

宇宙論的磁場の起源

高橋慶太郎
名古屋大学

2010年3月15日

@鹿児島大学

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
- ・ 起源は？
- ・ どうやって検証するのか？
- ・ 宇宙の歴史を磁場を通して探りたい

1、イントロダクション

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

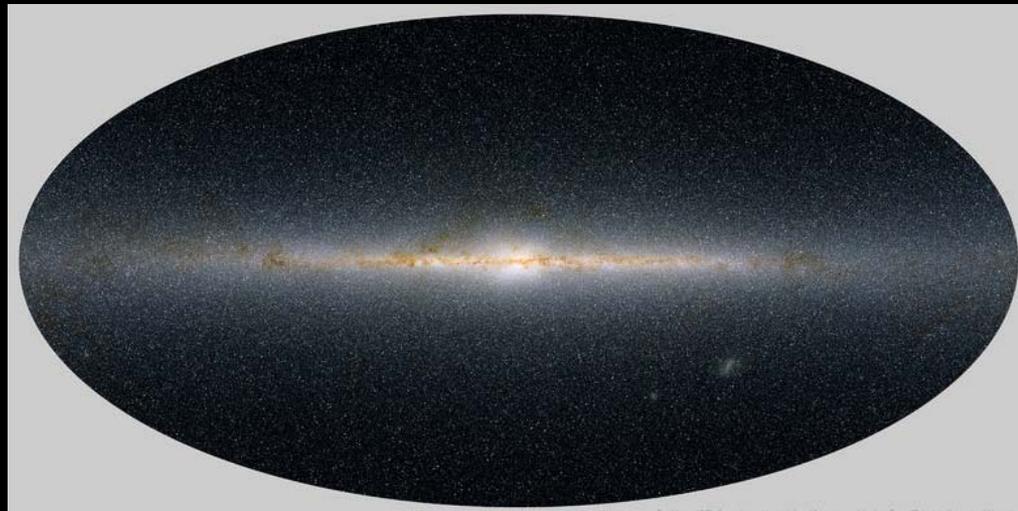
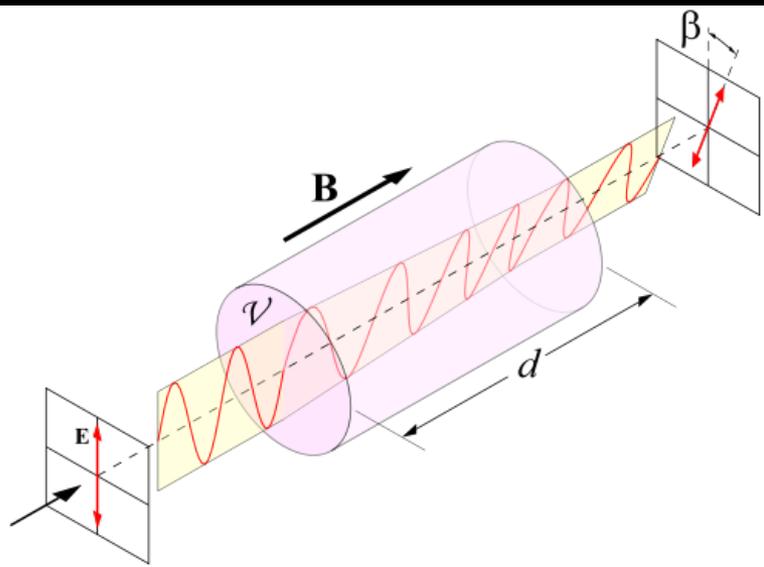
2、ファラデー回転

磁気を帯びたプラズマ中で偏光面が回転する現象

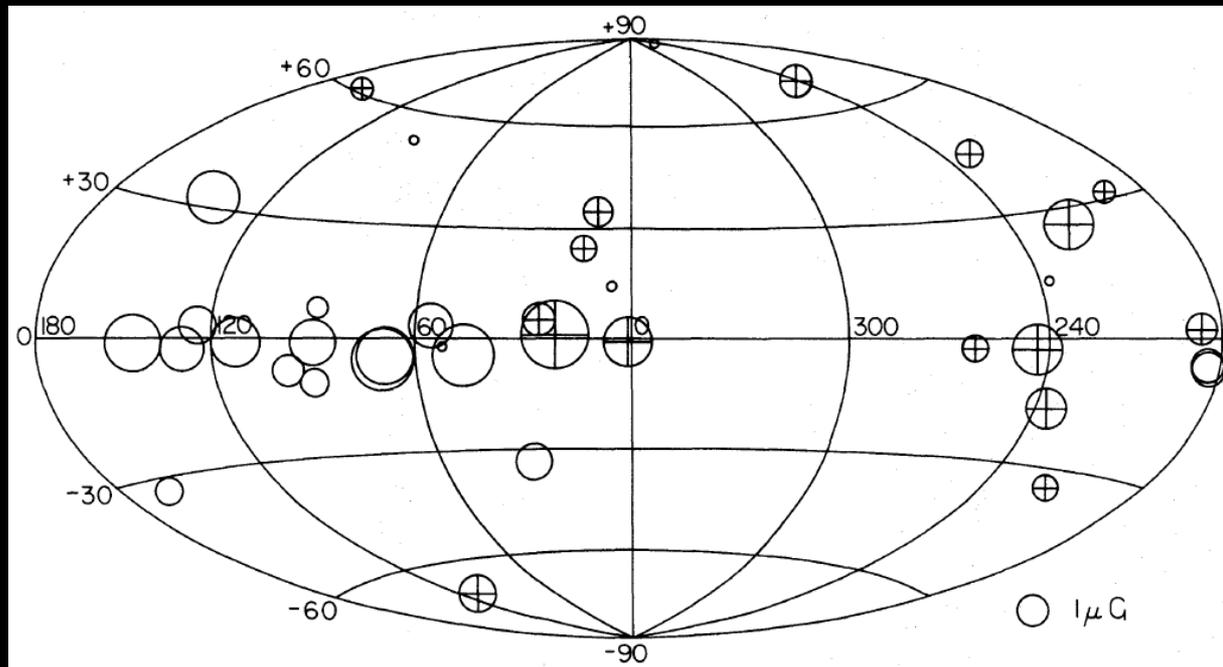
3、シンクロトロン

磁場中の荷電粒子が出す放射

ファラデー回転

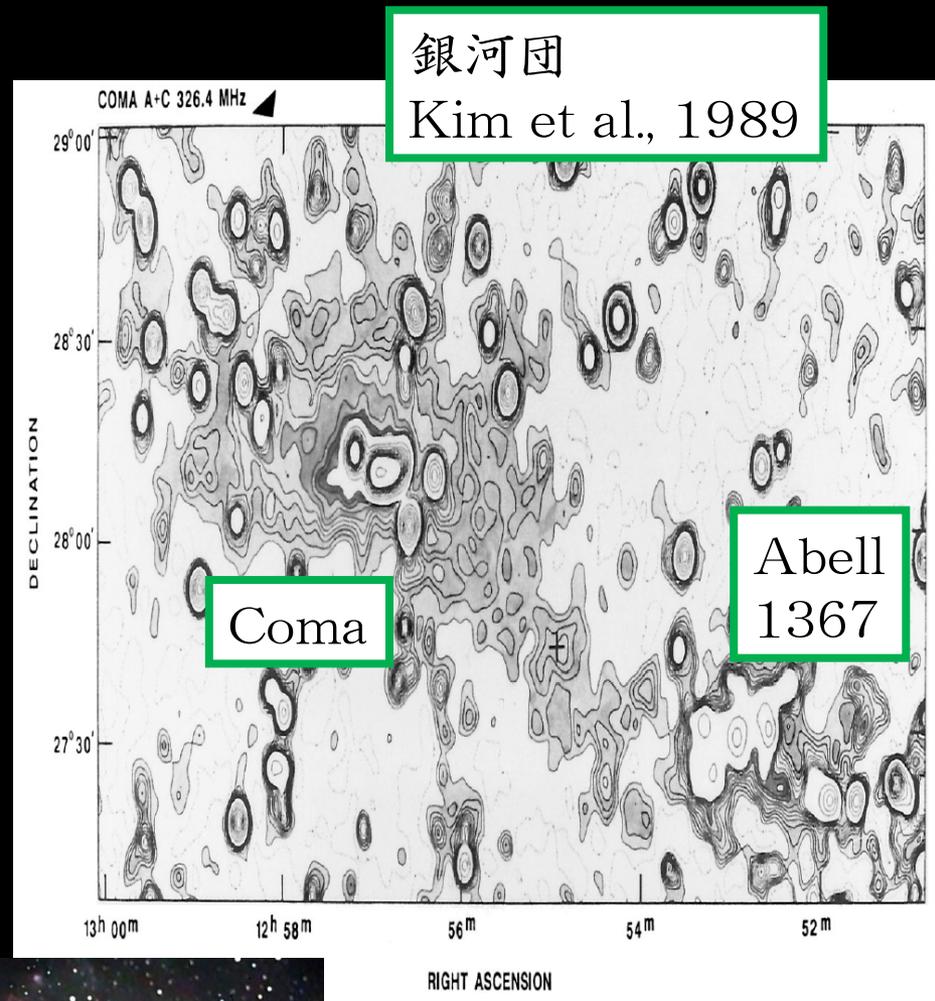
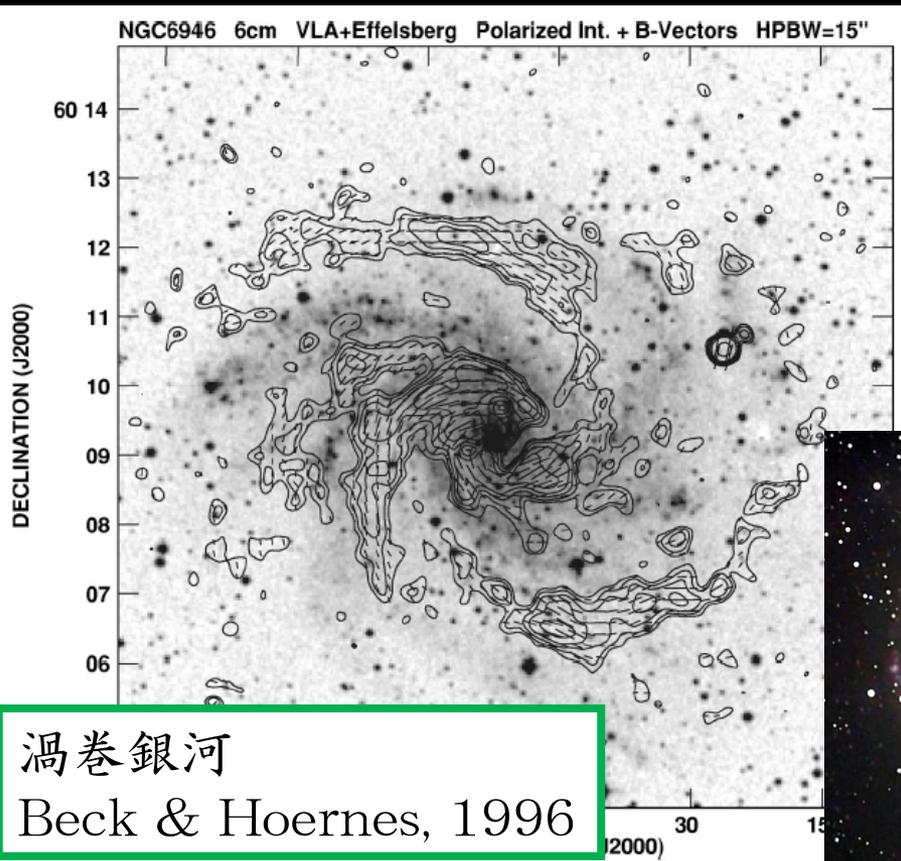


銀河系内の
パルサーの放射から
銀河系の磁場を探る
(Manchester 1974)



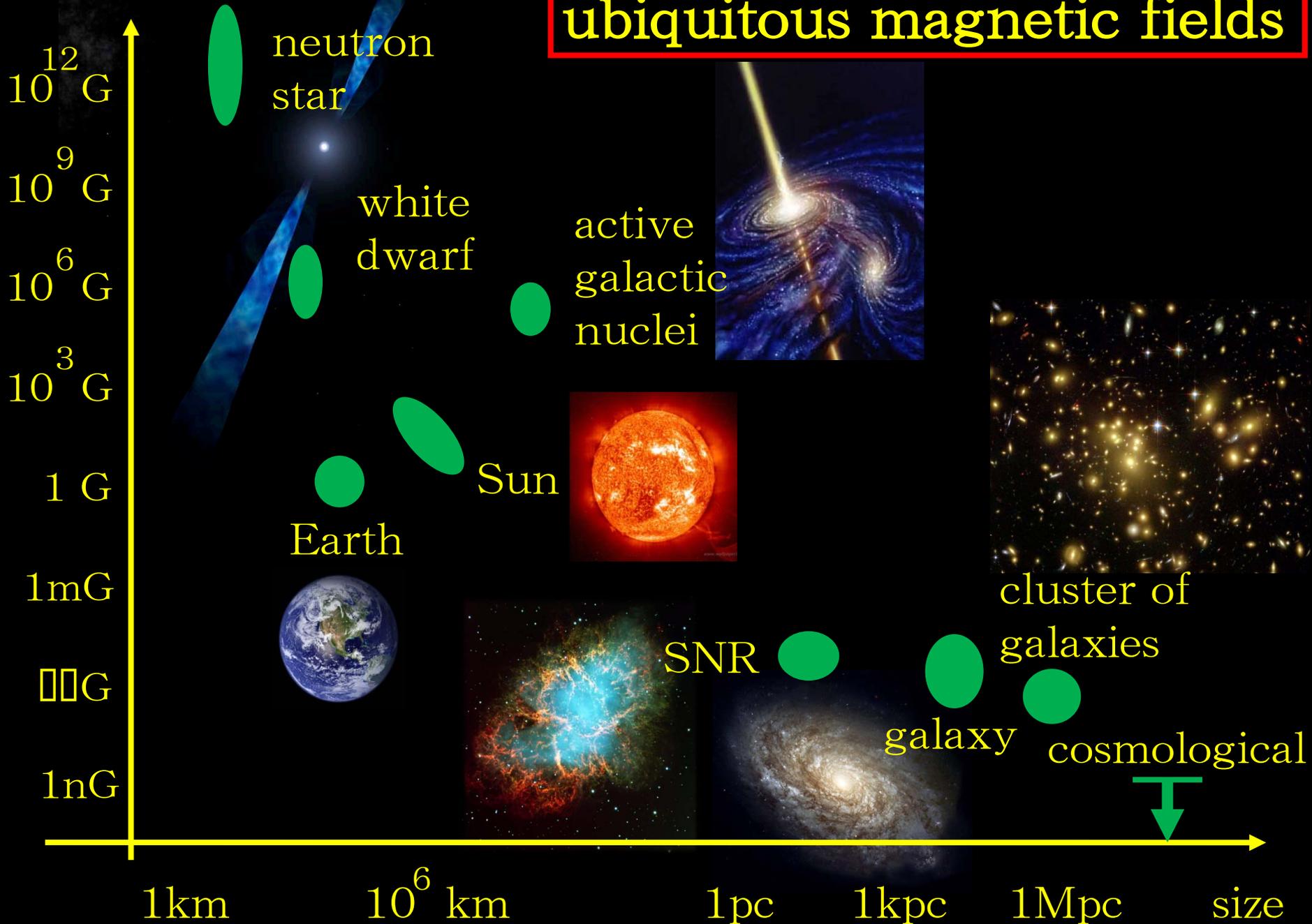
シンクロトロン

- ・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



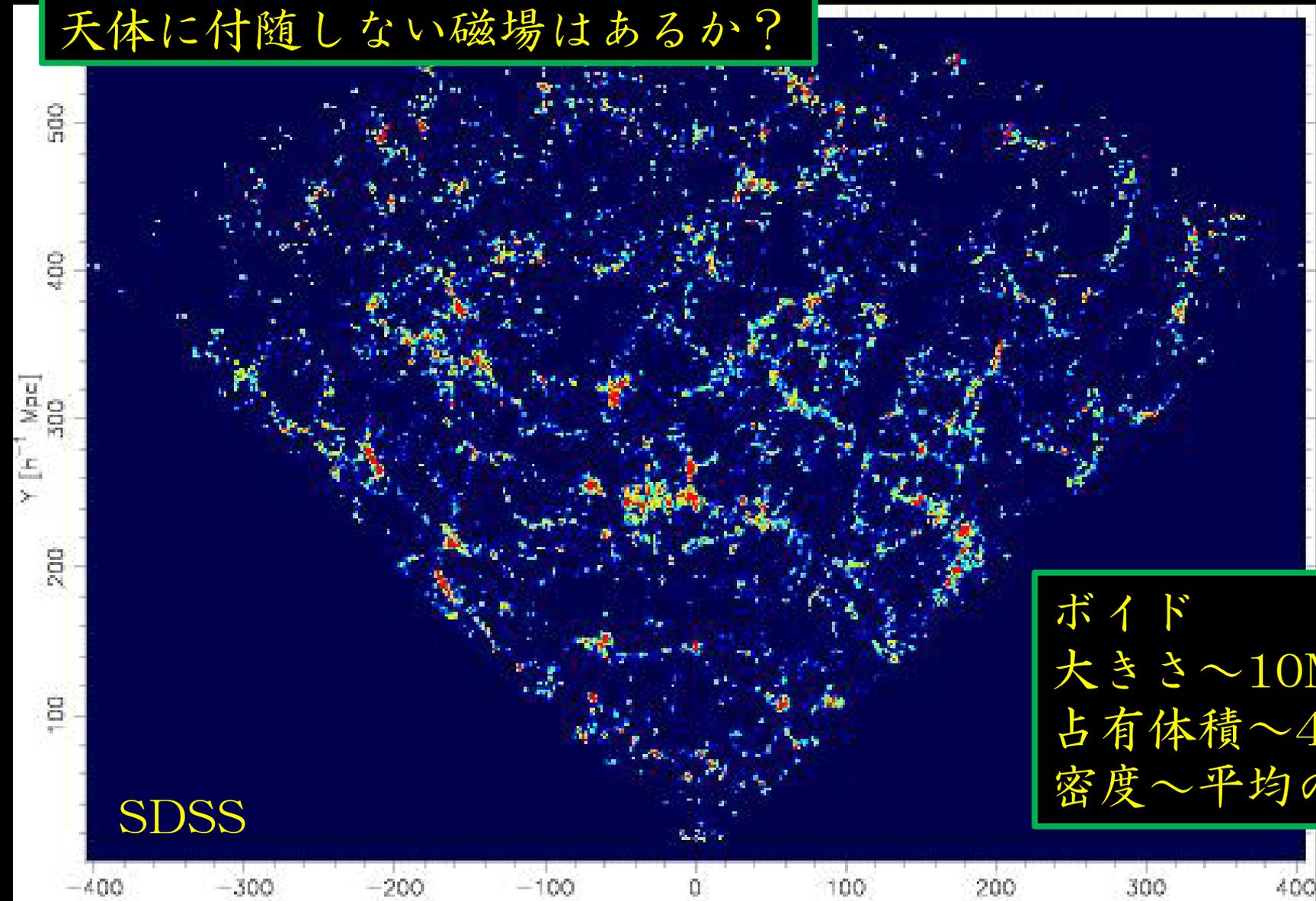
~ 1 μ G
→ ガスの運動
エネルギーと
同じくらい

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 ~ 10 Mpc
占有体積 $\sim 40\%$
密度 \sim 平均の 10%

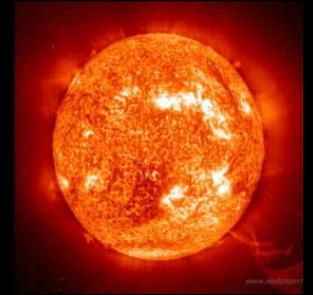
磁場の役割

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

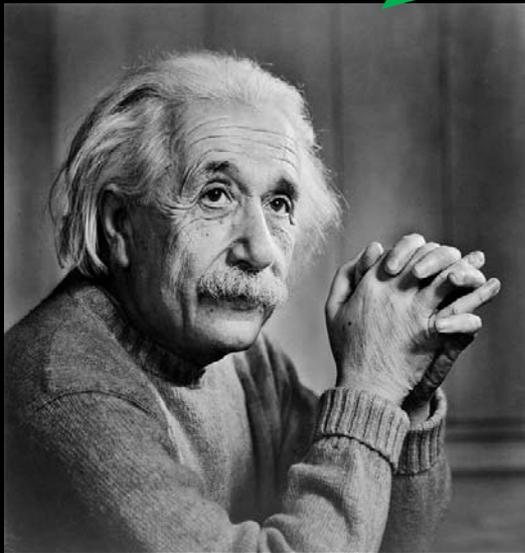
宇宙線の伝播：銀河系内への閉じ込め
超高エネルギー宇宙線

* 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

2、宇宙磁場の生成

宇宙の歴史

インフレーション

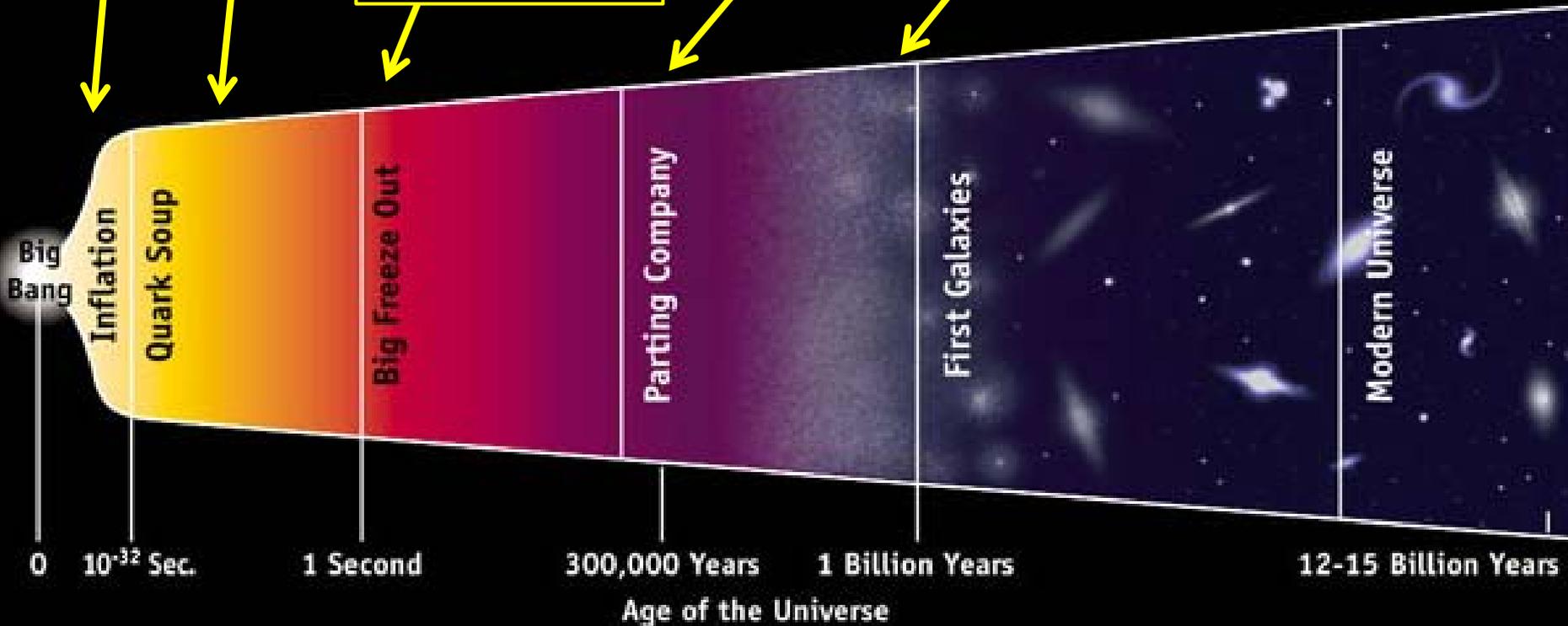
相転移

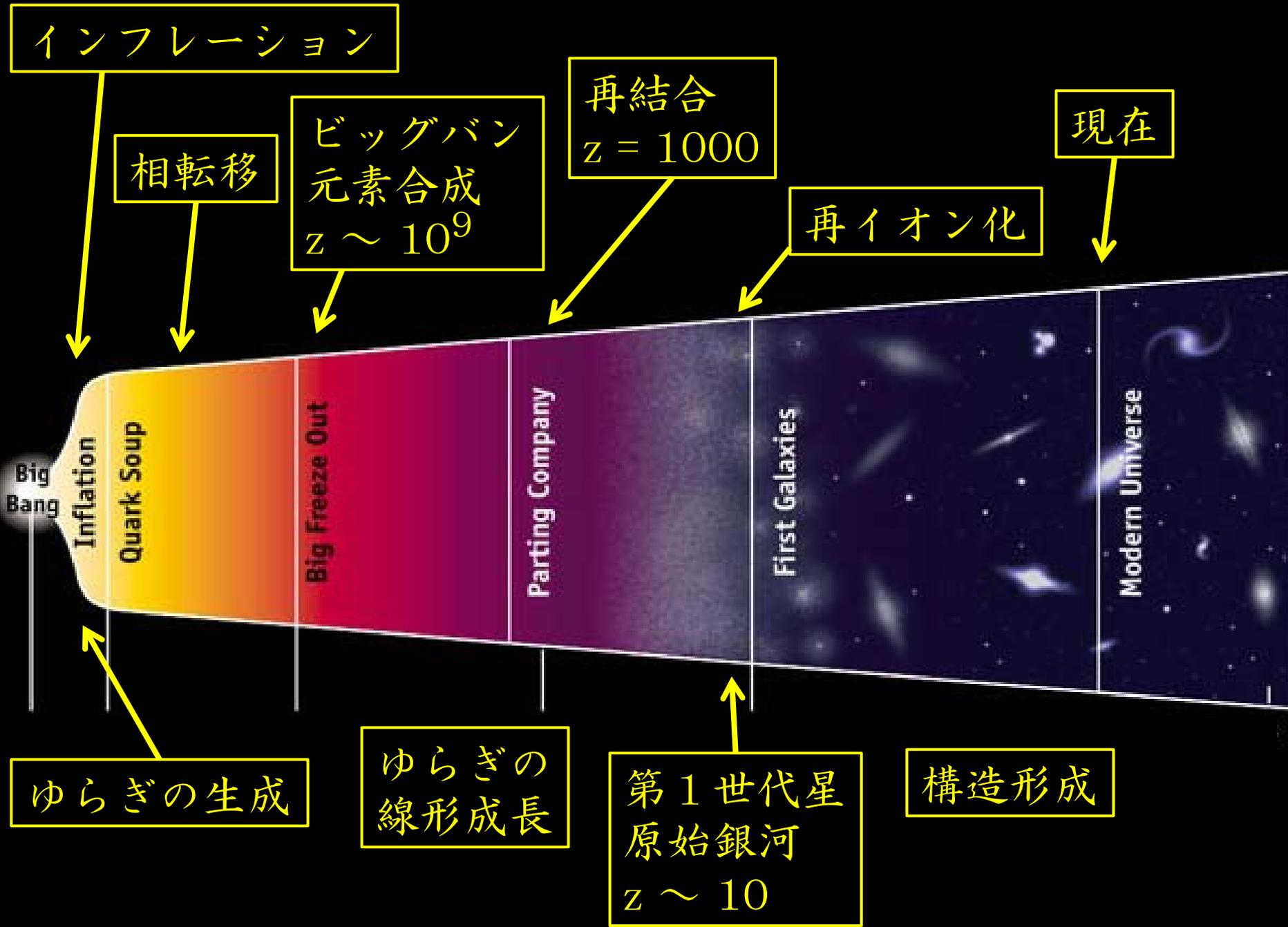
ビッグバン
元素合成
 $z \sim 10^9$

再結合
 $z = 1000$

再イオン化

現在

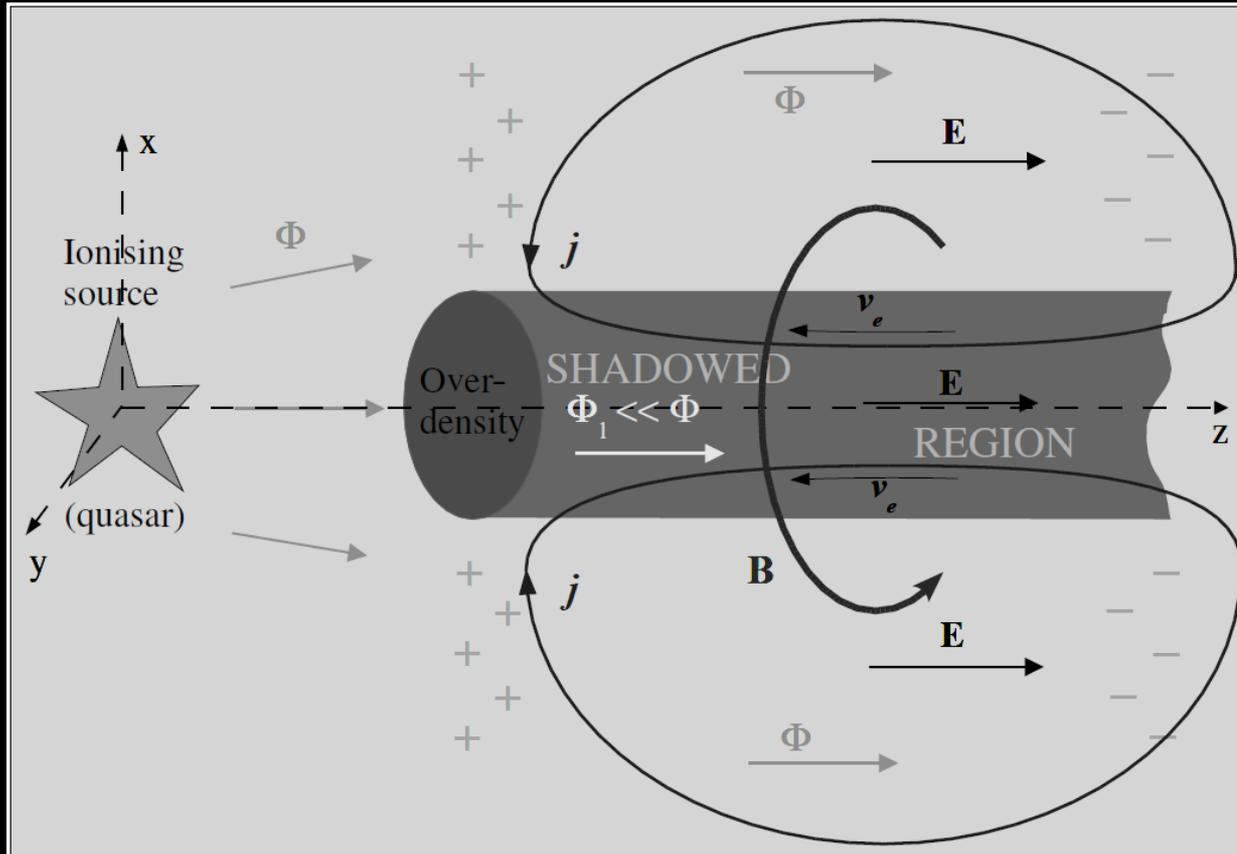




再イオン化による磁場生成

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

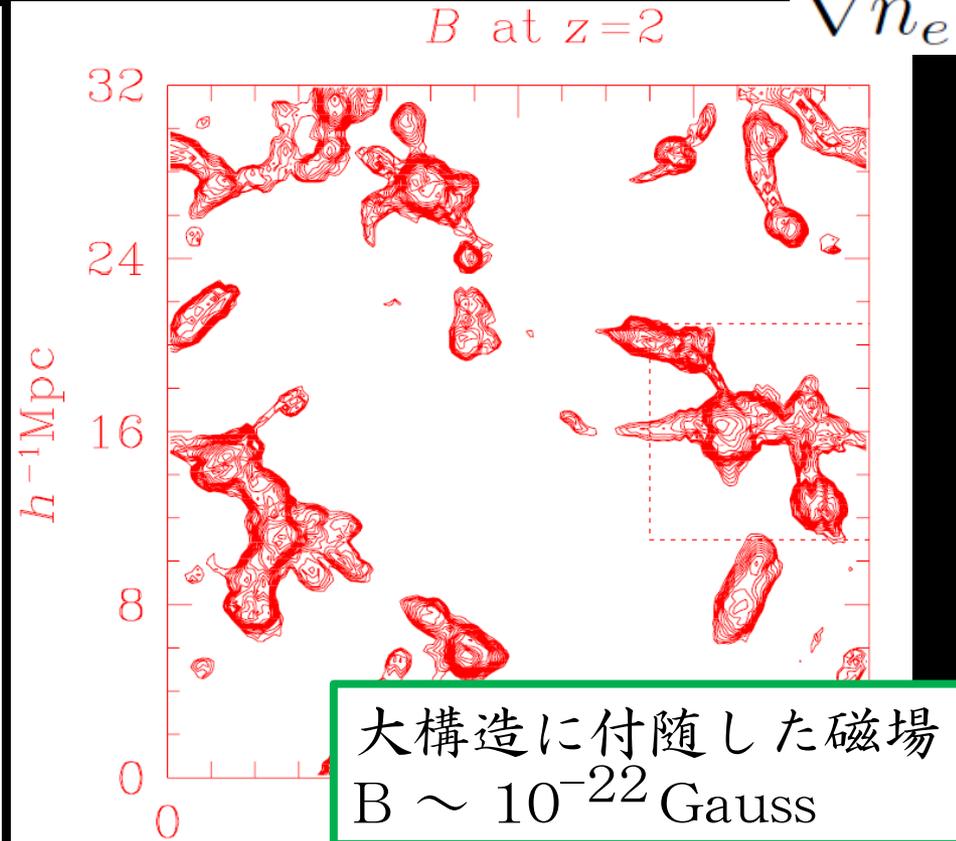
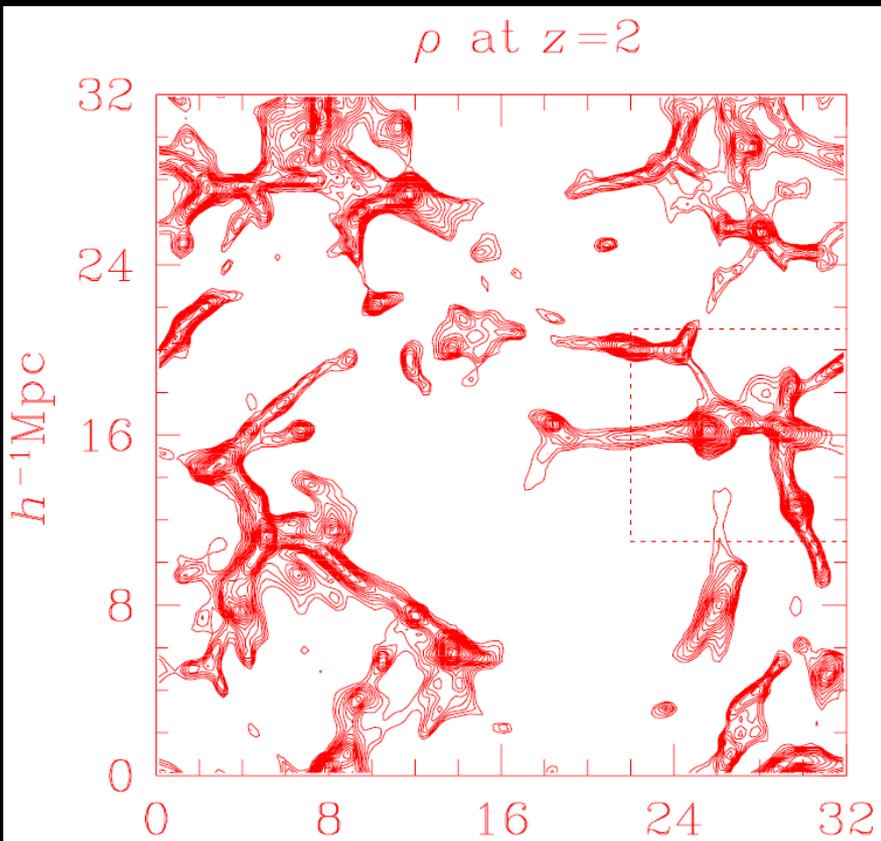
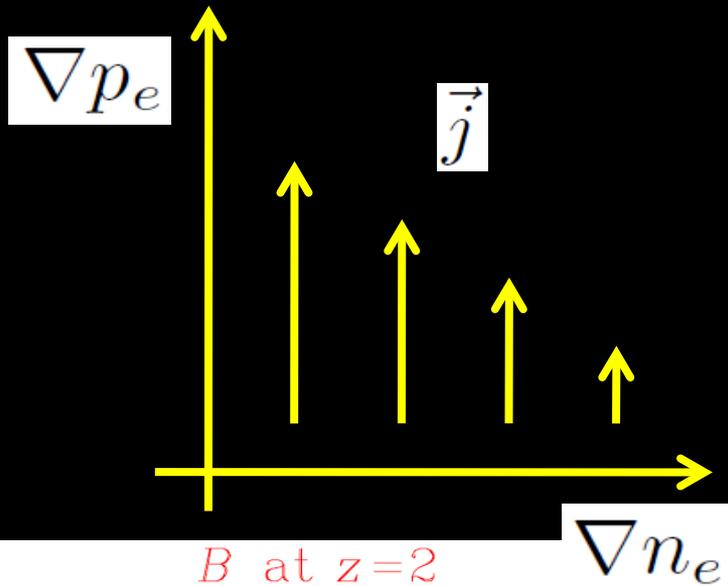


再イオン化自体が
まだあまり理解
されていないので
磁場の評価にも
不定性があるが
 10^{-18} Gauss
くらい?
(我々も取組中)

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

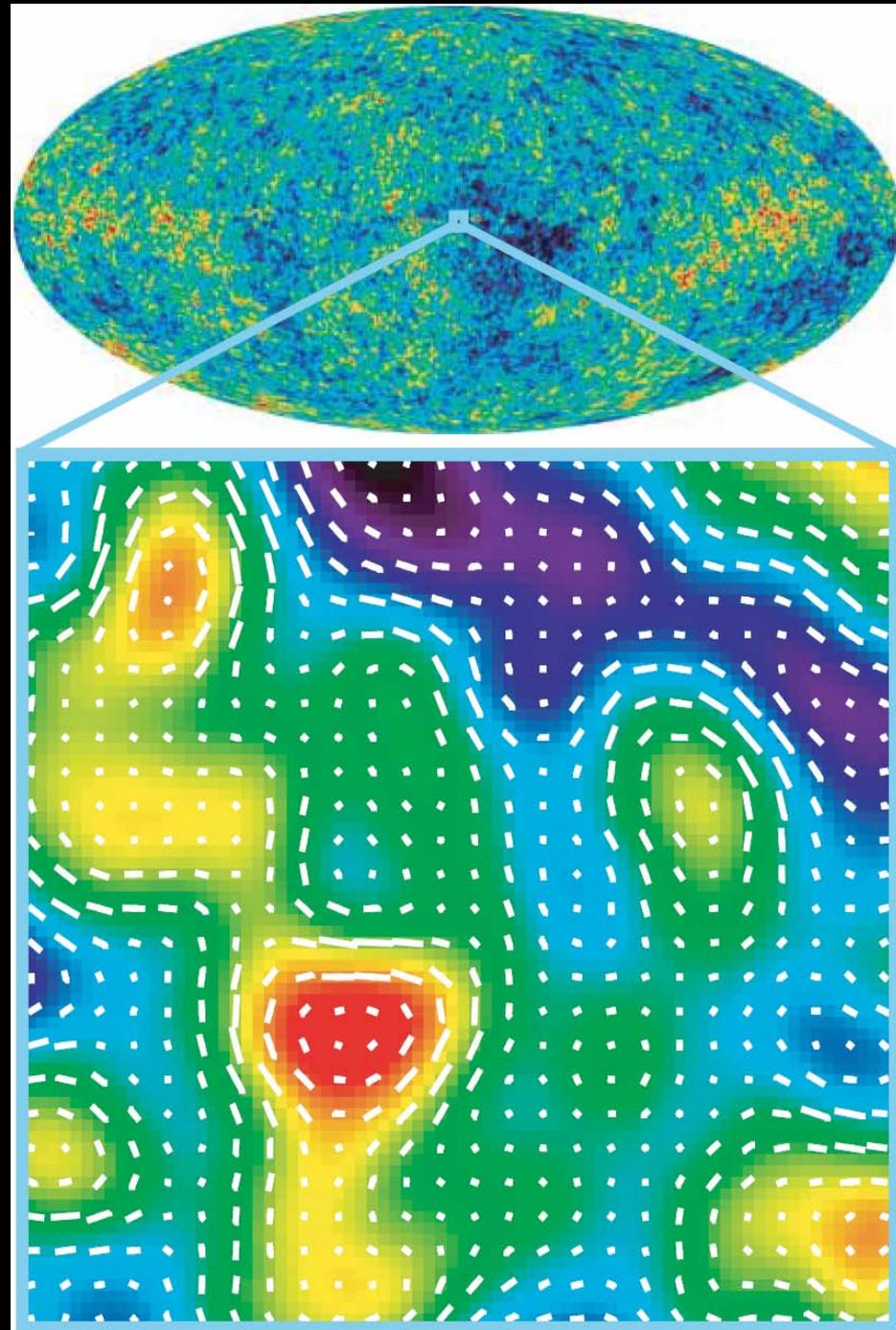


密度ゆらぎによる 磁場生成①

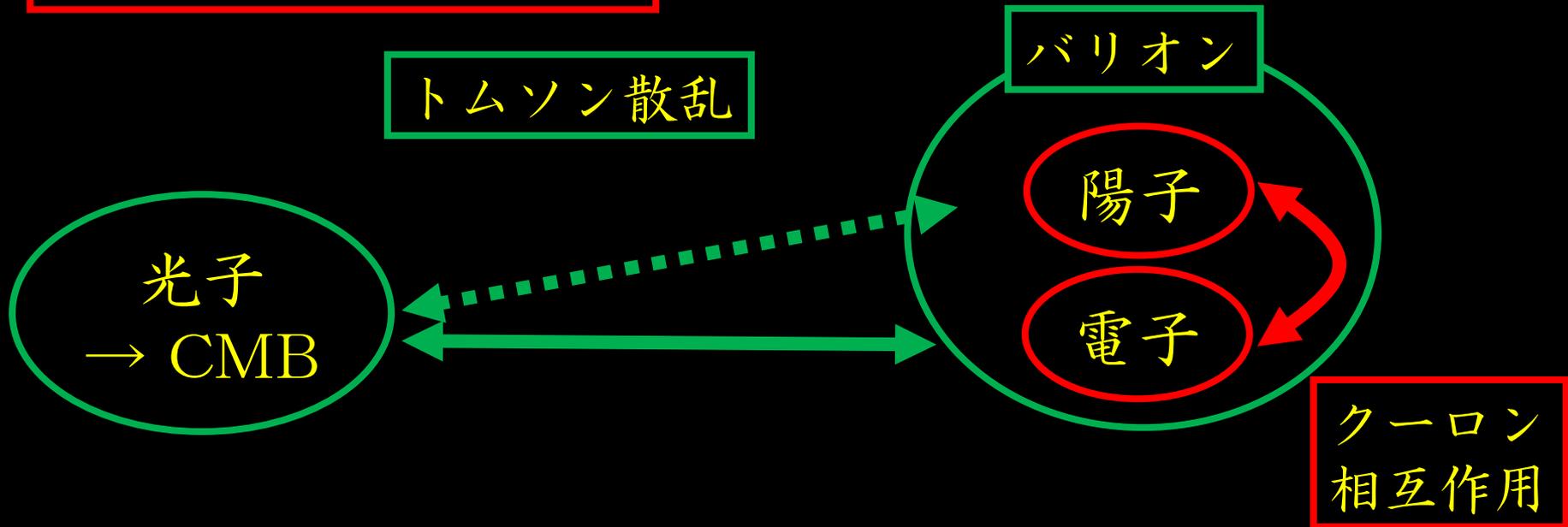
KT, Ichiki, Sugiyama, 2005~

宇宙初期のプラズマの
ゆらぎから磁場が生成

- ・ CMBと同じゆらぎから生成されるため物理的不定性がとても小さい
- ・ CMBと相関する磁場
- ・ インフレーション
+ 宇宙論的摂動論



密度ゆらぎによる 磁場生成②



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…

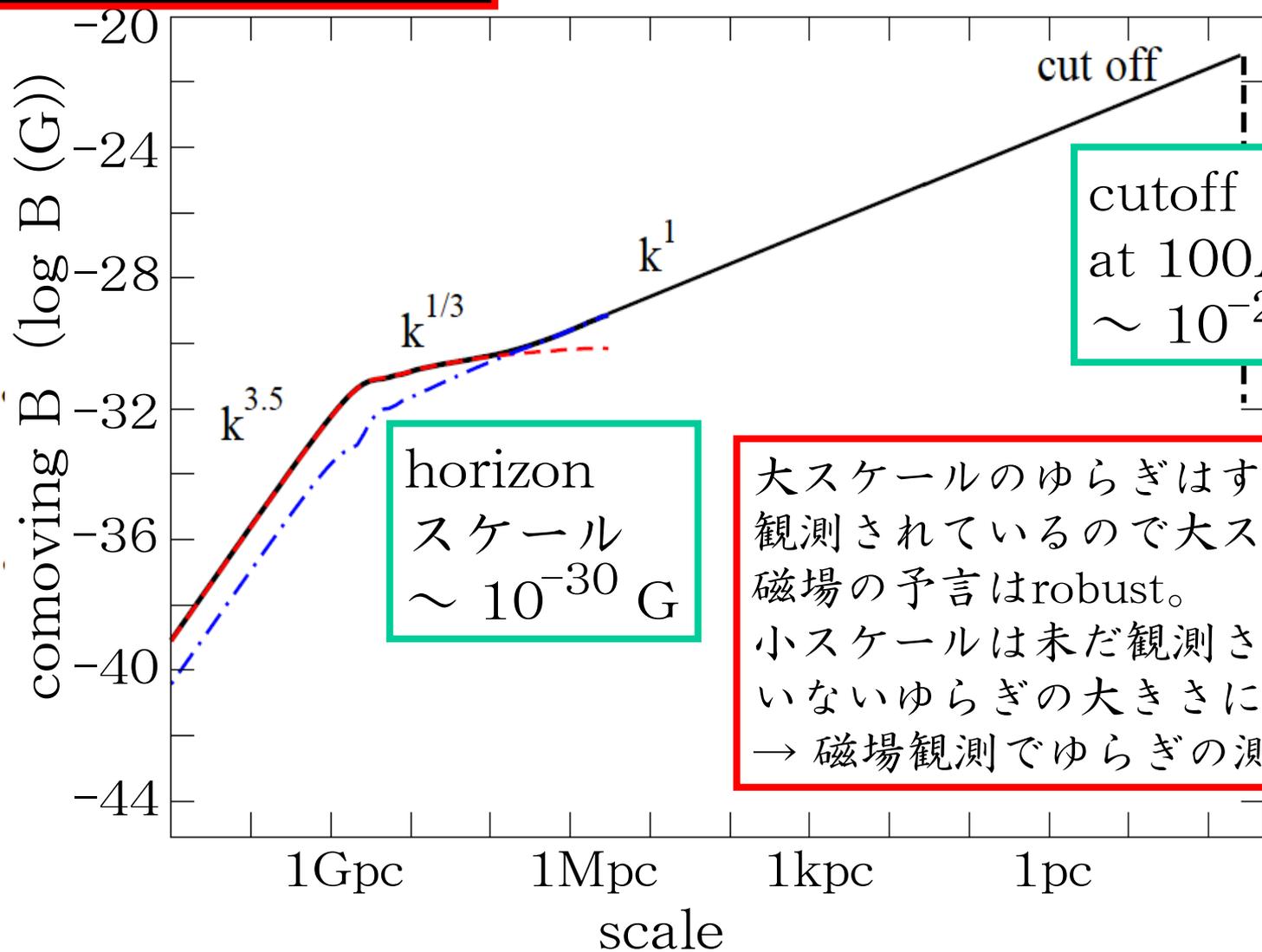
トムソン散乱

→ 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

密度ゆらぎによる 磁場生成③



大スケールのゆらぎはすでに観測されているので大スケール磁場の予言はrobust。
小スケールは未だ観測されていないゆらぎの大きさに依存。
→ 磁場観測でゆらぎの測定

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 ($z \sim 1000$)

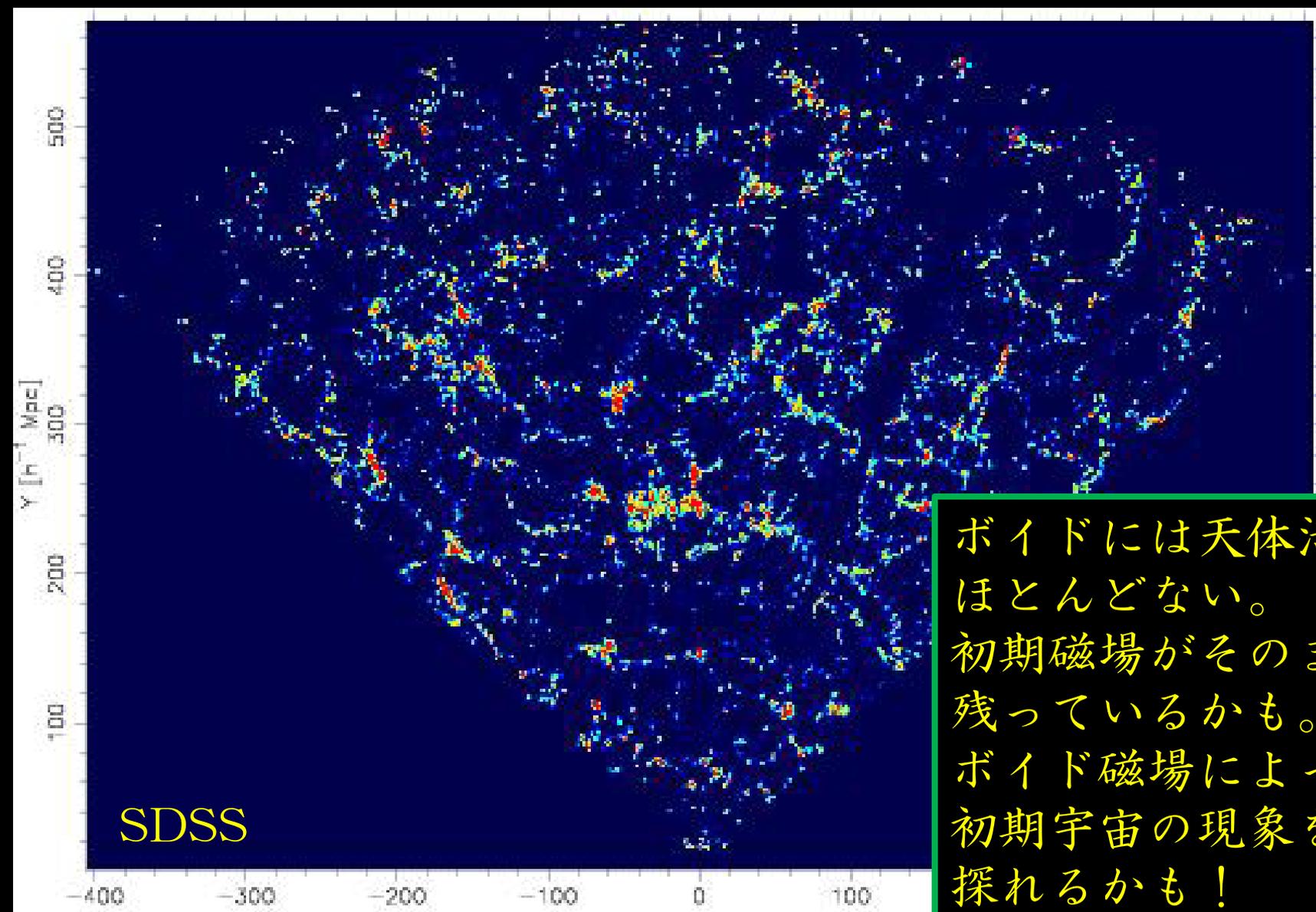
再イオン化、構造形成 ($z \sim 10$)

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

- ・ 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

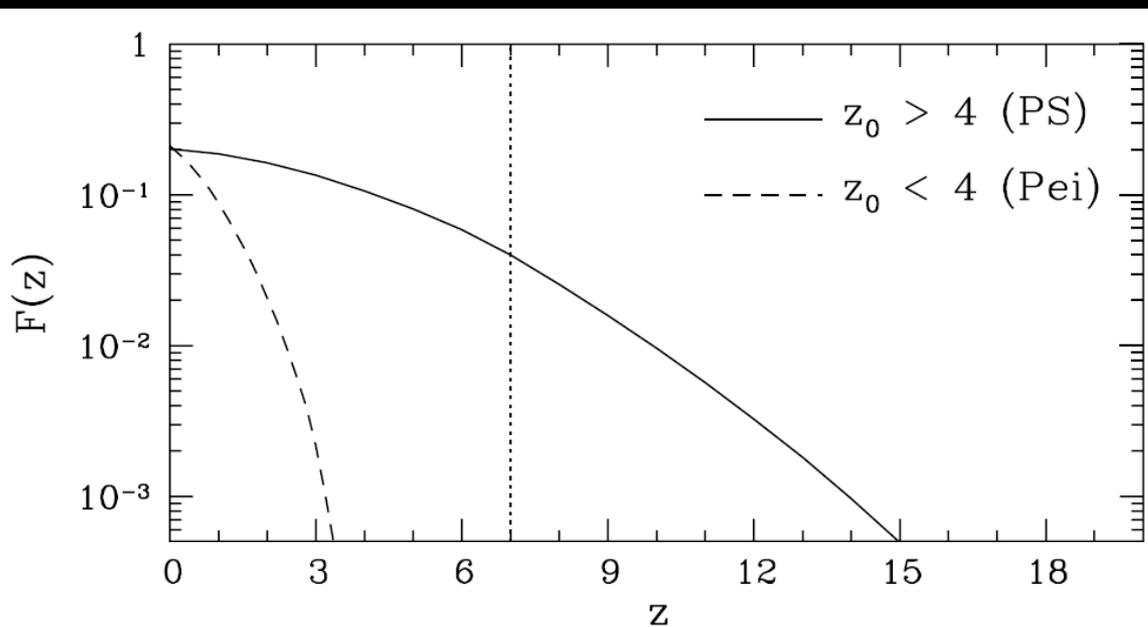
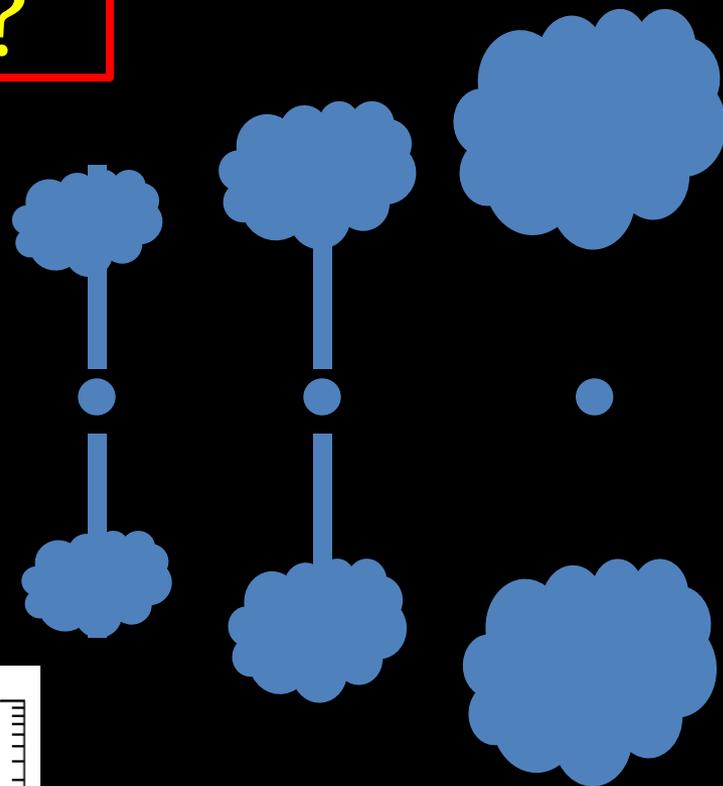


ボイドには天体活動がほとんどない。初期磁場がそのまま残っているかも。ボイド磁場によって初期宇宙の現象を探れるかも！

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 (同時にmetalの汚染もあるだろう)

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

磁場を通して初期宇宙の現象や銀河の活動性を探ることができるかもしれない。

どうやって微弱な磁場を観測するのか？

3、宇宙磁場の観測

宇宙論的磁場の観測・制限方法

ビッグバン元素合成 (Cheng et al.)

磁場のエネルギーが宇宙膨張の速さに影響

→ $B_0 < 1 \mu\text{G}$

宇宙背景放射の非等方性 (Yamazaki et al., Giovannini)

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

宇宙論的ファラデー回転

わりと確立された方法

磁場の積分を測定 → 系統誤差

高エネルギー天体の pair echo

未だ用いられたことはない

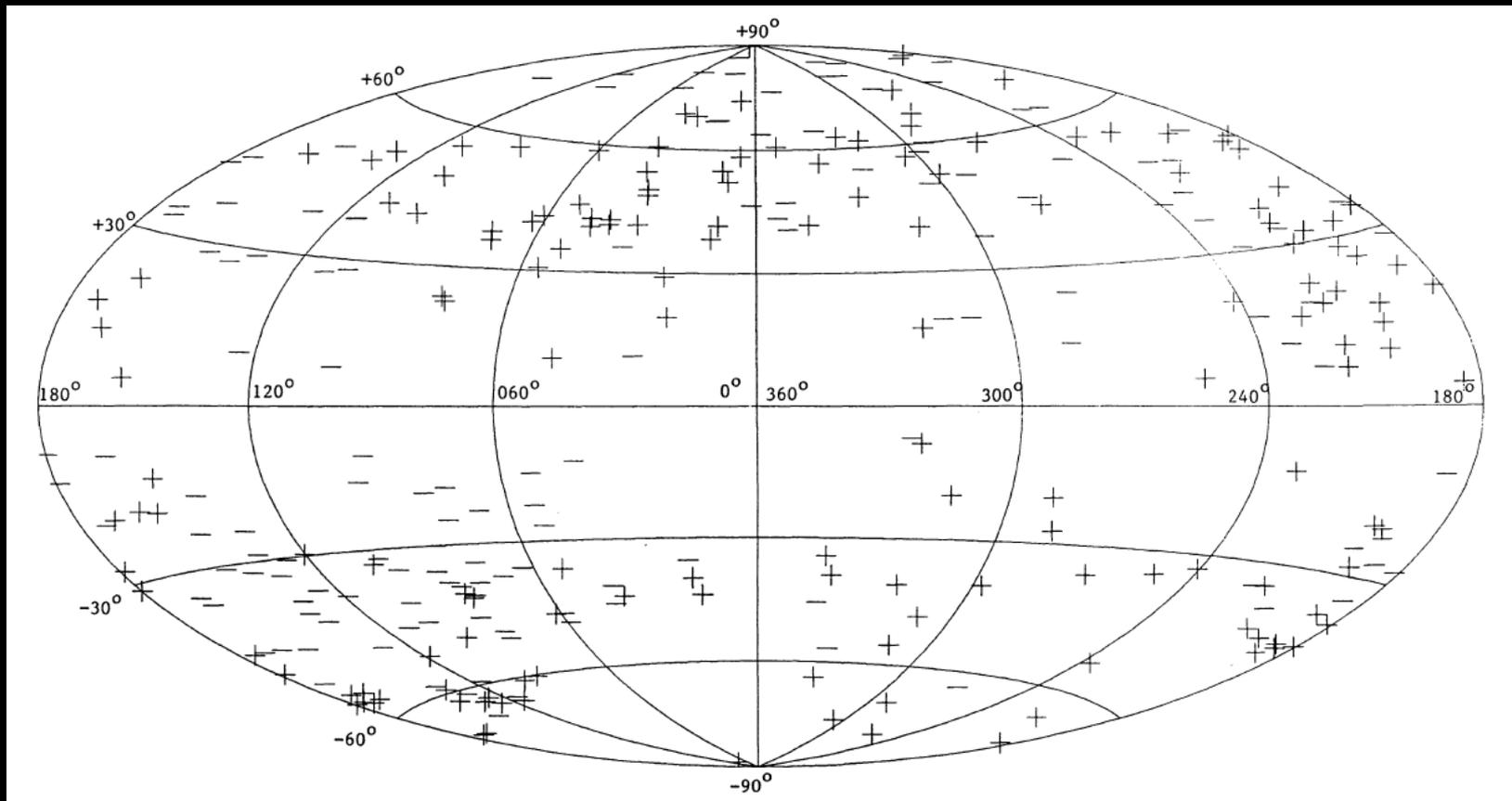
ピンポイントで磁場を測定

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

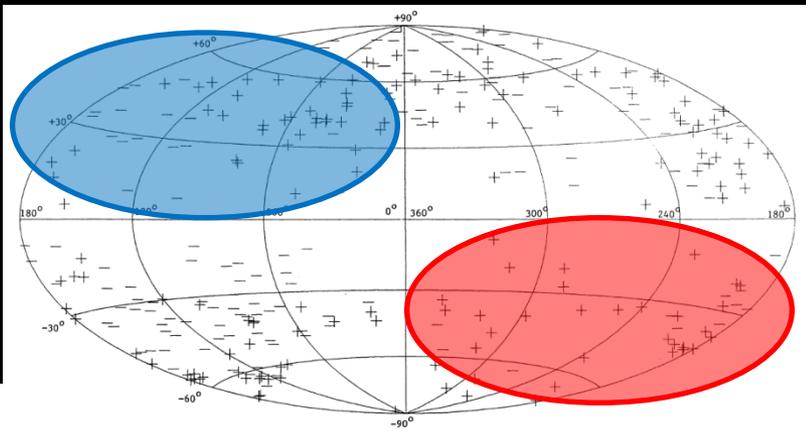
Vallee, 1990

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

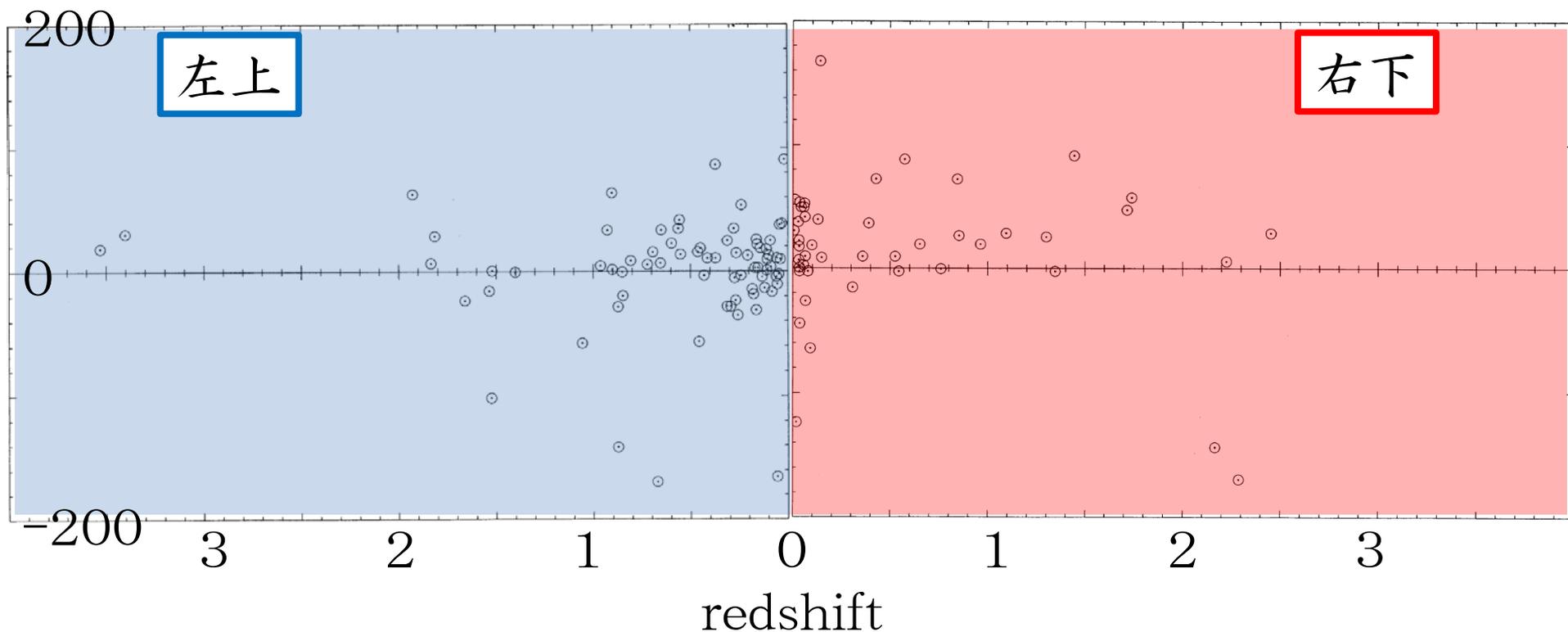


宇宙論的ファラデー回転

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/m²)



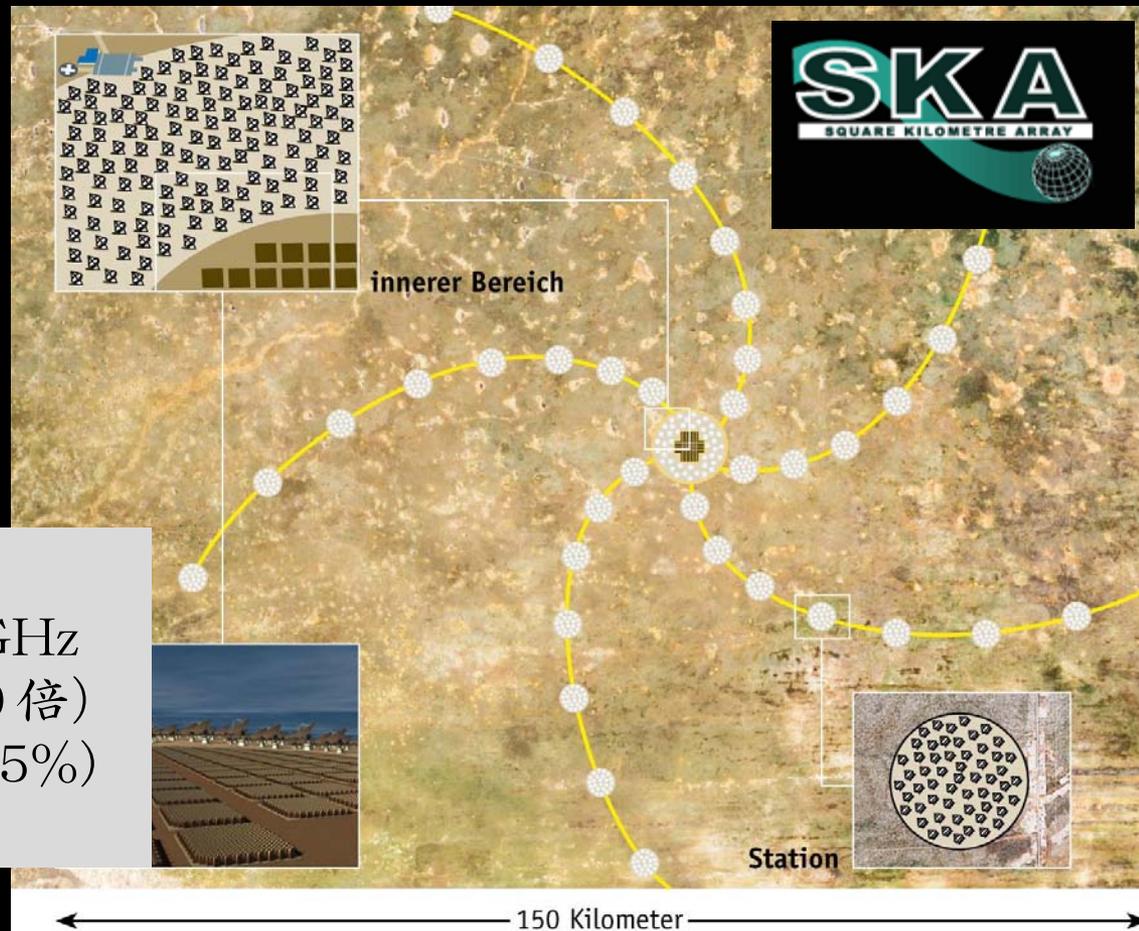
一様な磁場への制限： $B < 6 \times 10^{-11} \text{G}$

ファラデー回転探索の将来

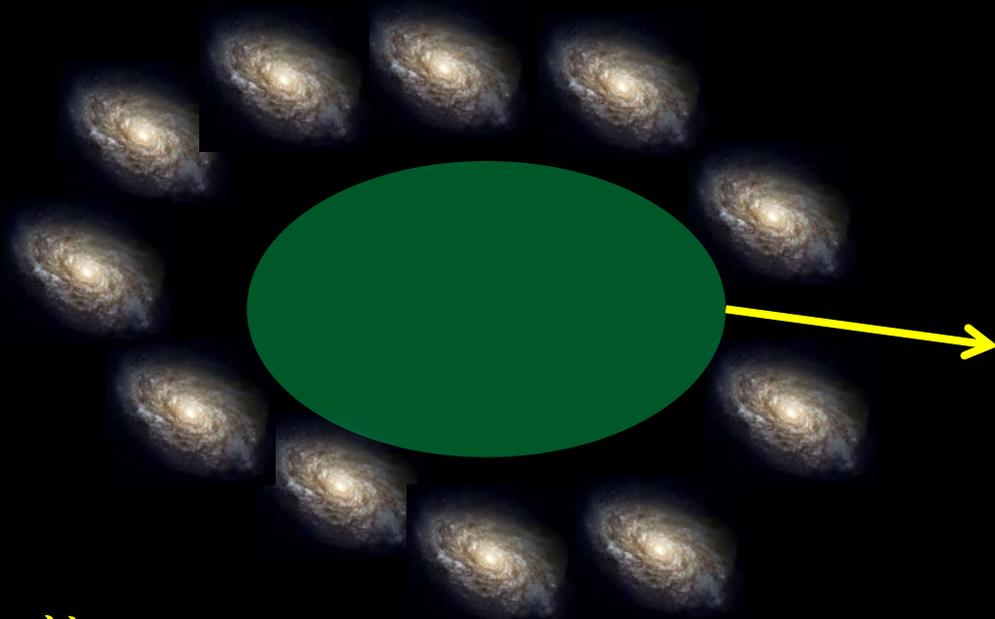
- Vallee (1990) : 674個 → 309個
- Kronberg et al. (2008) : 901個 → 268個
- Bernet et al. (2009) : 72個 (高銀緯・optical spectrum)
- LOFAR ~ 10^7 個
- SKA

systematic effectを
どうやって
差し引くか?

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



こういうことをやりたい



ボイド磁場

ある1つのボイドの
まわりの電波源の
ファラデー回転を
山ほど観測

→ いろんなノイズを
差っ引ける？



高エネルギー天体のpair echo

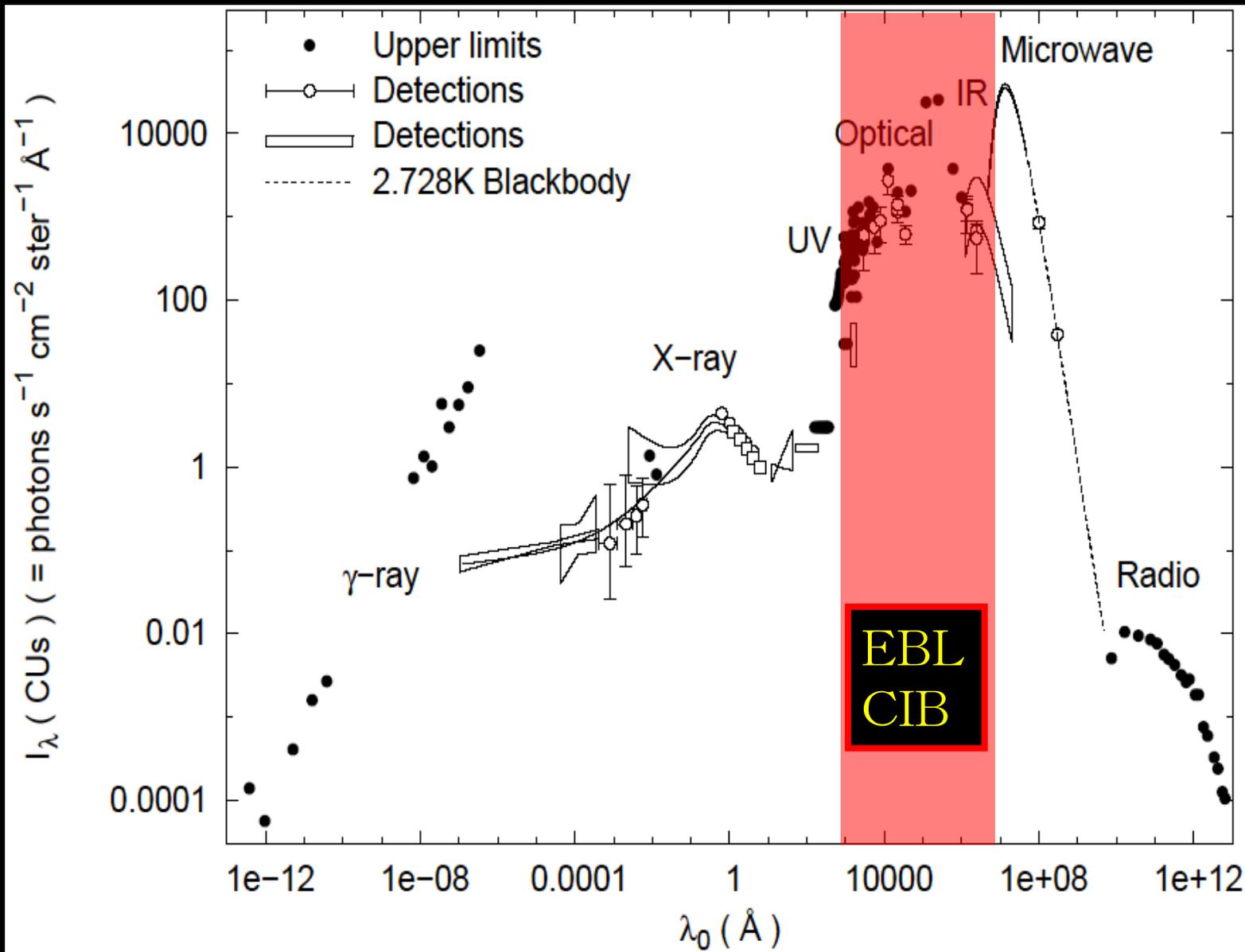
ガンマ線バーストやブレーザーを使った磁場測定法
(Plaga, 1994)

- ・ pair echo
 - TeV γ 線の対消滅による
遅延2次 γ 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 γ 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？

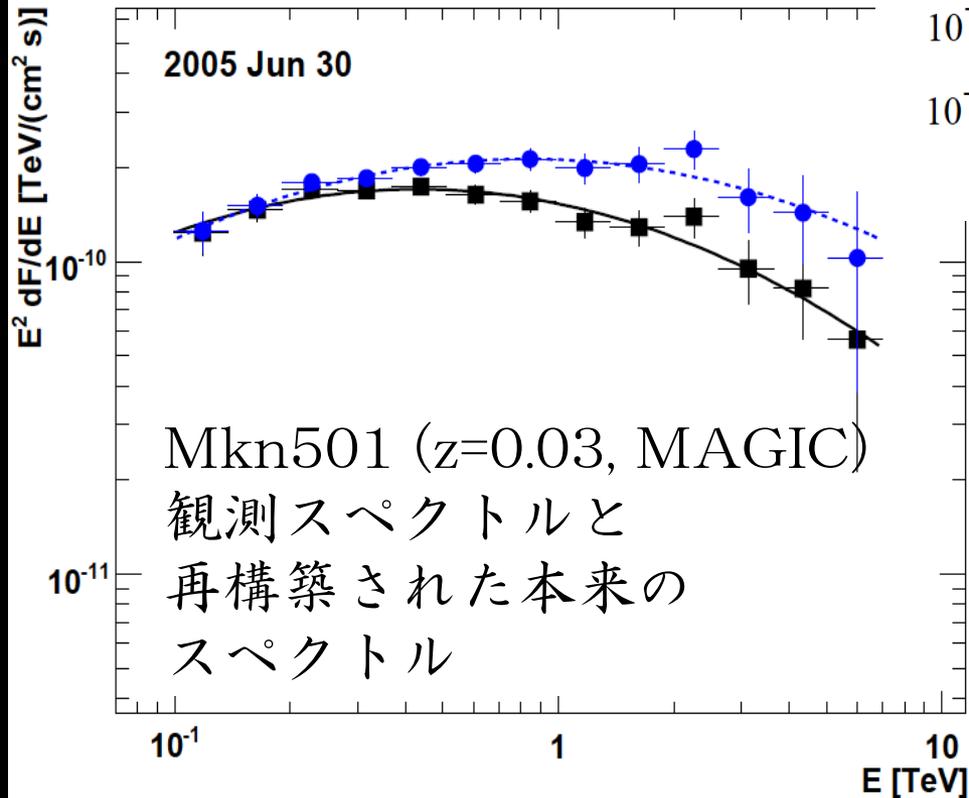
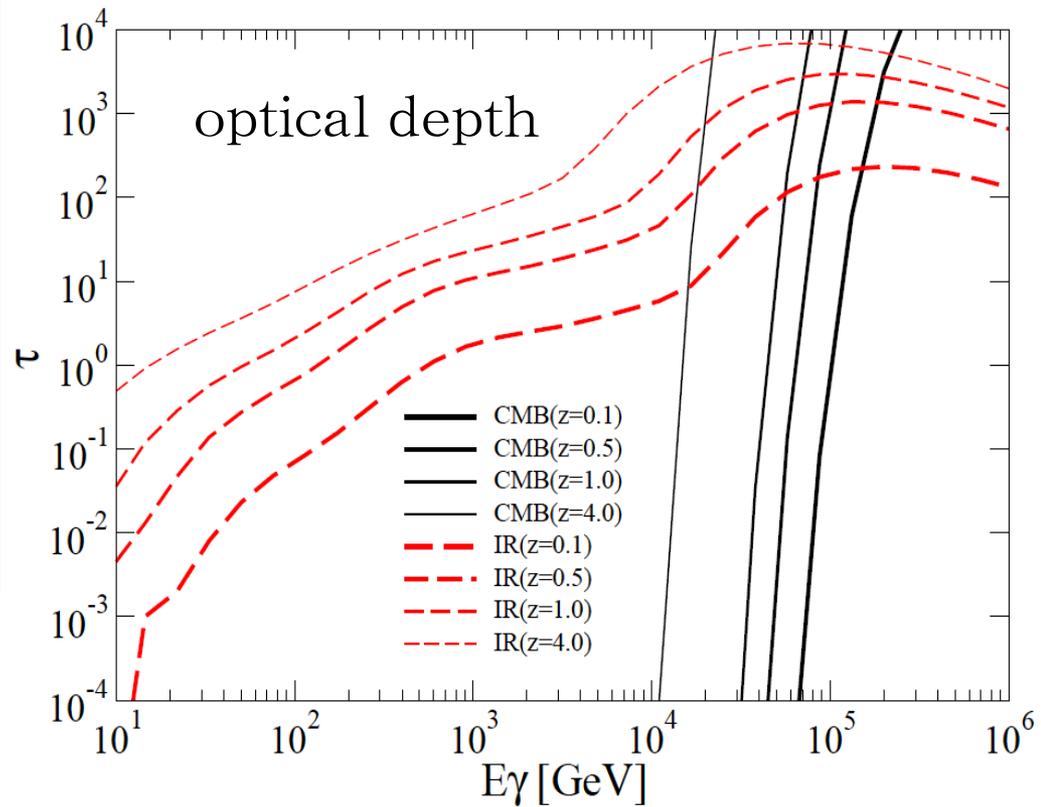
背景放射



ガンマ線吸収

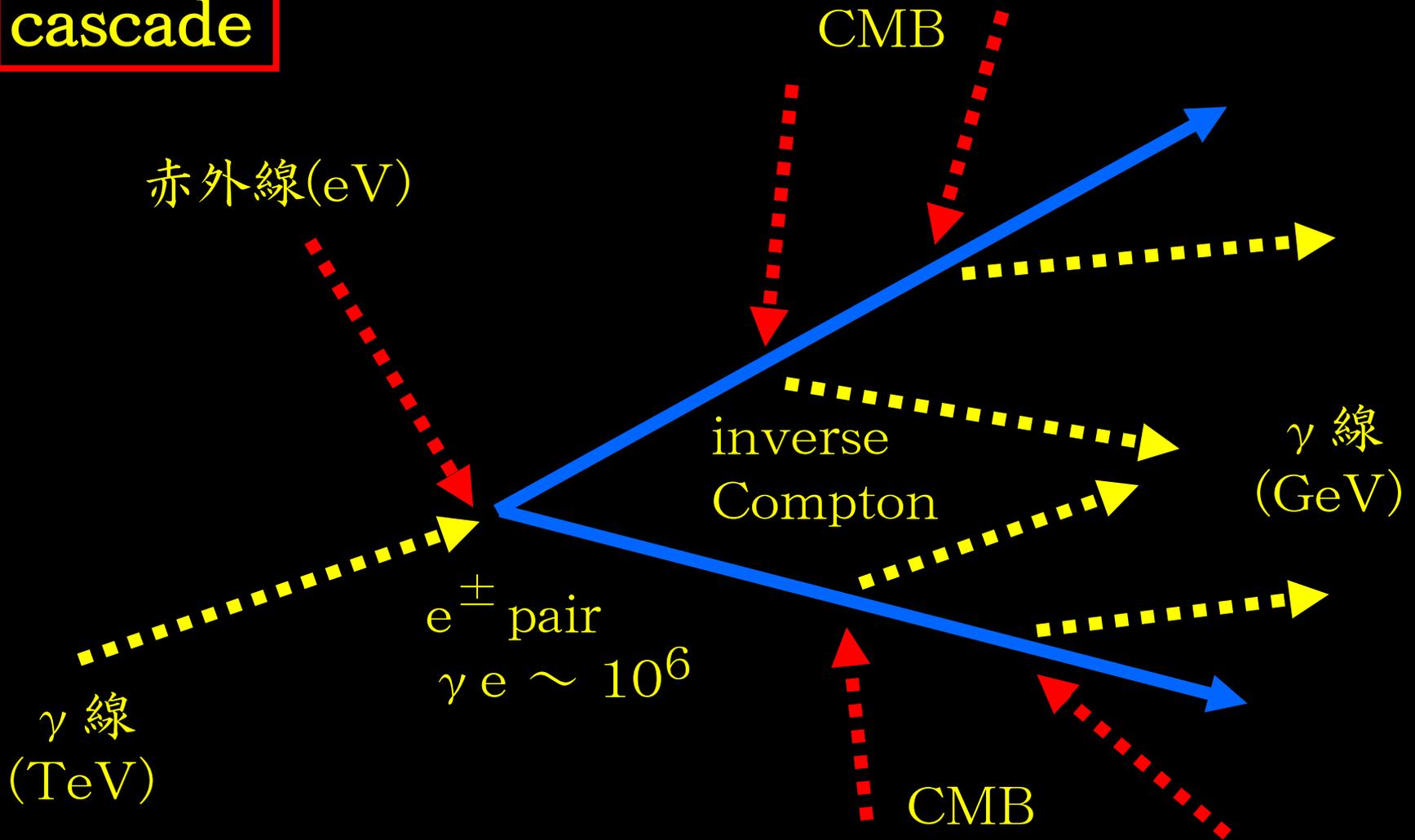
遠方にある天体から来る
TeV以上のガンマ線は
途中で吸収

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



吸収されたエネルギーは
どうなるのか？

cascade



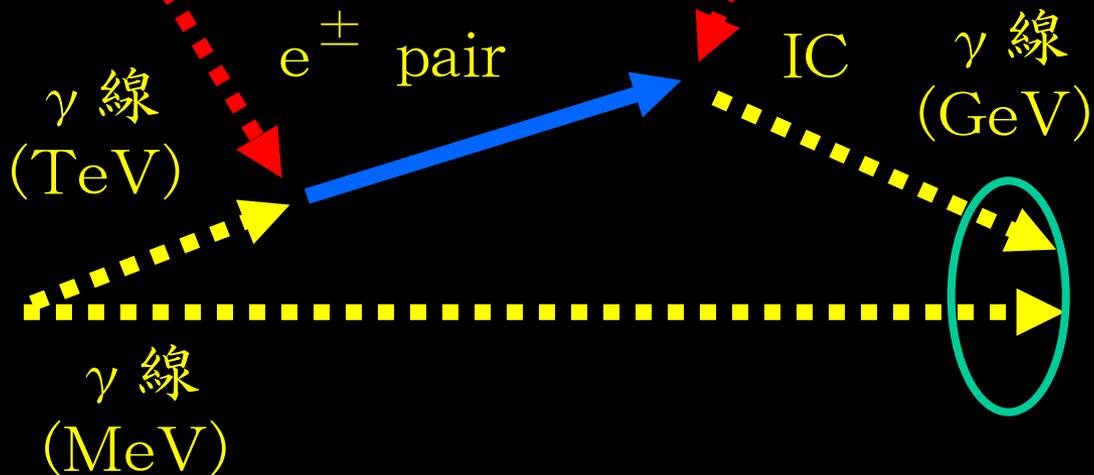
TeVガンマ線はたくさんのGeVガンマ線になる。
*進行方向は相互作用の度に $1/\gamma e$ 程度変化

pair echo

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

赤外線

CMB



pair echo



time
delay

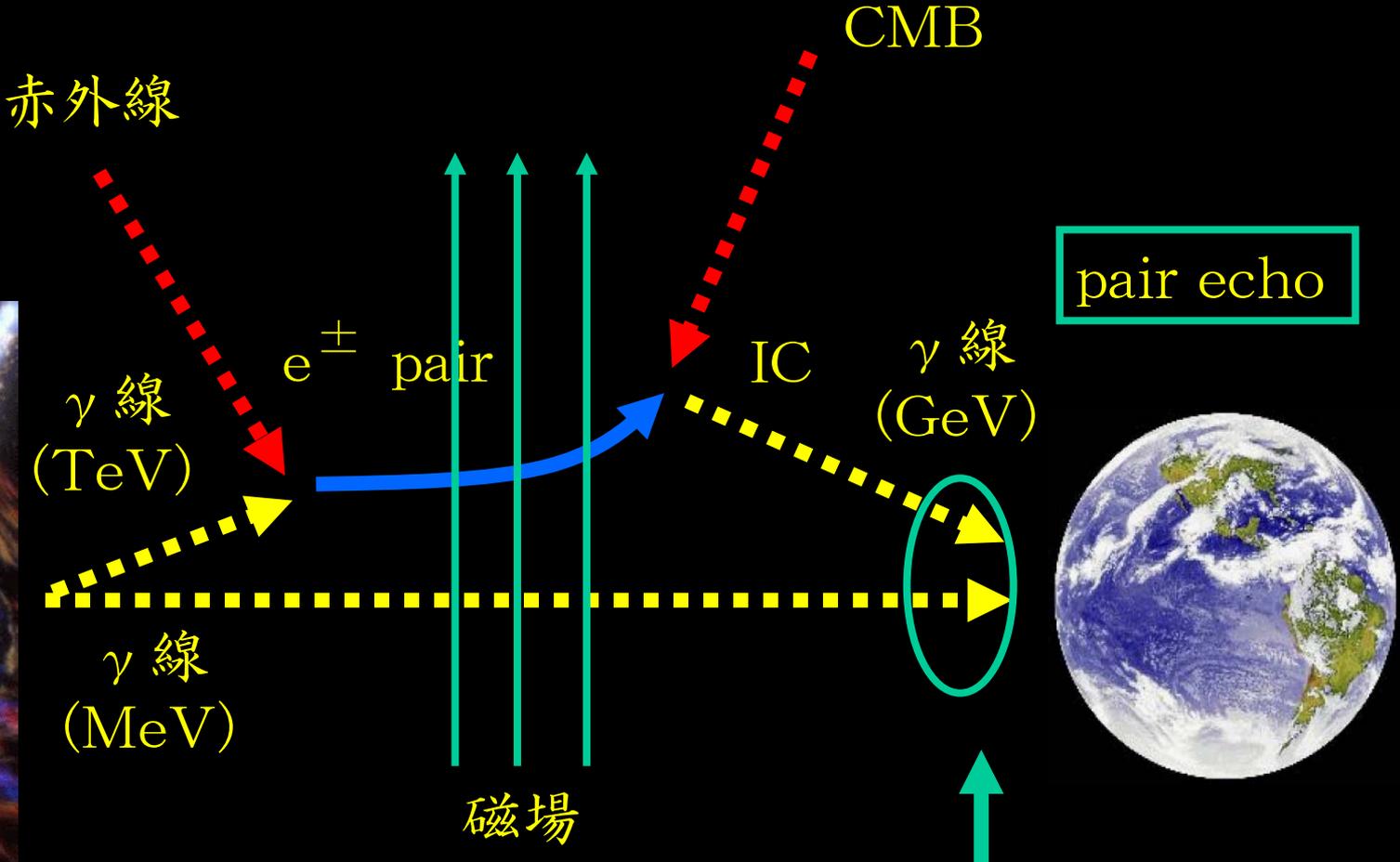


GRB, AGN

pair echo with magnetic field

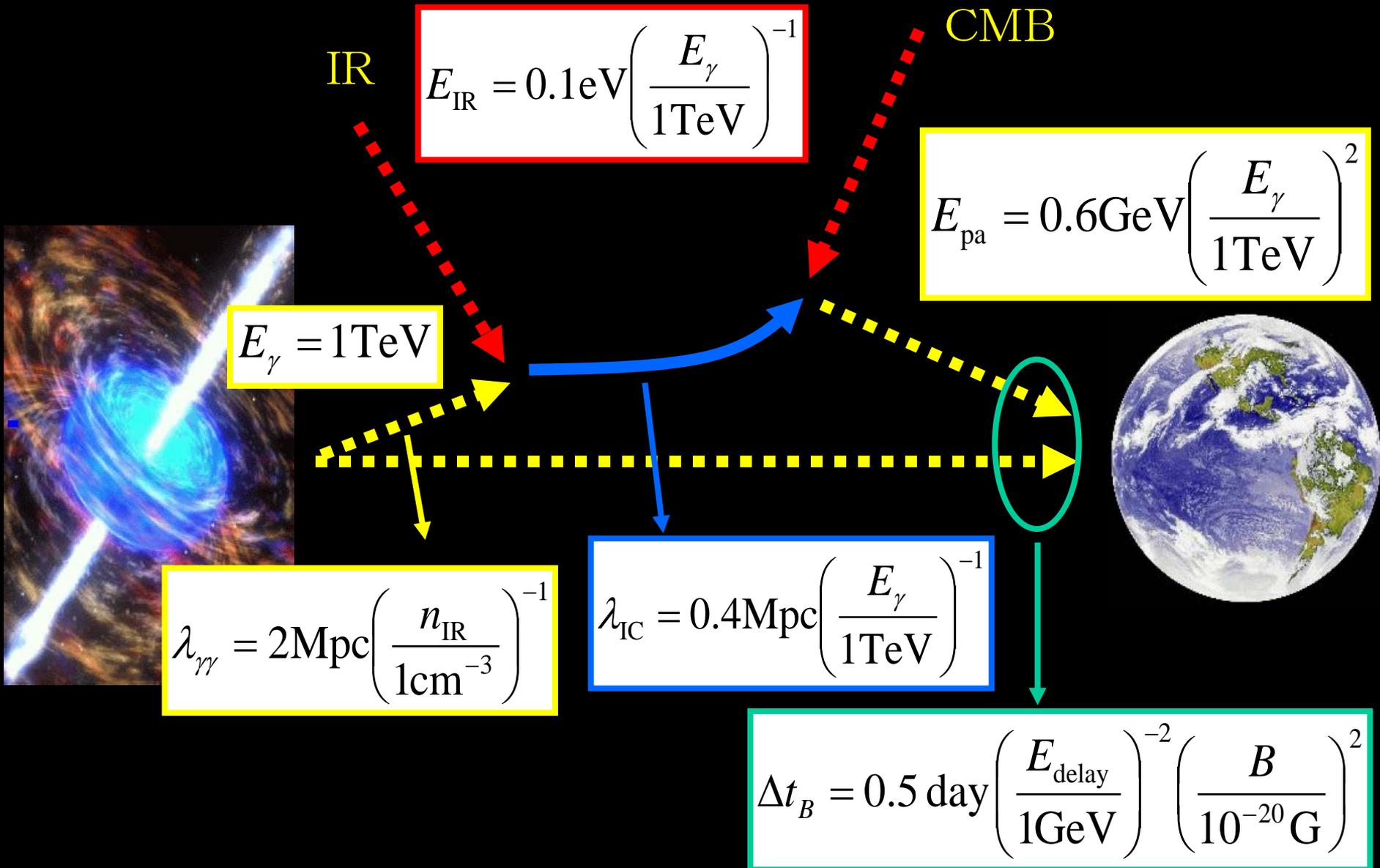


GRB, AGN



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。

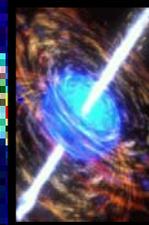
特徴的な数字



理想的な状況

(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。

GRB・AGN

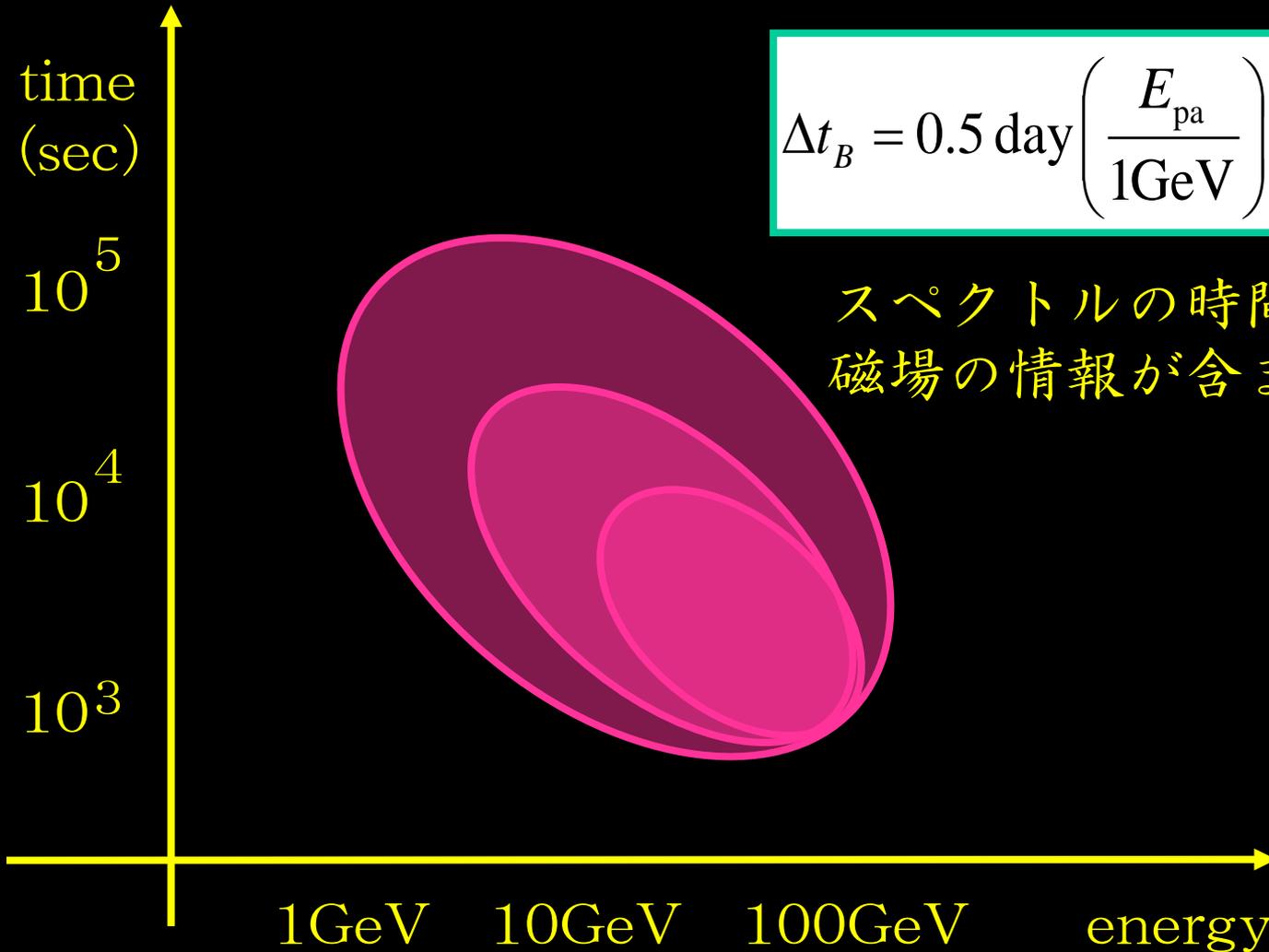


~ 10Mpc

ここの磁場を
ピンポイントで観測



観測量

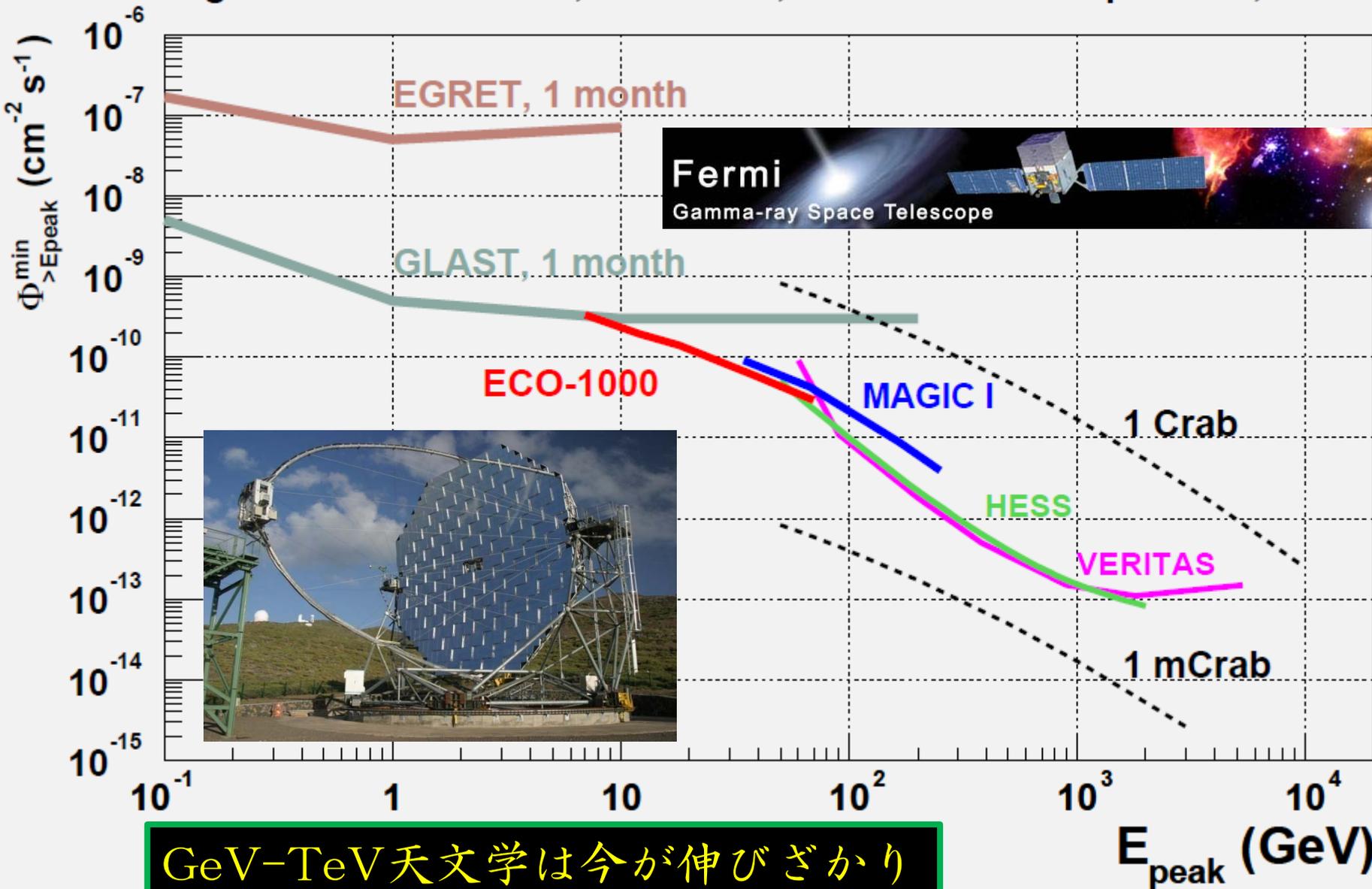


$$\Delta t_B = 0.5 \text{ day} \left(\frac{E_{\text{pa}}}{1\text{GeV}} \right)^{-2} \left(\frac{B}{10^{-20}\text{G}} \right)^2$$

スペクトルの時間発展に
磁場の情報が含まれている

γ 線天文学

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



セットアップ

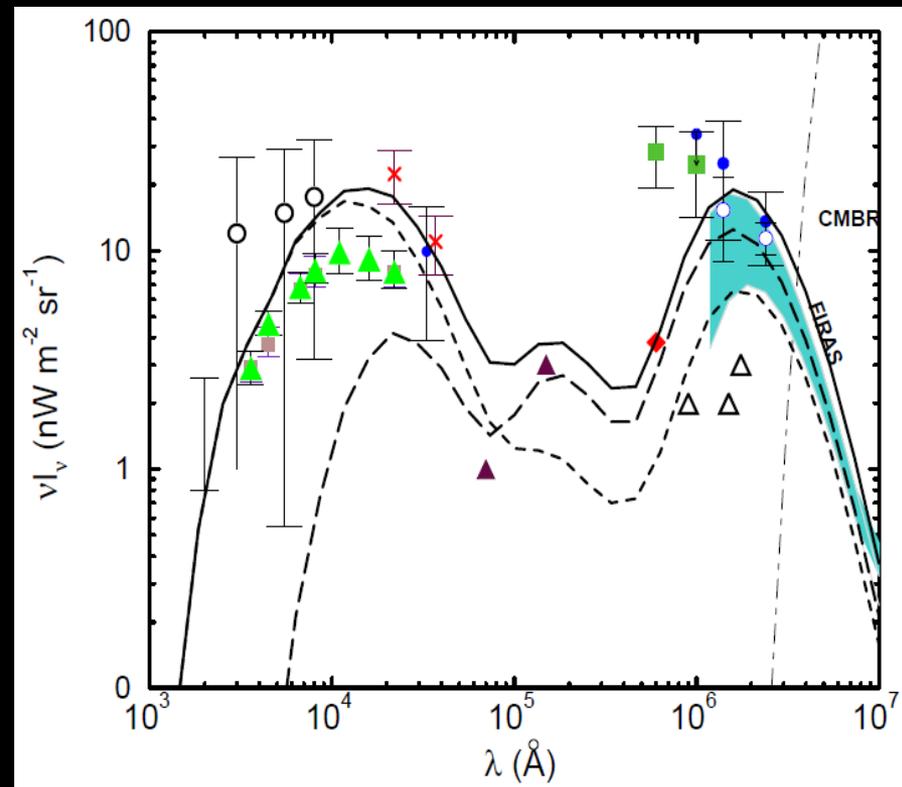
primary放射

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

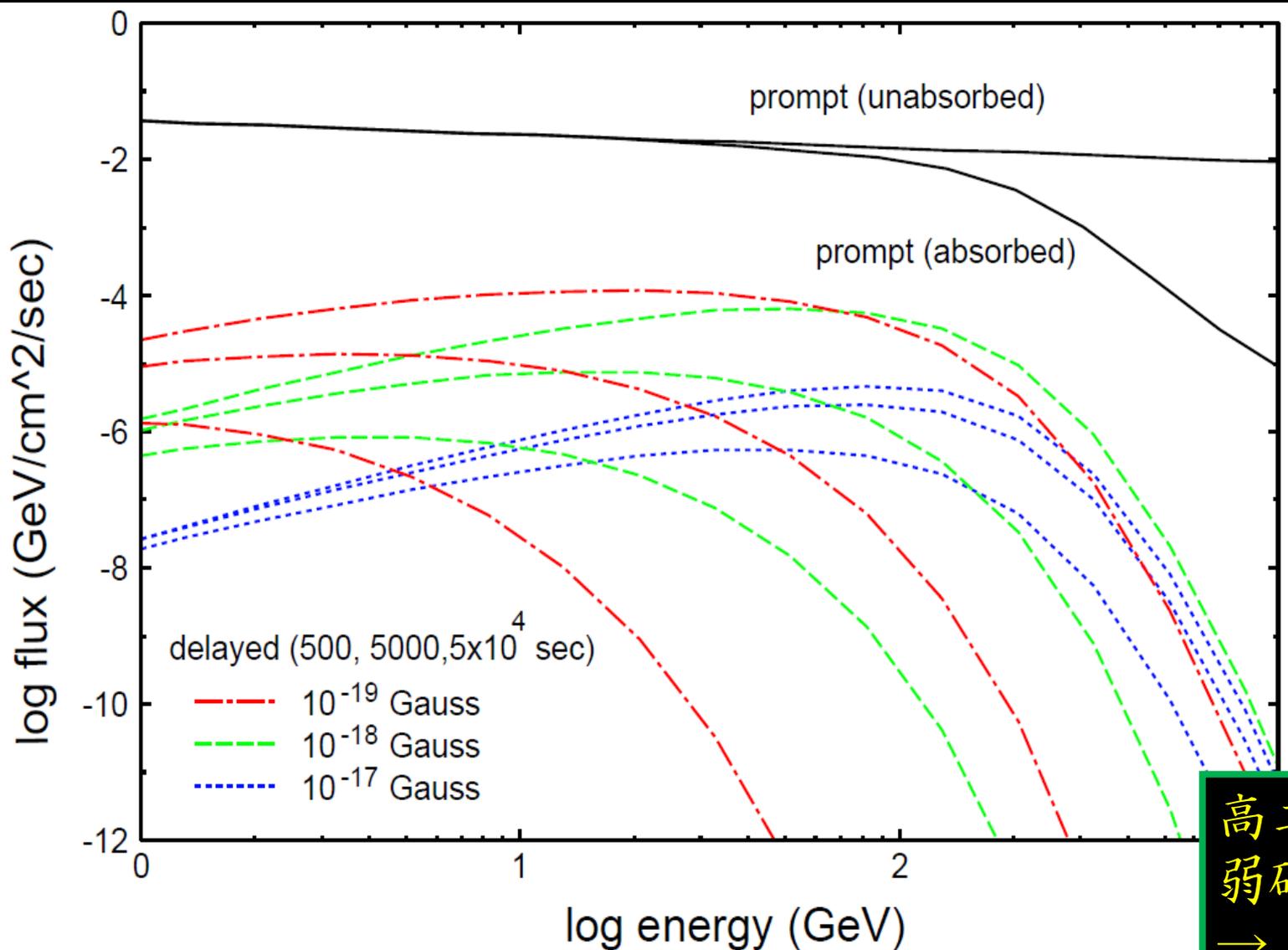
$$E_{\gamma,[0.1,10]}^{\text{iso}} = 3 \times 10^{53} \text{ erg}$$

CIB model

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

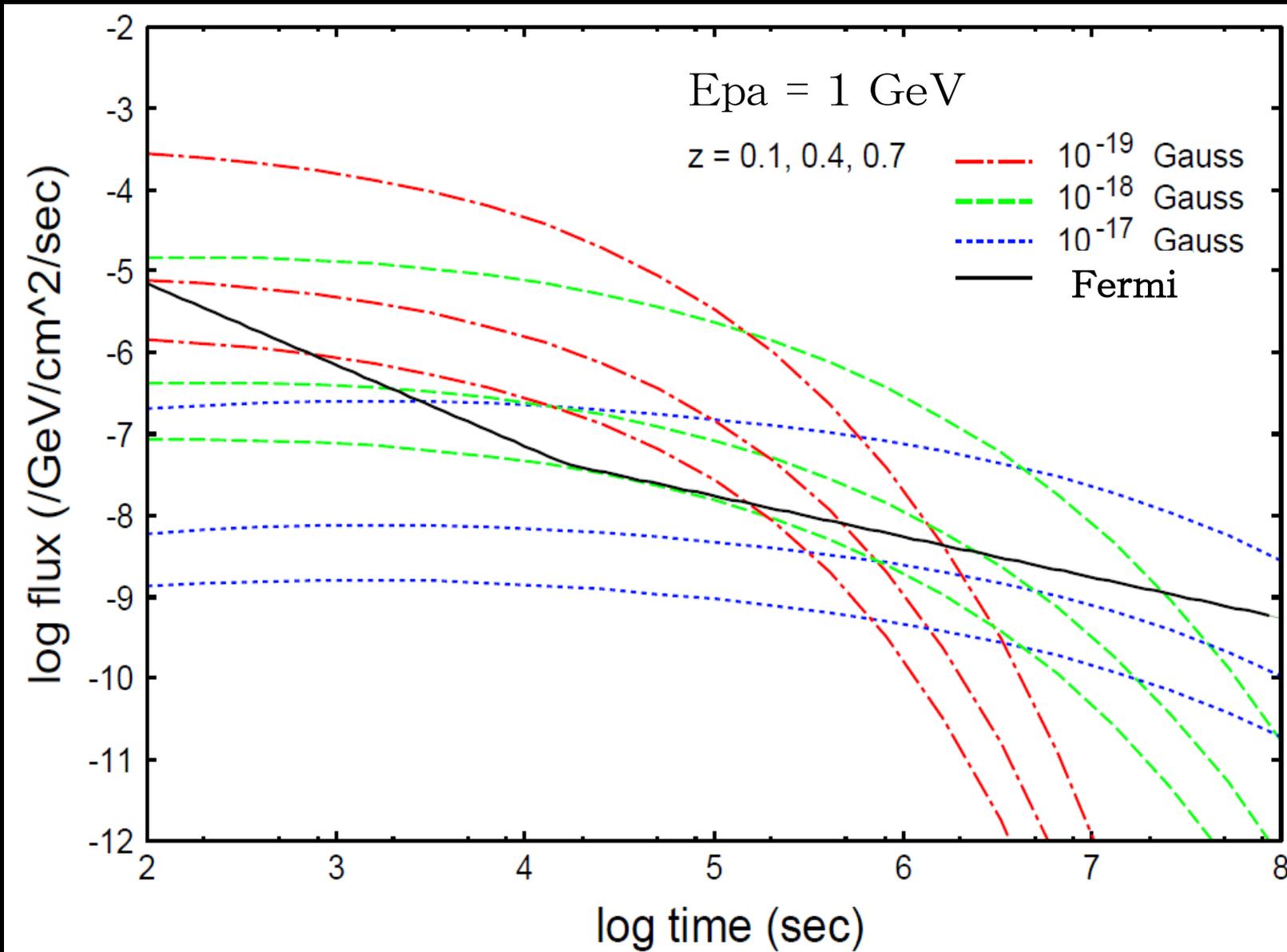


pair echo スペクトル

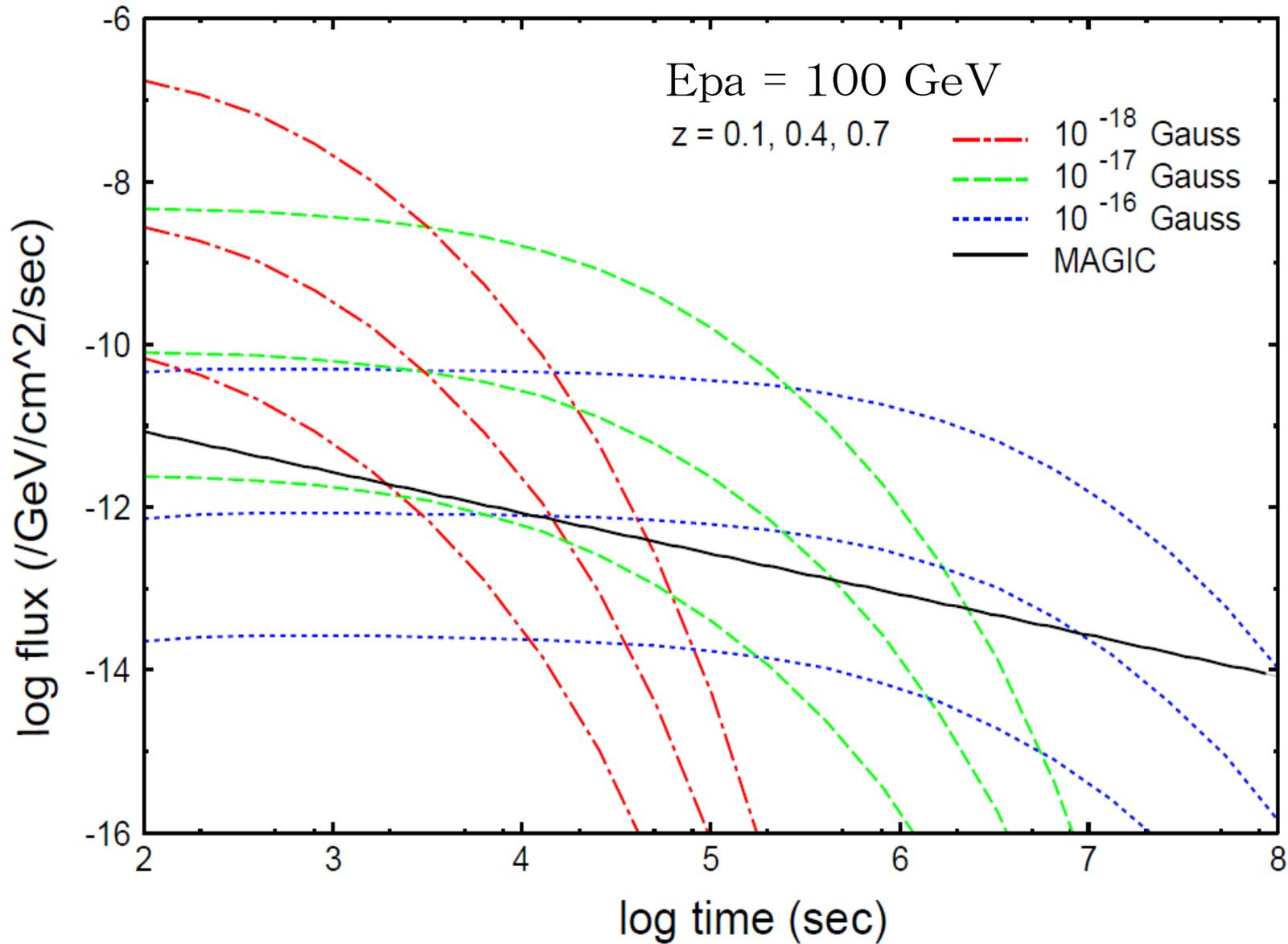


高エネルギー
弱磁場
→ 速く落ちる

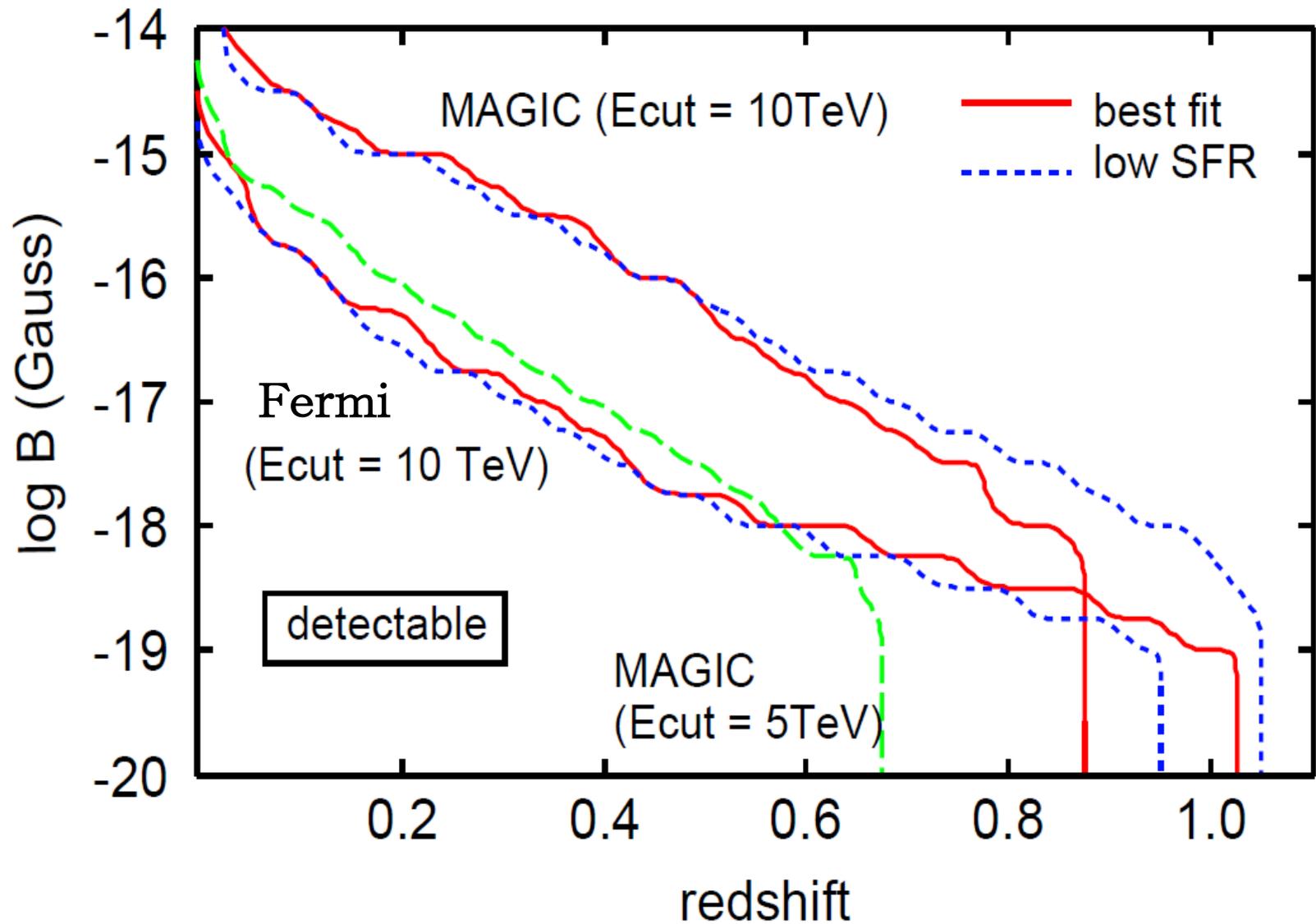
light curve at 1 GeV & Fermi



light curve at 100 GeV & MAGIC



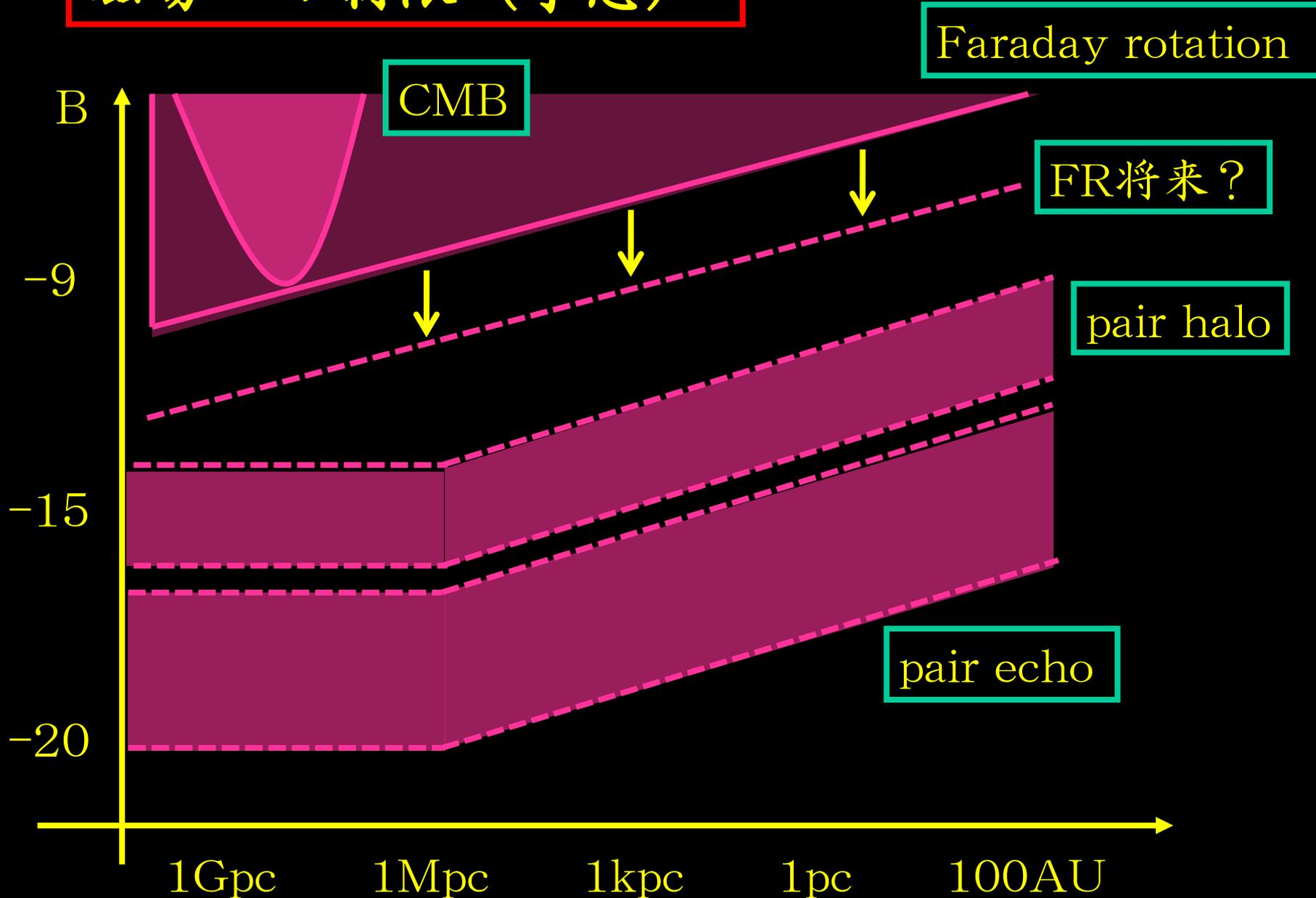
pair echoの観測可能性



pair echo 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 γ 線
 - + EBL \rightarrow TeV電子・陽電子
 - + CMB \rightarrow GeV γ 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

磁場への制限 (予想)



宇宙磁場グランドシナリオ

様々な磁場生成過程

- ・密度ゆらぎ
- ・再イオン化
- ・構造形成
- ・流れ込み

$10^{-20 \pm 10}$ 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