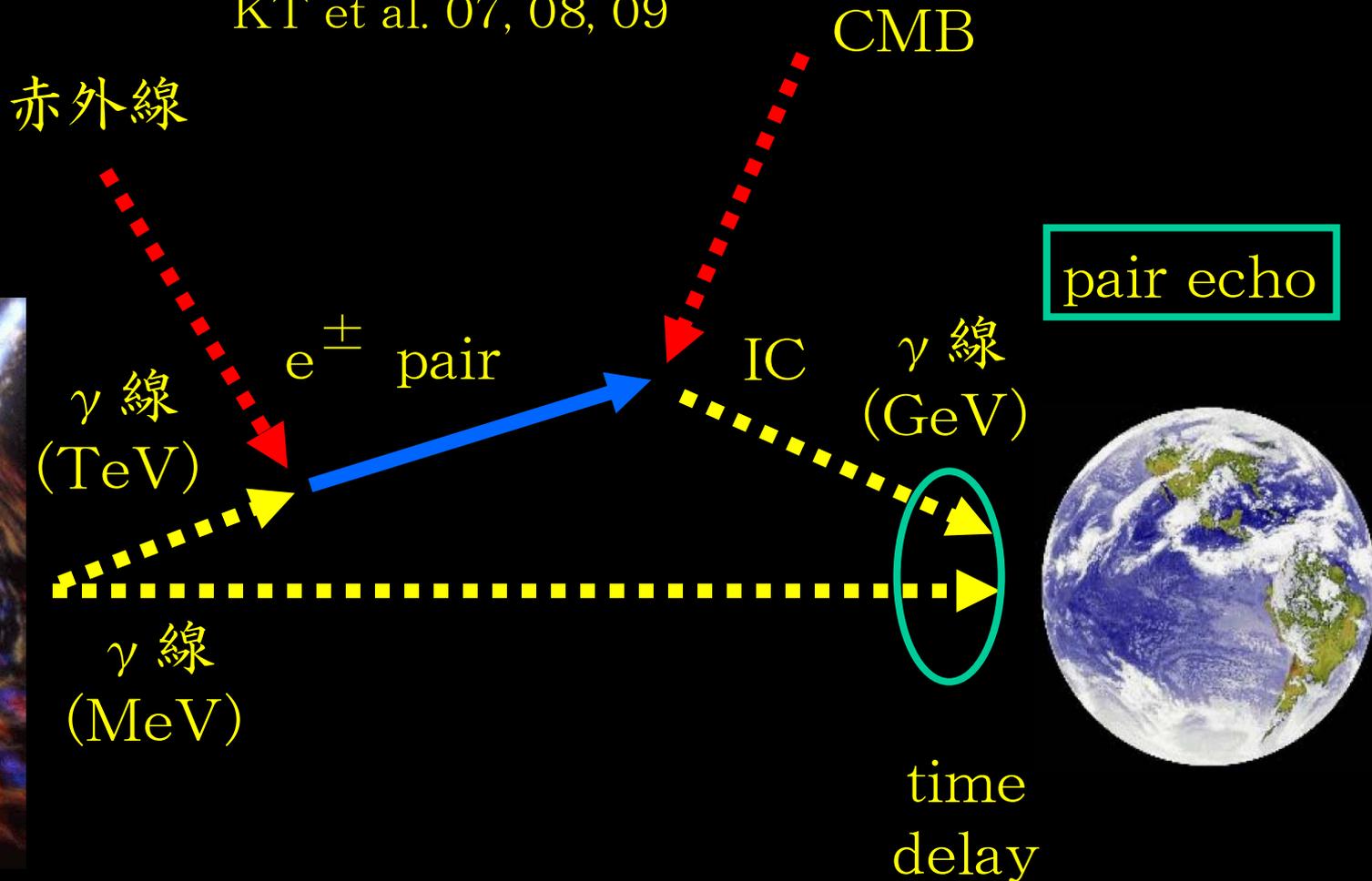
TeVガンマ線はたくさんのGeVガンマ線になる。  
\*進行方向は相互作用の度に $1/\gamma e$ 程度変化

# pair echo

Plaga 95  
Cheng & Cheng 96  
Dai & Lu 02  
KT et al. 07, 08, 09

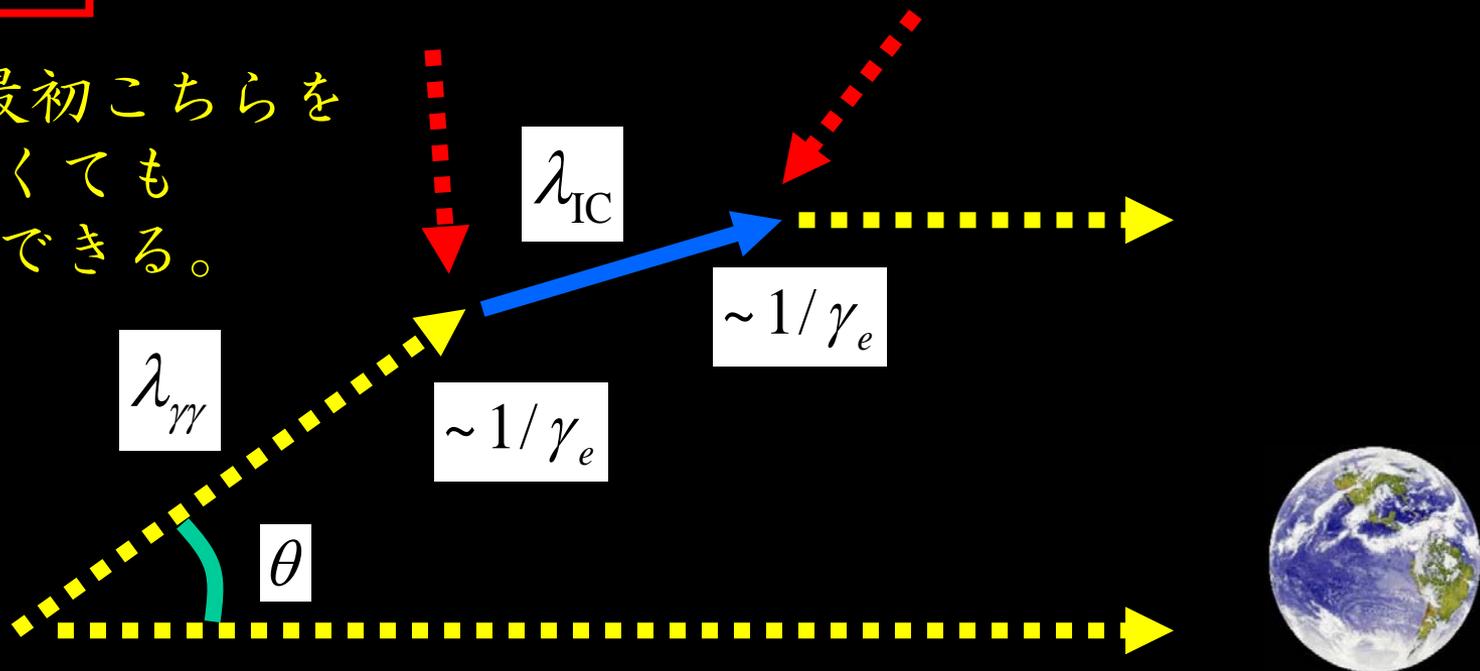
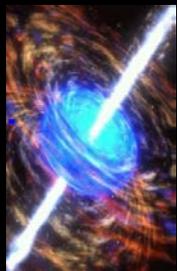


GRB, AGN



# 遅延時間

primaryは最初こちらを  
向いていなくても  
地球に到達できる。



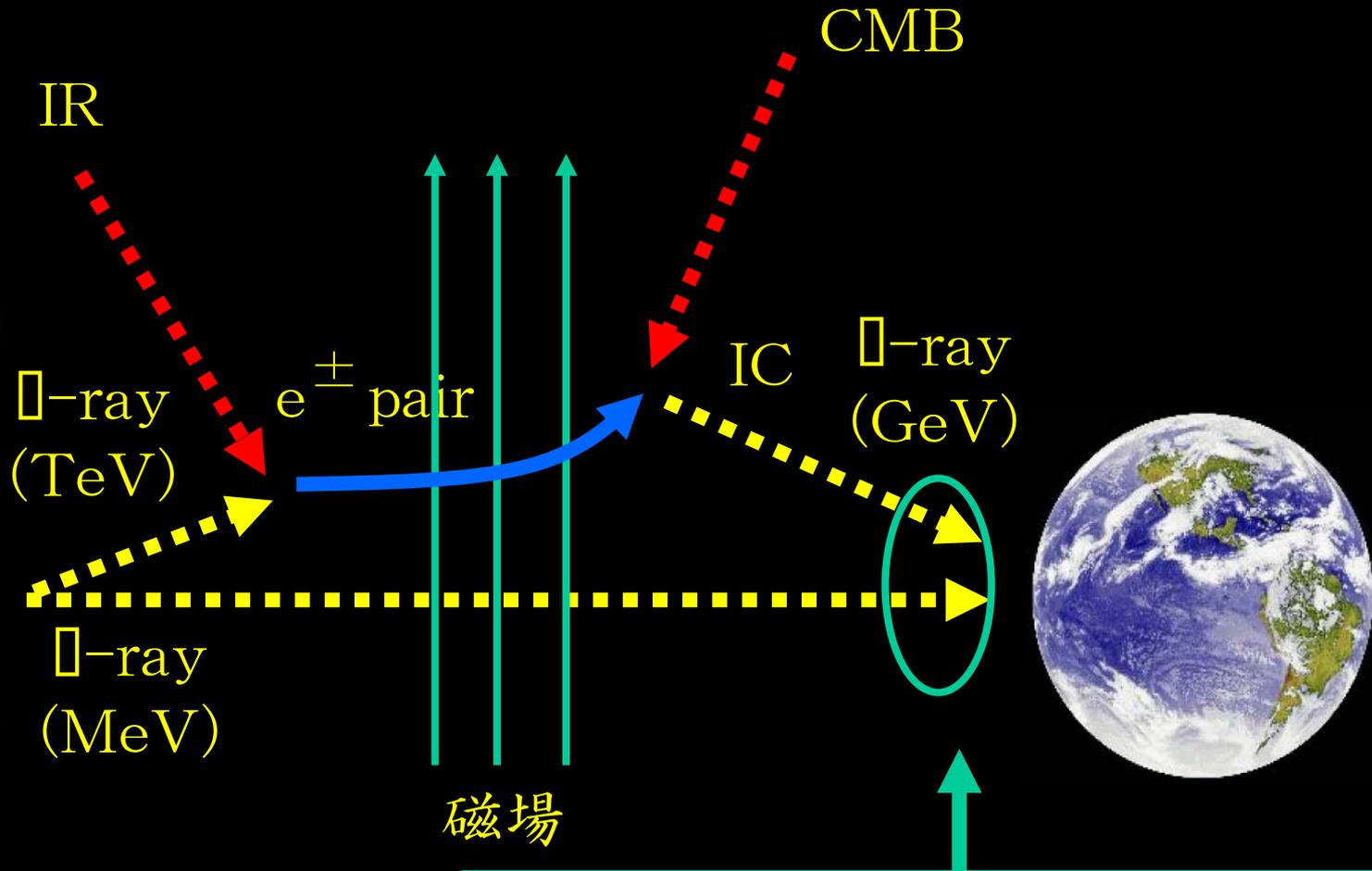
$$\Delta t_{\text{delay}} = (1 - \cos(1/\gamma_e))(\lambda_{\gamma\gamma} + \lambda_{IC}) \approx \frac{1}{2\gamma_e^2}(\lambda_{\gamma\gamma} + \lambda_{IC})$$

遅延時間は平均自由行程と曲がり角によってきまる。  
(両方ともエネルギーに依存する。)

# pair echo with magnetic field



GRB, AGN



磁場によって遅延時間が増加。  
遅延時間に磁場の情報あり。

# 特徴的な数字①

IR

$$E_{\text{IR}} = 0.1\text{eV} \left( \frac{E_\gamma}{1\text{TeV}} \right)^{-1}$$

CMB

$$E_{\text{pa}} = 0.6\text{GeV} \left( \frac{E_\gamma}{1\text{TeV}} \right)^2$$

$$E_\gamma = 1\text{TeV}$$

$$\lambda_{\gamma\gamma} = 2\text{Mpc} \left( \frac{n_{\text{IR}}}{1\text{cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

$$\lambda_{\text{IC}} = 0.4\text{Mpc} \left( \frac{E_\gamma}{1\text{TeV}} \right)^{-1}$$

$$\Delta t_B = 0.5\text{ day} \left( \frac{E_{\text{delay}}}{1\text{GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{B}{10^{-20}\text{G}} \right)^2$$



## 特徴的な数字②

$$E_\gamma = 1\text{TeV}$$

- TeV blazar
- GRBでは未観測だが理論的には十分あり得る

$$E_{\text{pa}} = 0.6\text{GeV} \left( \frac{E_\gamma}{1\text{TeV}} \right)^2$$

- Fermiのエネルギー領域
- もう少し高ければ地上チェレンコフ望遠鏡の領域

$$\Delta t_B = 0.5 \text{ day} \left( \frac{E_{\text{pa}}}{1\text{GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{B}{10^{-20} \text{ G}} \right)^2$$

- 大きい (小さい) 磁場には高い (低い) エネルギーで

## 特徴的な数字③

$$\lambda_{\gamma\gamma} = 2\text{Mpc} \left( \frac{n_{\text{IR}}}{1\text{cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

- ・ 親銀河を抜け出すのに十分な大きさ

$$\lambda_{\text{IC}} = 0.4\text{Mpc} \left( \frac{E_{\gamma}}{1\text{TeV}} \right)^{-1}$$

- ・ 上と合わせても反応はlocal

(もちろん個々の場合によるが) この方法では  
ボイド領域の磁場を探索できる可能性が高い。

# 理想的な状況

この磁場を観測

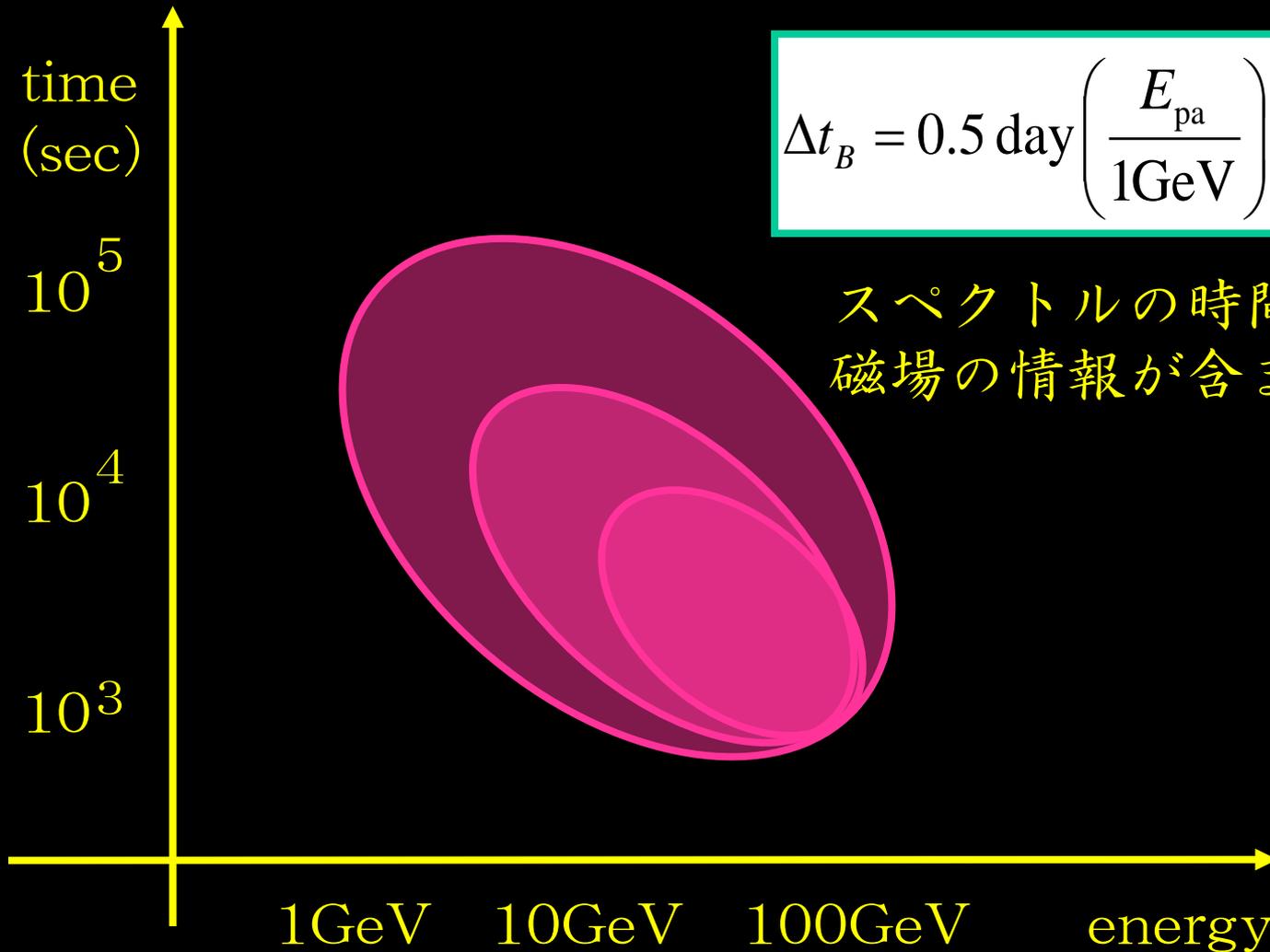


GRB・AGN

~ 10Mpc



# 観測量

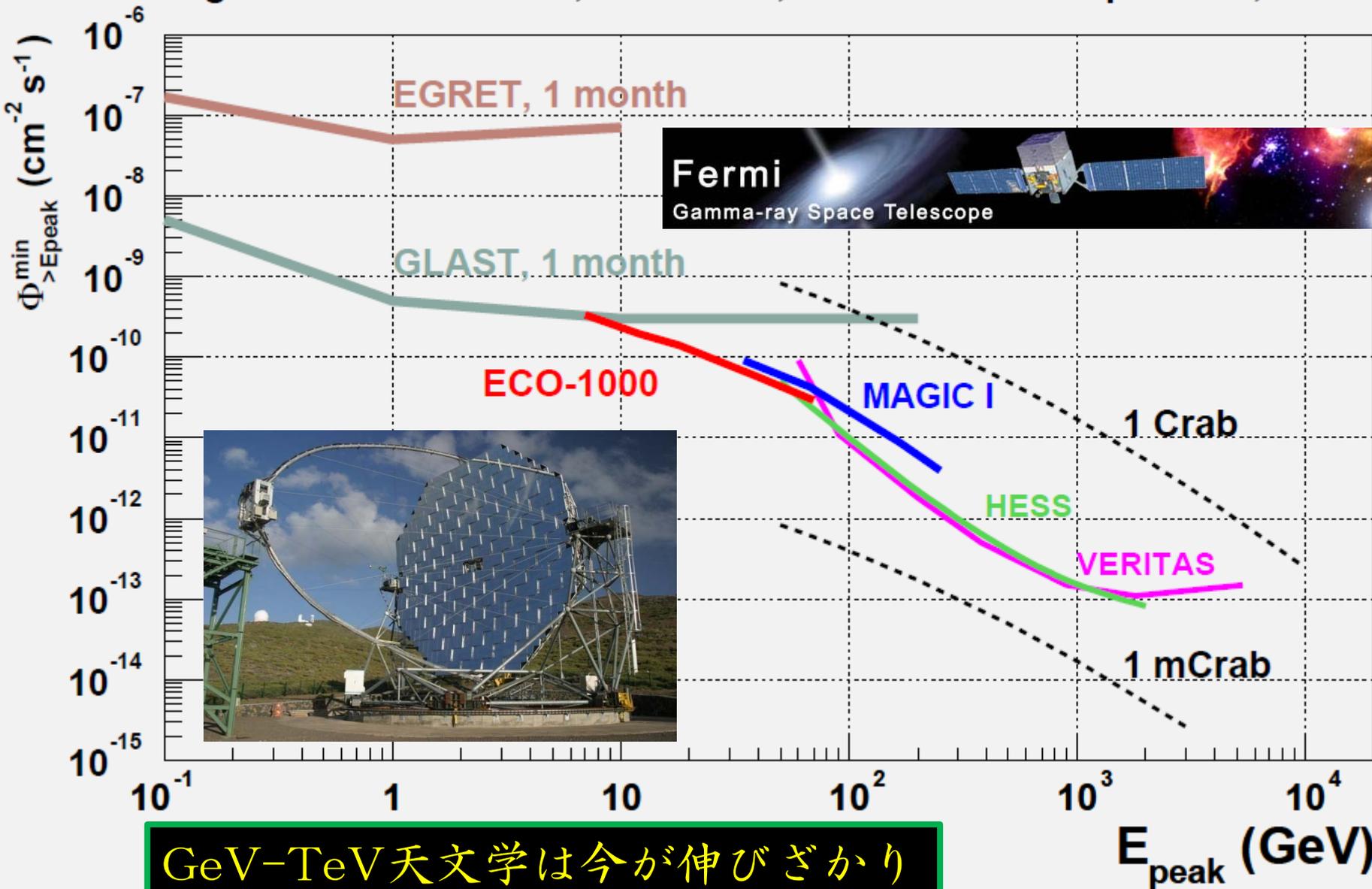


$$\Delta t_B = 0.5 \text{ day} \left( \frac{E_{\text{pa}}}{1 \text{ GeV}} \right)^{-2} \left( \frac{B}{10^{-20} \text{ G}} \right)^2$$

スペクトルの時間発展に  
磁場の情報が含まれている

# $\gamma$ 線天文学

Integral flux sensitivities,  $5\sigma$  in 50 h,  $E^{-2.6}$  diff. source spectrum,  $\theta < 30^\circ$



GeV-TeV天文学は今が伸びざかり

$E_{peak}$  (GeV)

# セットアップ

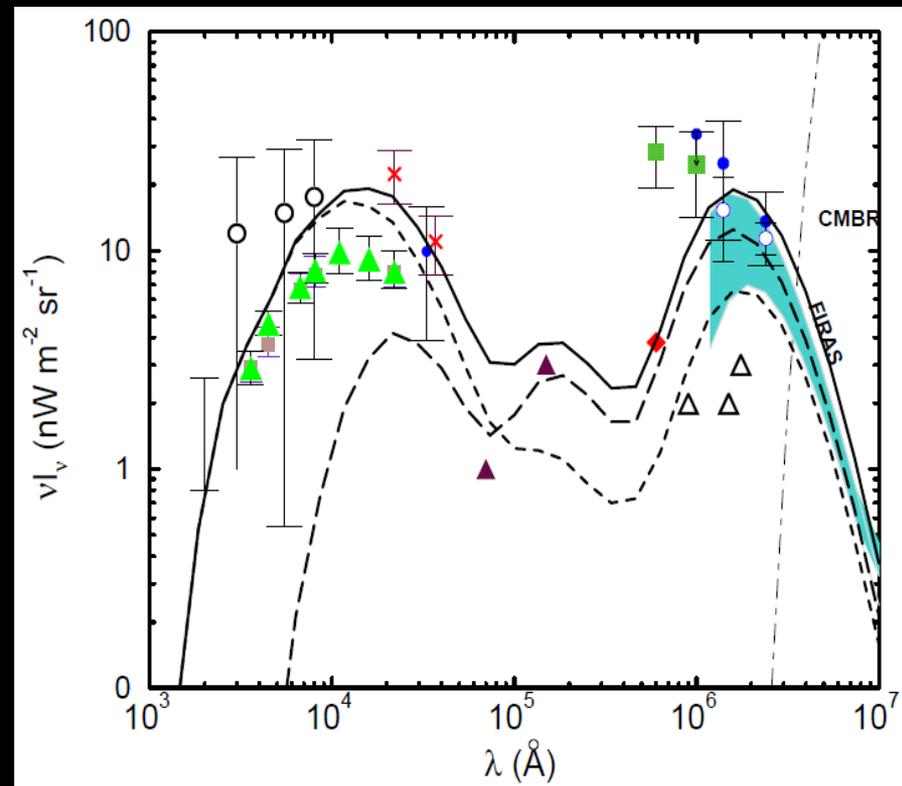
primary放射

$$dN_{\gamma}/dE_{\gamma} \propto E_{\gamma}^{-2.2}, \text{ for } 0.1 \text{ TeV} < E_{\gamma} < E_{\text{cut}} = 10 \text{ TeV}$$

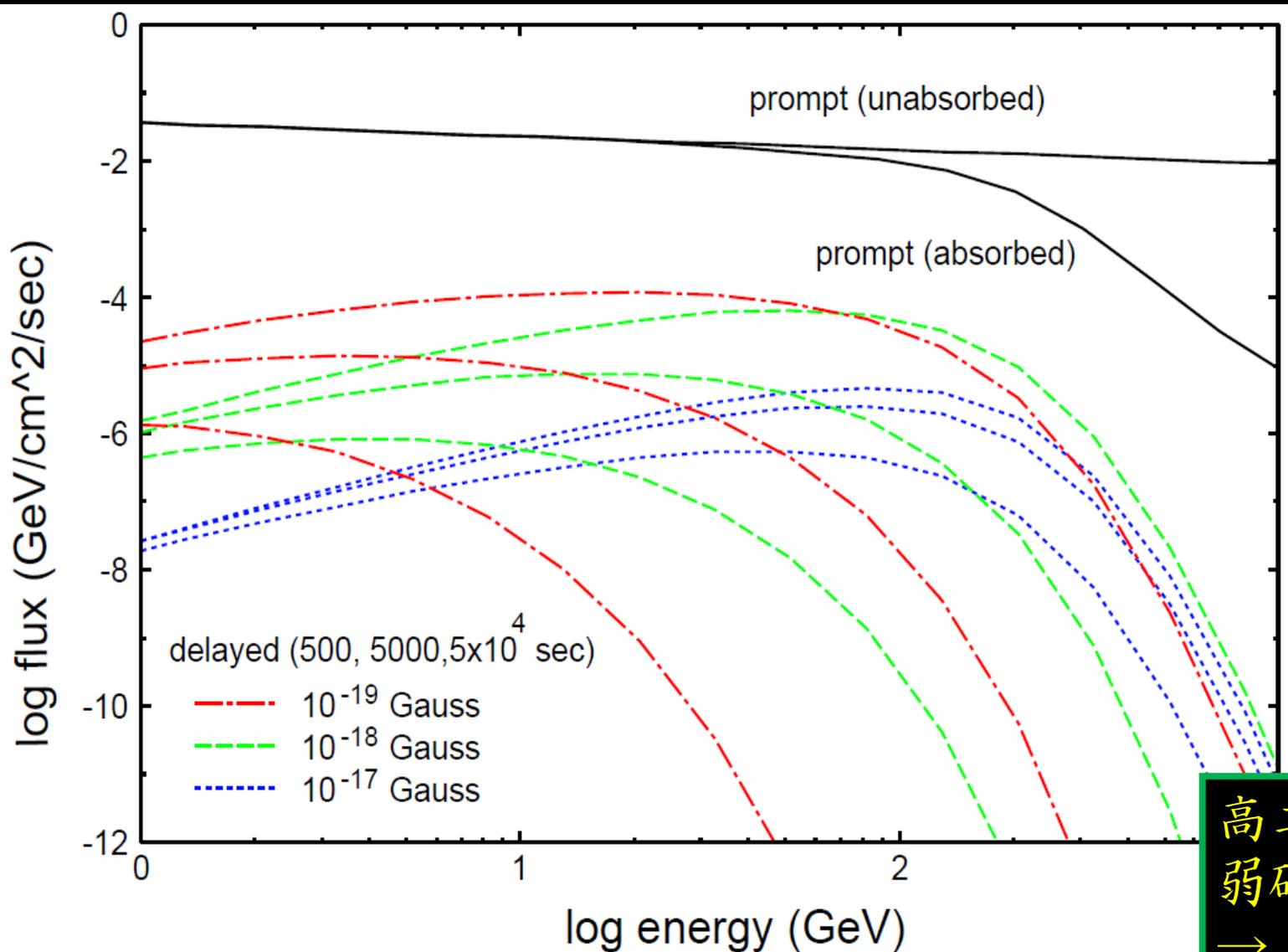
$$E_{\gamma,[0.1,10]}^{\text{iso}} = 3 \times 10^{53} \text{ erg}$$

CIB model

“best fit” model  
(“low SFR” model)  
Kneiske et al. 02, 04

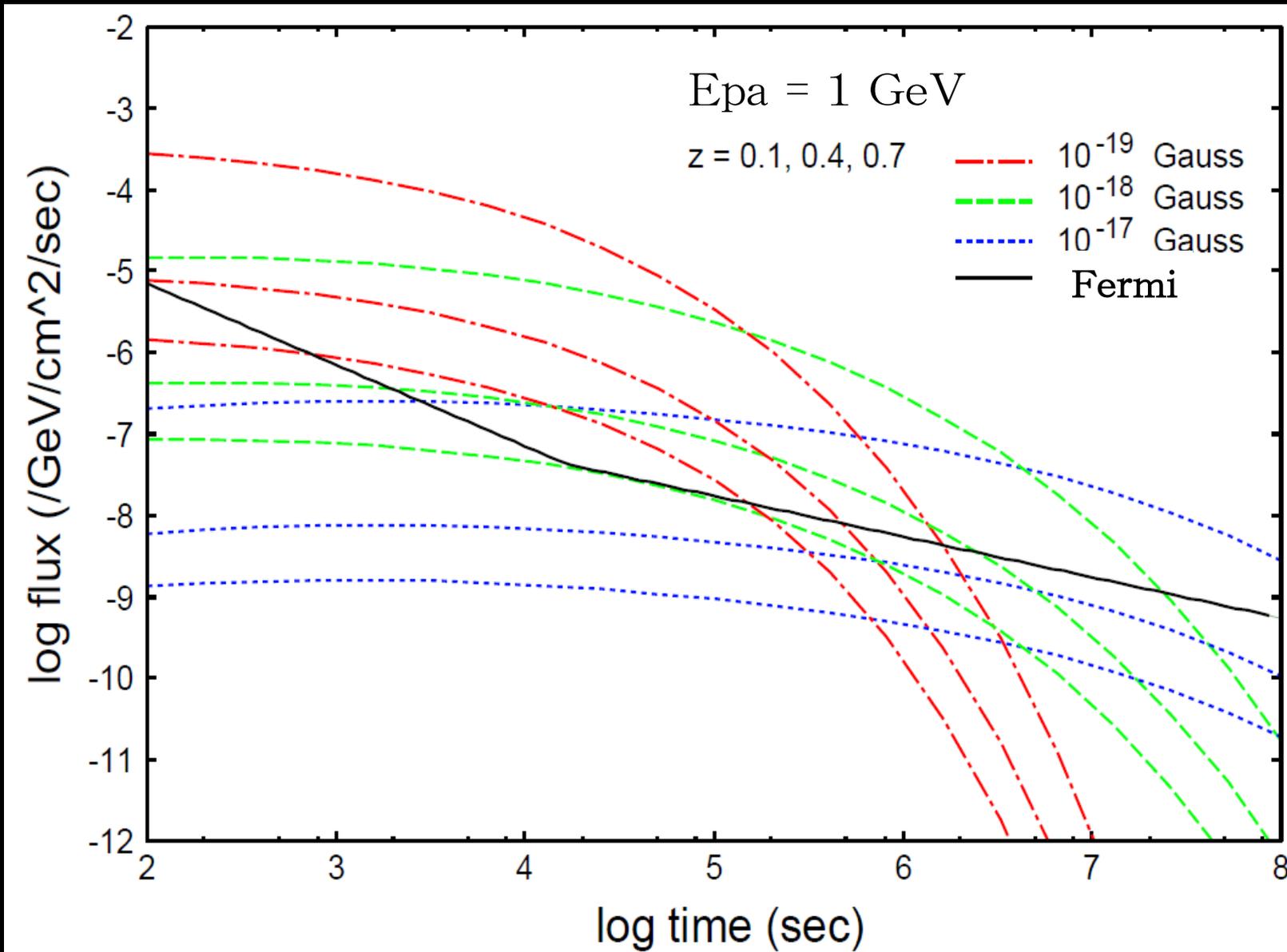


# pair echo スペクトル

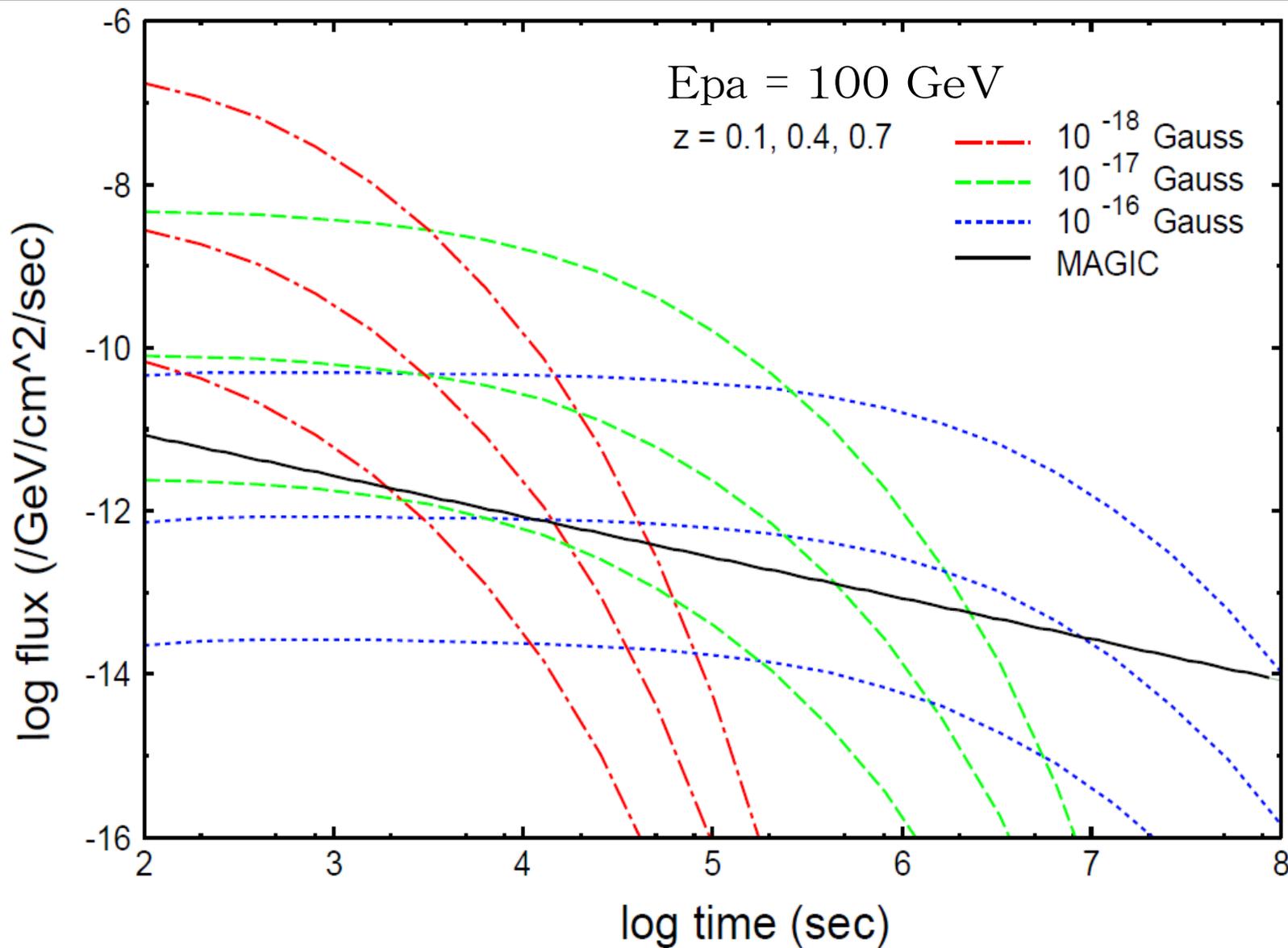


高エネルギー  
弱磁場  
→ 速く落ちる

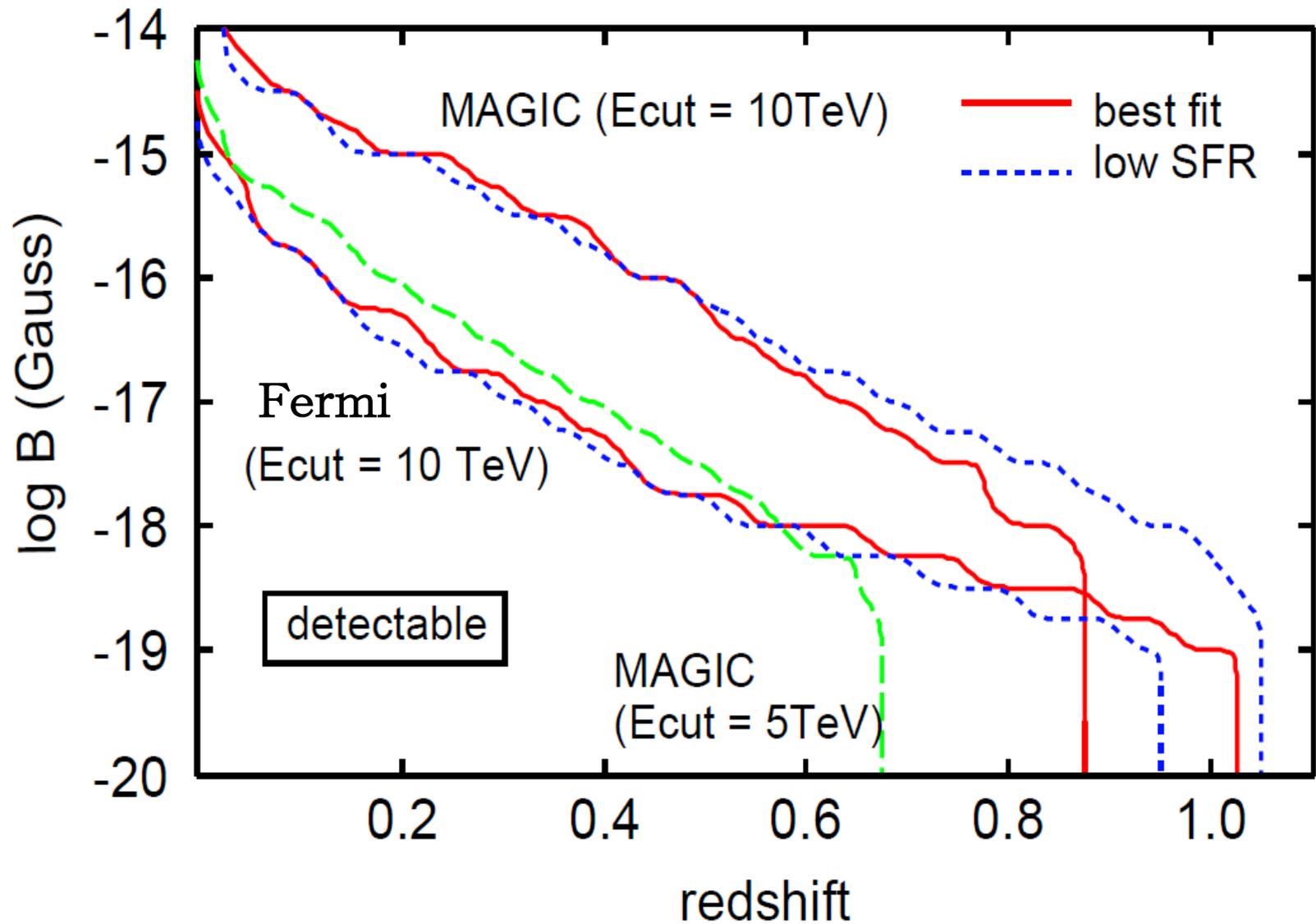
# light curve at 1 GeV & Fermi



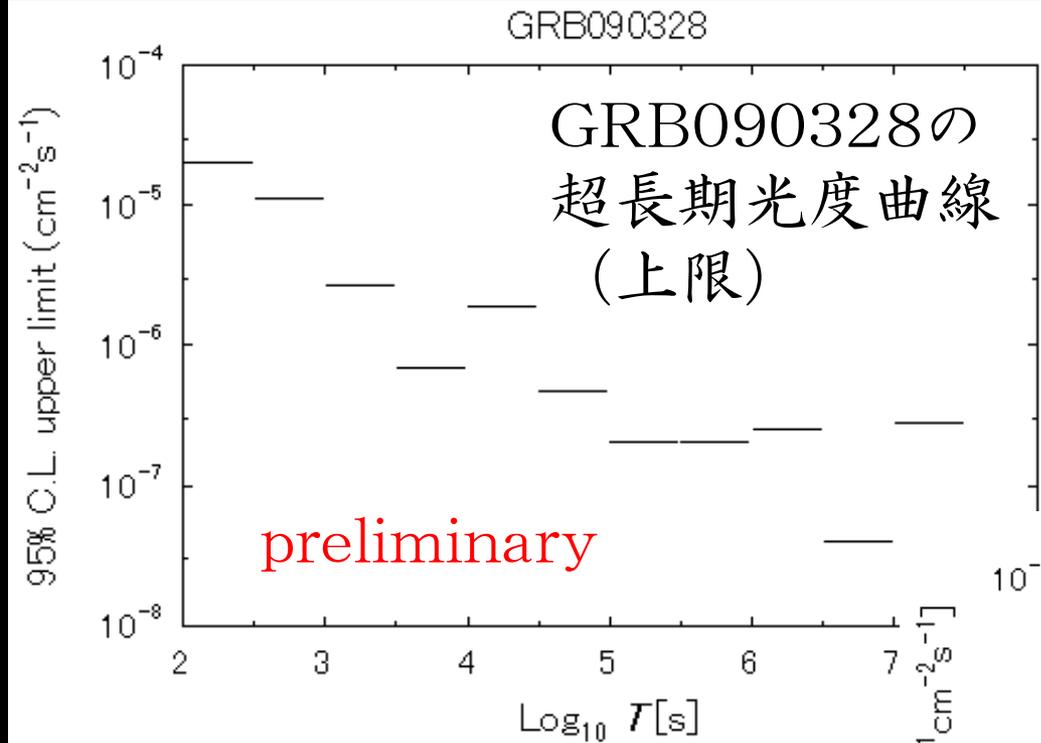
# light curve at 100 GeV & MAGIC



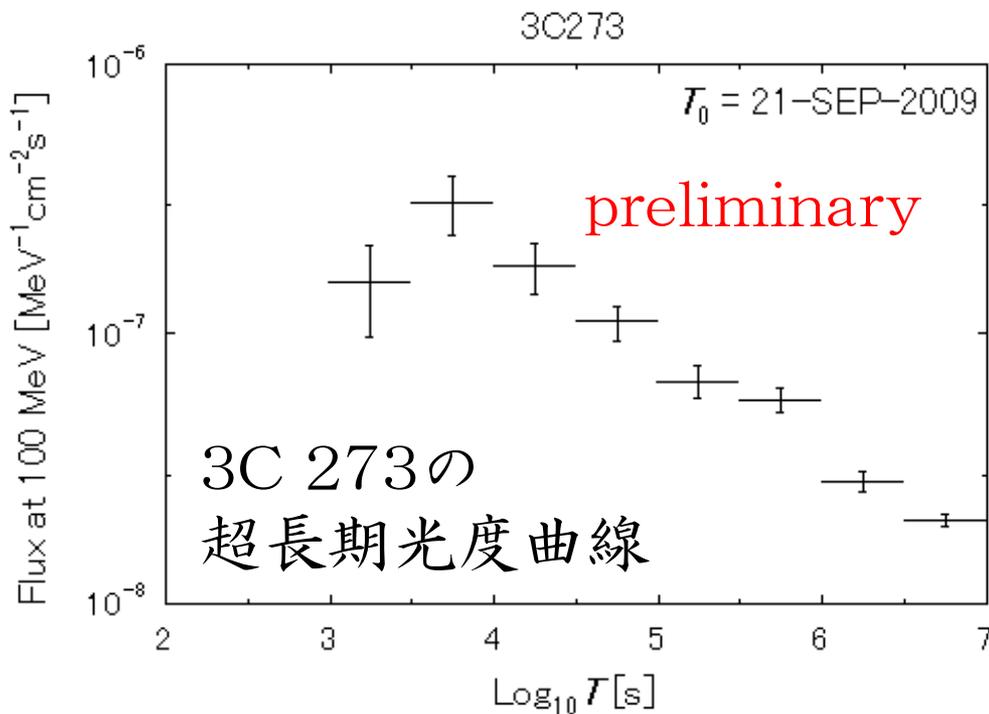
# pair echoの観測可能性



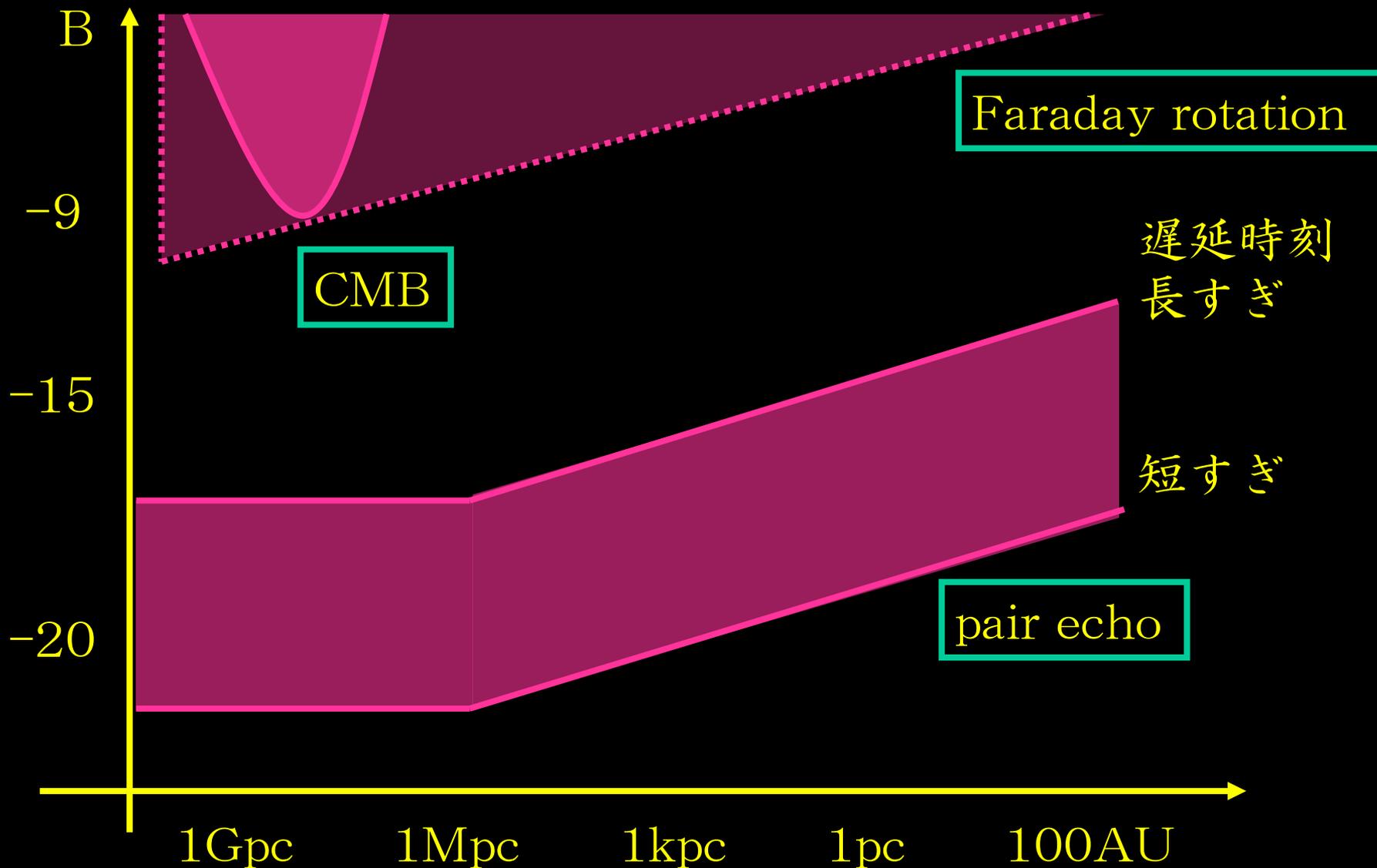
# 実現に向けて



森正樹教授（立命館）の  
協力を得て、Fermiデータを  
解析中。



# 磁場への制限 (予想)



# 磁場観測まとめ

- ・ 高エネルギー天体からのpair echoを用いた微弱な磁場の検出
- ・ TeV  $\gamma$  線
  - + EBL  $\rightarrow$  TeV電子・陽電子
  - + CMB  $\rightarrow$  GeV  $\gamma$  線
- ・ 対生成とICで経路が曲がる
  - $\rightarrow$  最初変な方向でも地球に到達できる
  - $\rightarrow$  遅延時間の発生
- ・  $10^{-17} \sim 10^{-20}$  Gを検出可能
- ・ GRBなら $z < 1$ の近いものを使う
- ・ TeVブレーザーは近くて場所もわかっているが定常放射が邪魔

# 宇宙磁場グランドシナリオ

## 宇宙初期に様々な磁場生成過程

- ・インフレーション
- ・密度ゆらぎ
- ・再イオン化
- ・構造形成

$10^{-20 \pm 5}$  Gaussを予言

## 磁場の行く末

- ・濃い領域 → 銀河の種磁場？
- ・薄い領域 → ボイド磁場として初期情報を保つ？
- 磁場によって宇宙初期の現象を探る

## 微弱磁場の観測

- ・ファラデー回転サーチ
- ・高エネルギー天体のpair echo

理論・観測の両面から宇宙磁場にアプローチ