

宇宙論の展望

小松英一郎 (The University of Texas at Austin)

理論懇, 2008年12月15日

テキサス大学オーステイン

Center for Cosmology

- 来年一月より始動！

Research Unit, Center for Cosmology

Astronomy

Volker Bromm

Karl Gebhardt

Gary Hill

Eiichiro Komatsu(Director)

Milos Milosavljevic

Paul Shapiro

Physics

Duane Dicus

Jacques Distler

Willy Fischler

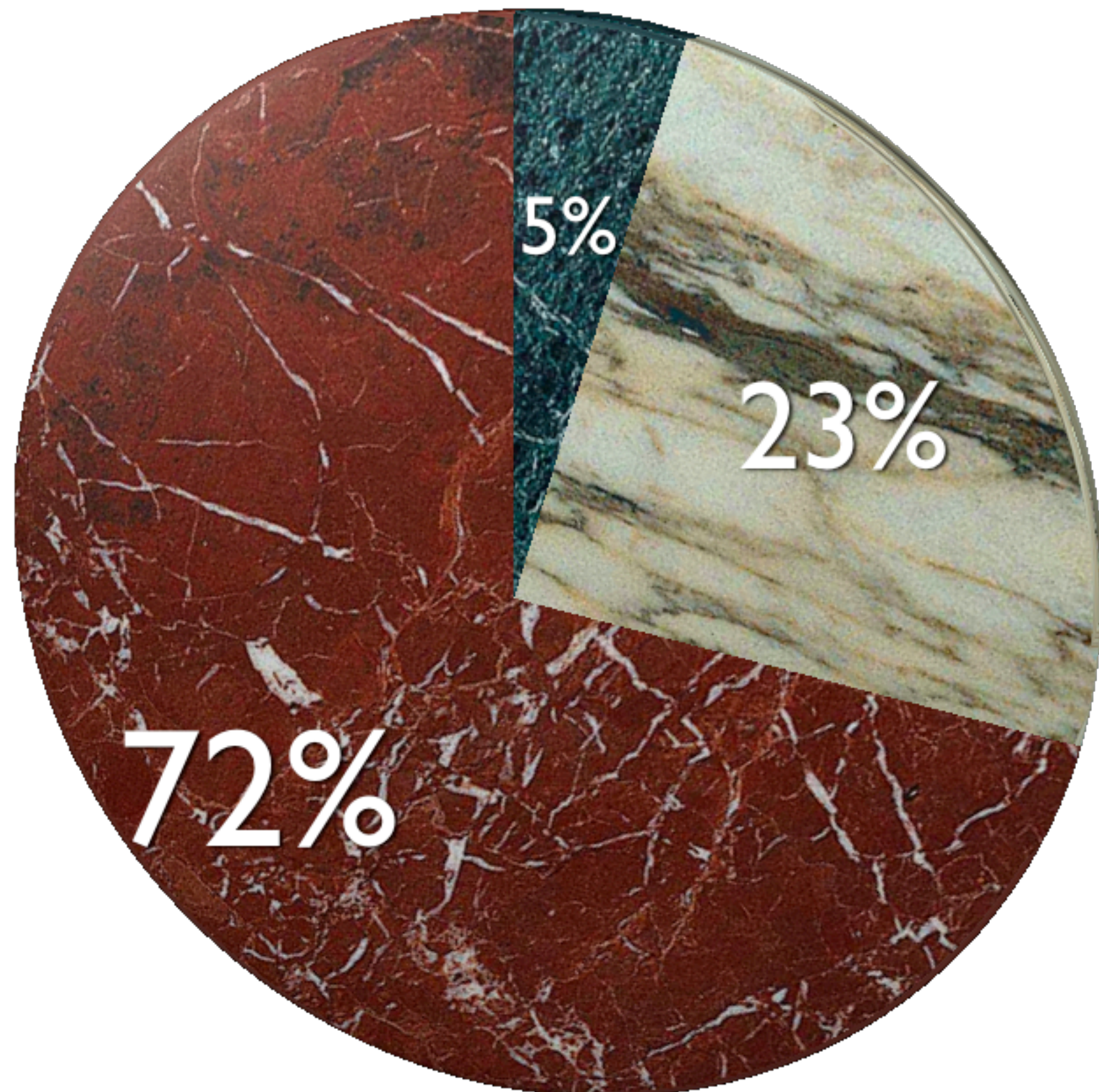
Vadim Kaplunovsky

Sonia Paban

Steven Weinberg

宇宙論：科学的現状(I)

現在の宇宙の組成表

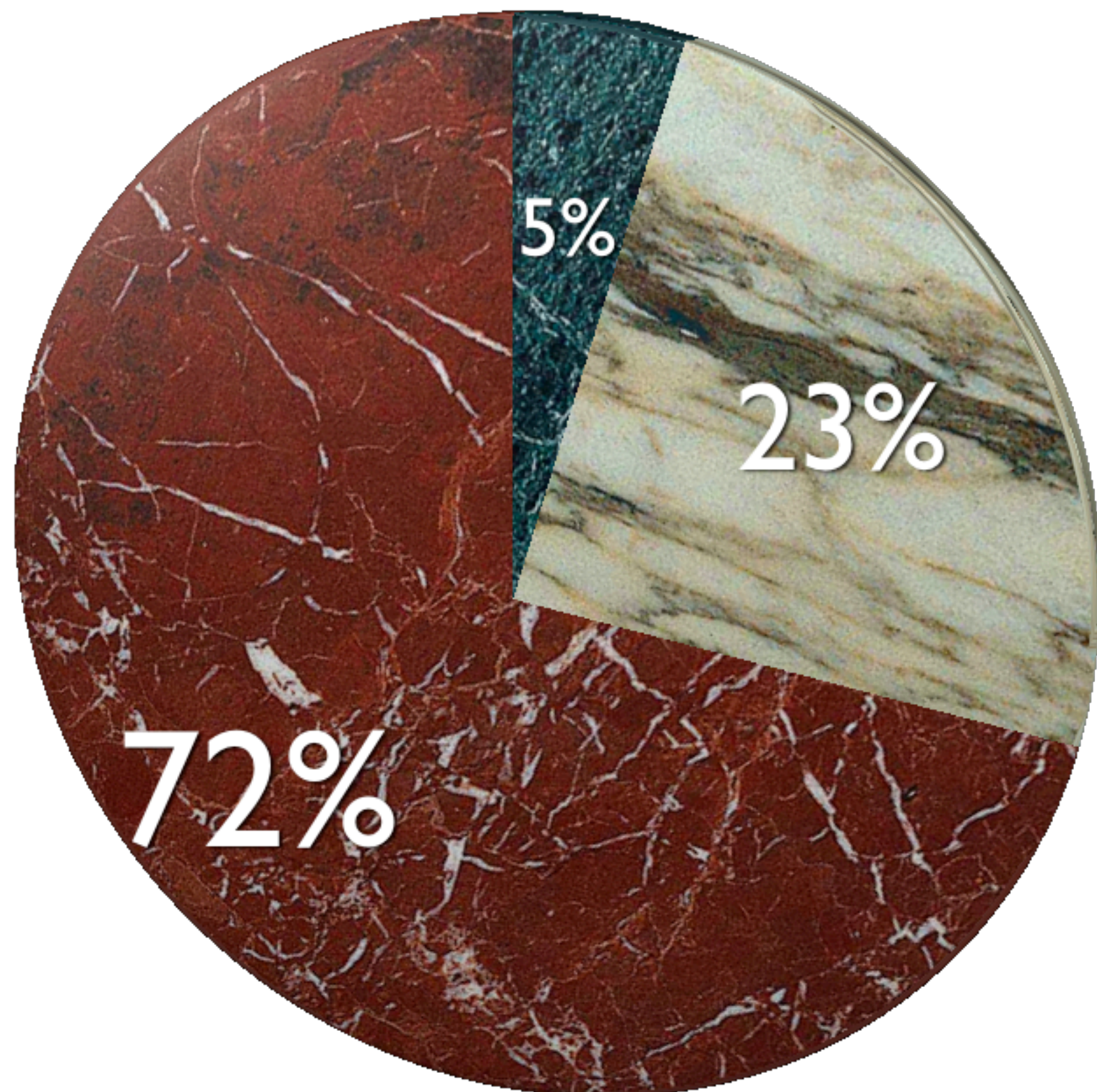


- 宇宙マイクロ波背景輻射、宇宙の大規模構造、およびIa型超新星の観測により、現在の宇宙の組成が明らかとなった。

- 水素・ヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

宇宙論：科学的現状(I)

現在の宇宙の組成表



- 宇宙論は『量』を問う時代から『質』を問う時代へと転換を果たした。

- **暗黒物質とは何か？**

- **暗黒エネルギーとは何か？**

- 水素・ヘリウム
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー

宇宙論：科学的現状(2)

- 宇宙が加熱されたビッグバン以降の宇宙の進化は、ほぼ解明されたと言って良い。
- より正確に言えば、核融合でヘリウム原子核が形成された時期（ $\sim 1 \text{ MeV}$: 温度にして約100億度）以降の宇宙の振る舞いは、ほぼ解明されている。
- 現在の宇宙論の興味は、それよりずっと前、より温度が高かった**原始宇宙時代**に移行している。

宇宙論：科学的現状(2)

- 原始宇宙の進化に関する研究で、重要課題に挙げられるものは二つ。
- **ビッグバンの起源は何か？（インフレーション）**
- **バリオン物質の起源は何か？（バリオジェネシス）**

10～20年間に 解決すべき宇宙論問題

- 暗黒物質とは何か？
- 暗黒エネルギーとは何か？
- ビッグバンの起源は何か？
- バリオン物質の起源は何か？

10～20年間に 解決すべき宇宙論問題

- **暗黒物質とは何か？**
- 暗黒エネルギーとは何か？
- ビッグバンの起源は何か？
- **バリオン物質の起源は何か？**

暗黒物質の正体

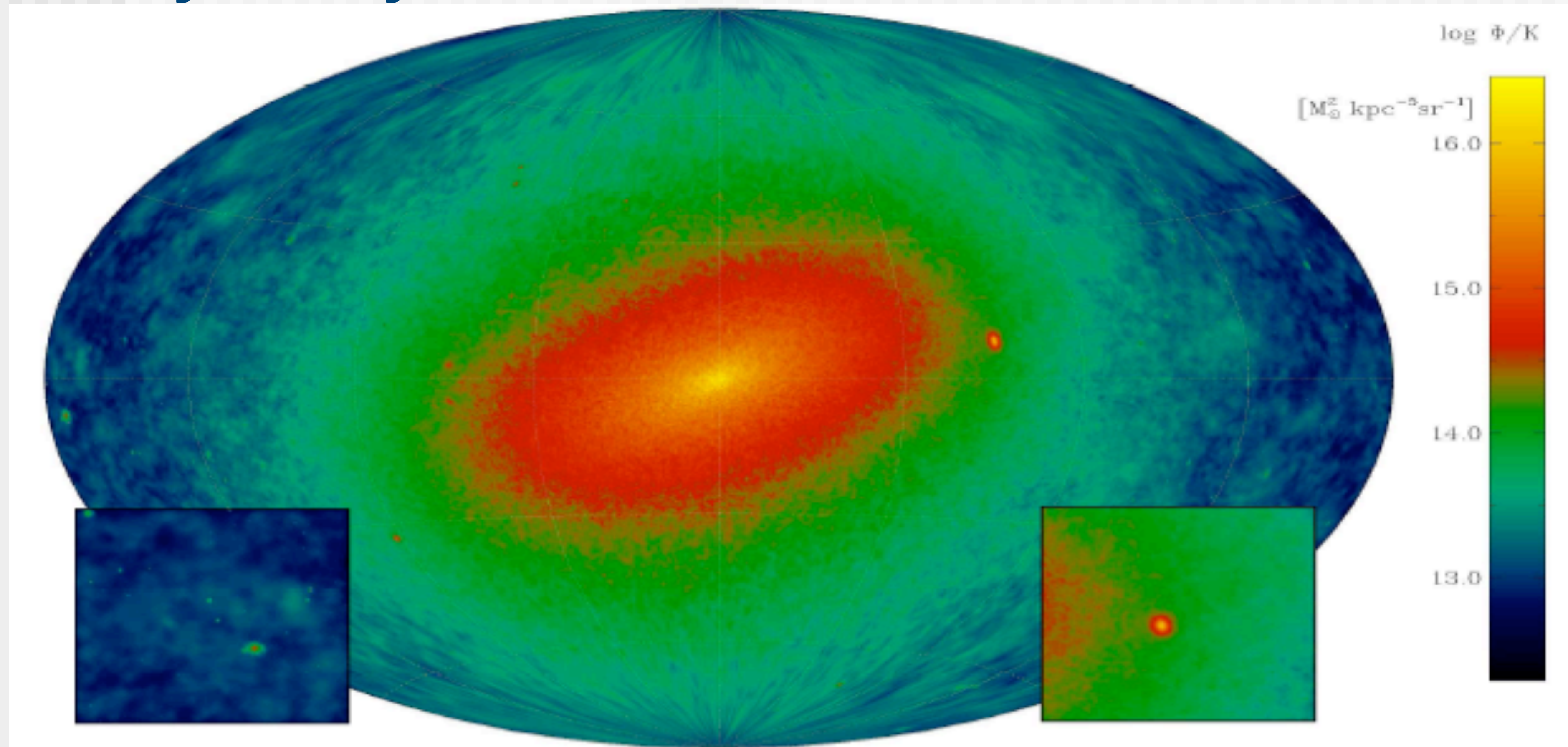
- **大型ハドロン加速器**(LHC)は、暗黒物質の生成に成功する可能性がある（超対称粒子、KK粒子）
- 米国の次世代ガンマ線衛星**FERMI**により、暗黒物質起源のガンマ線が検出される可能性がある。
- 反跳を用いた暗黒物質の**直接検出実験**の感度の向上により、直接検出も夢ではなくなった。

暗黒物質：理論的課題

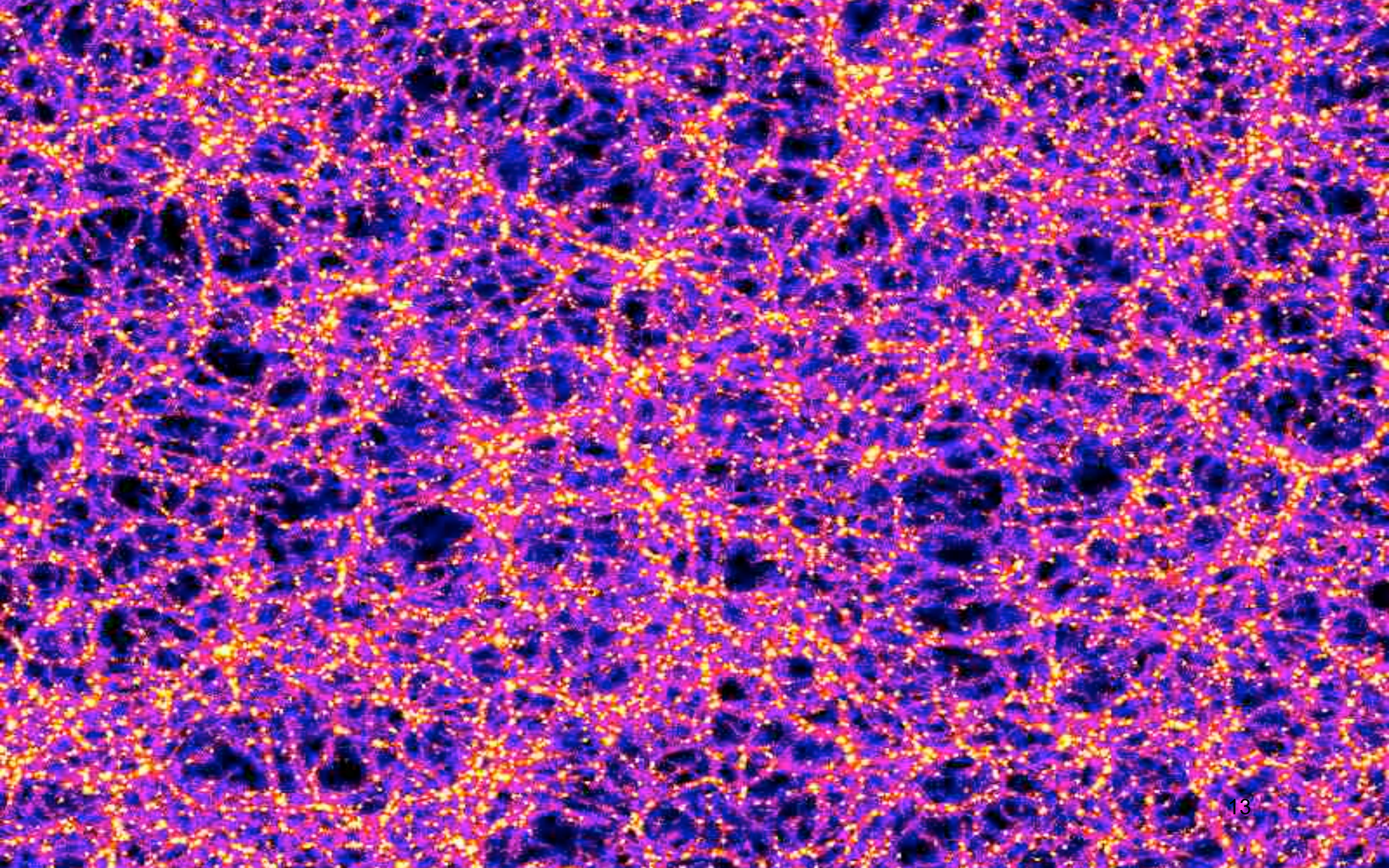
- 暗黒物質の検出に向け、理論に求められる事は？
 - 素粒子物理学的見地では、あるモデルに即した散乱断面積、対消滅断面積、質量等の計算が問題になる
 - 天体物理学的見地では、暗黒物質の宇宙における分布、つまりハローの構造、サブストラクチャー、コースティックスの分布といった、基本的であるが良く理解されていない問題が重要になる
 - それらを効率良く観測する手法の提唱も大事



Milky Wayからのシグナル

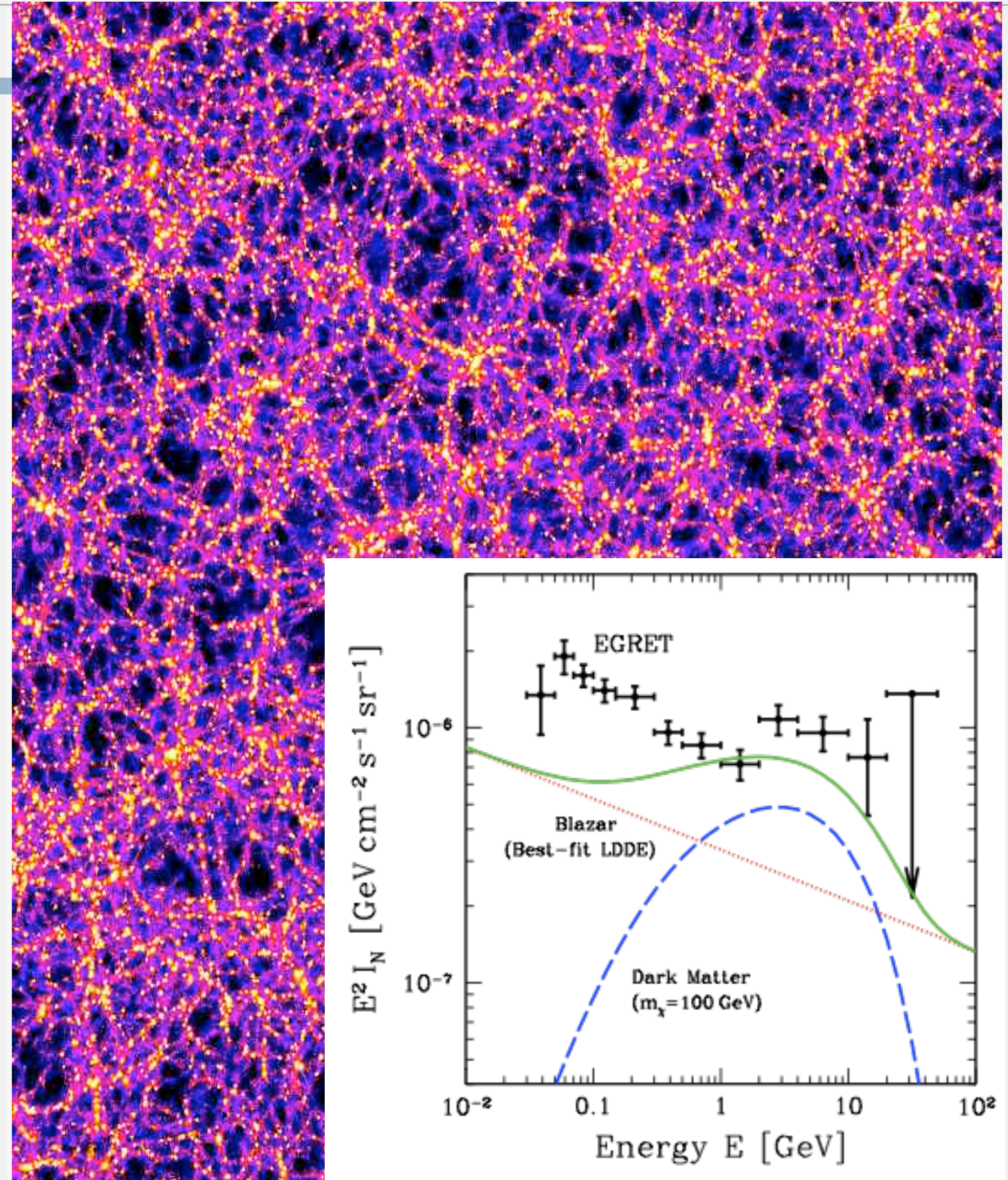


- Diemand et al.によるN体計算で得られたハローの中心を、8kpcの距離から見た時の、暗黒物質起源ガンマ線の分布



Milky Wayだけではない！

- 暗黒物質は、宇宙のいたるところでガンマ線を発しているはず。
- どうしてMilky Wayに固執せねばならないのか？ハローはいたるところにある！
- 個々のハローを分解する事はできないが、銀河系外からのシグナルは「ガンマ線背景輻射」として見えるはずである。
- 「もう既に見えている」と言っている人もいるが、暗黒物質起源であることを、どうやって証明すれば良い？

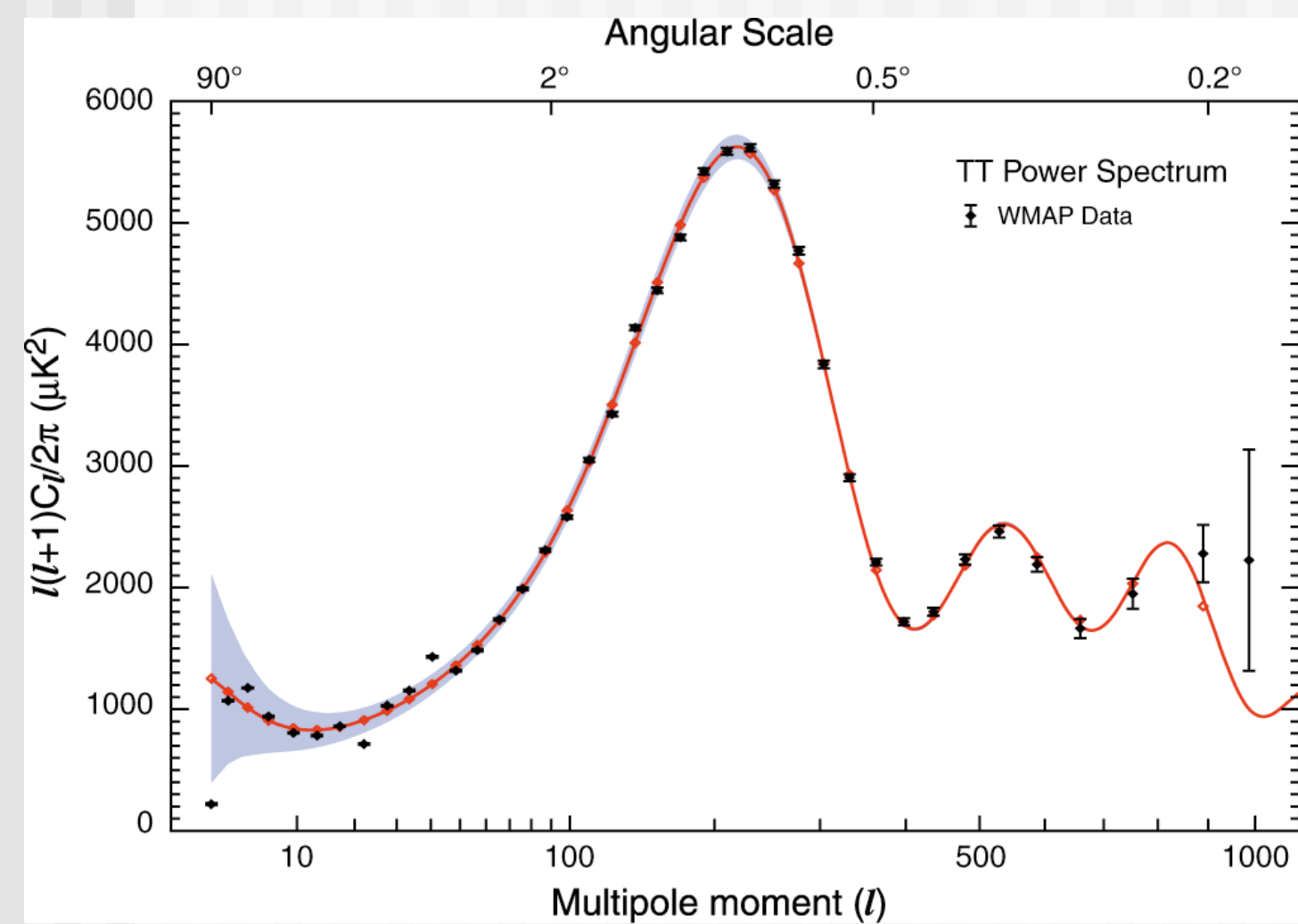
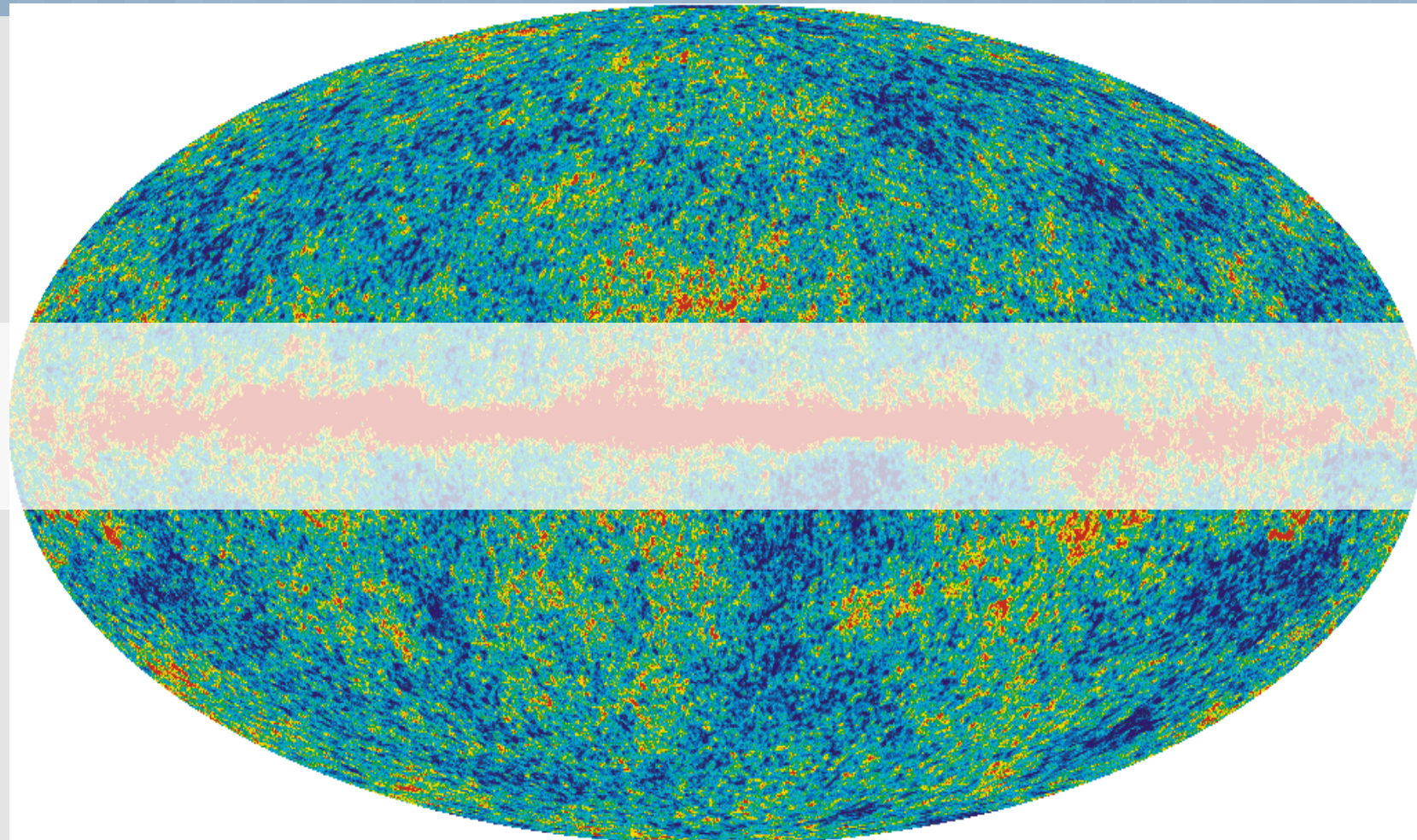


ガンマ線背景輻射の揺らぎ

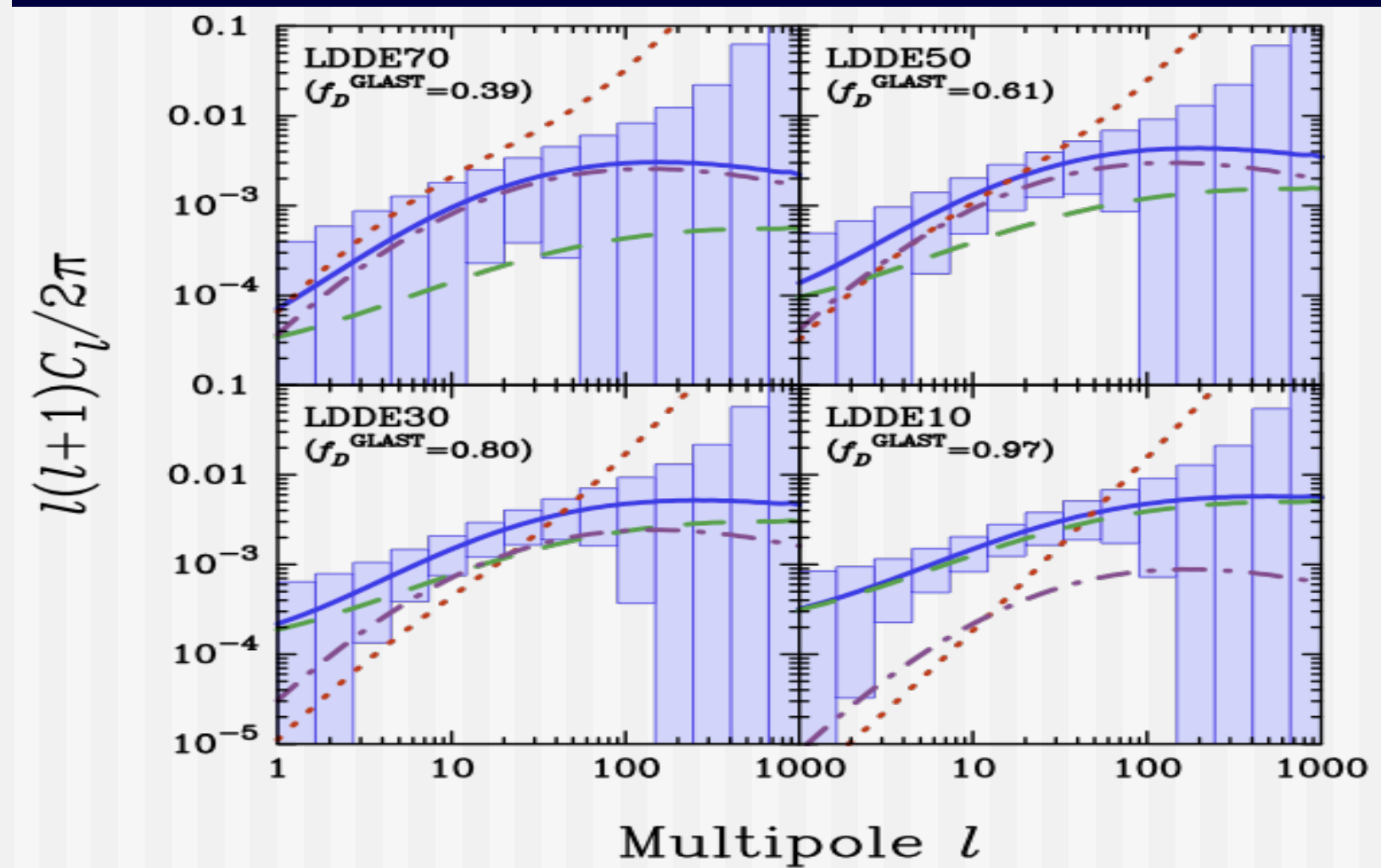
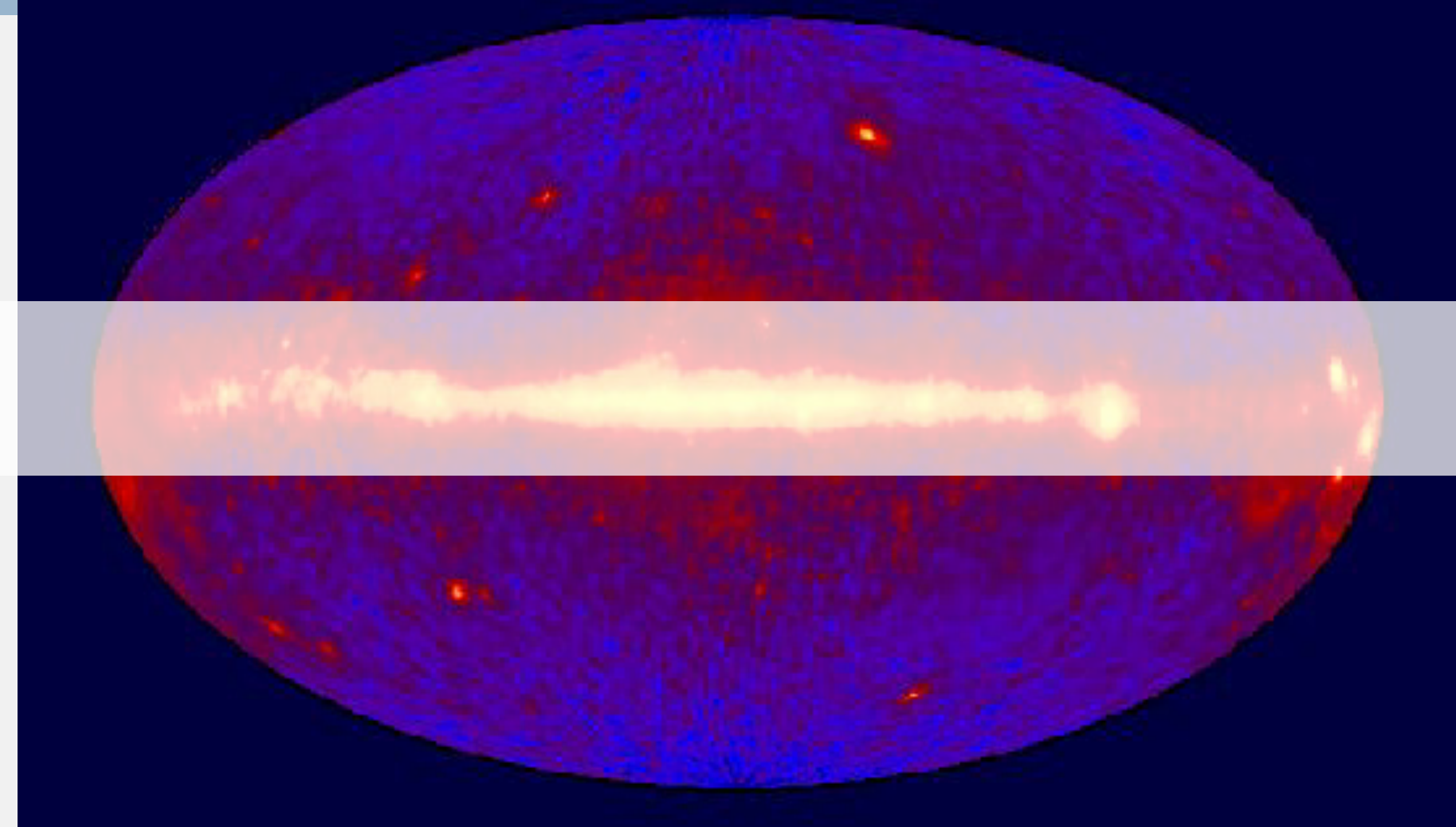
- **ハローは、大規模構造をトレースしている**
- よって、暗黒物質起源のガンマ線は、絶対に揺らぎを持っており、そのパワースペクトルの形は大規模構造のそれと似ているはずである。
- 我々の計算によれば、もし暗黒物質起源のガンマ線が全体の30%以上を占めているならば、ガンマ線背景輻射の揺らぎはFERMIで検出可能である。

FERMI = ガンマ線の“WMAP”？

WMAP 94GHz



EGRET All-Sky Gamma-Ray Survey Above 100 MeV



バリオンの起源：理論的課題

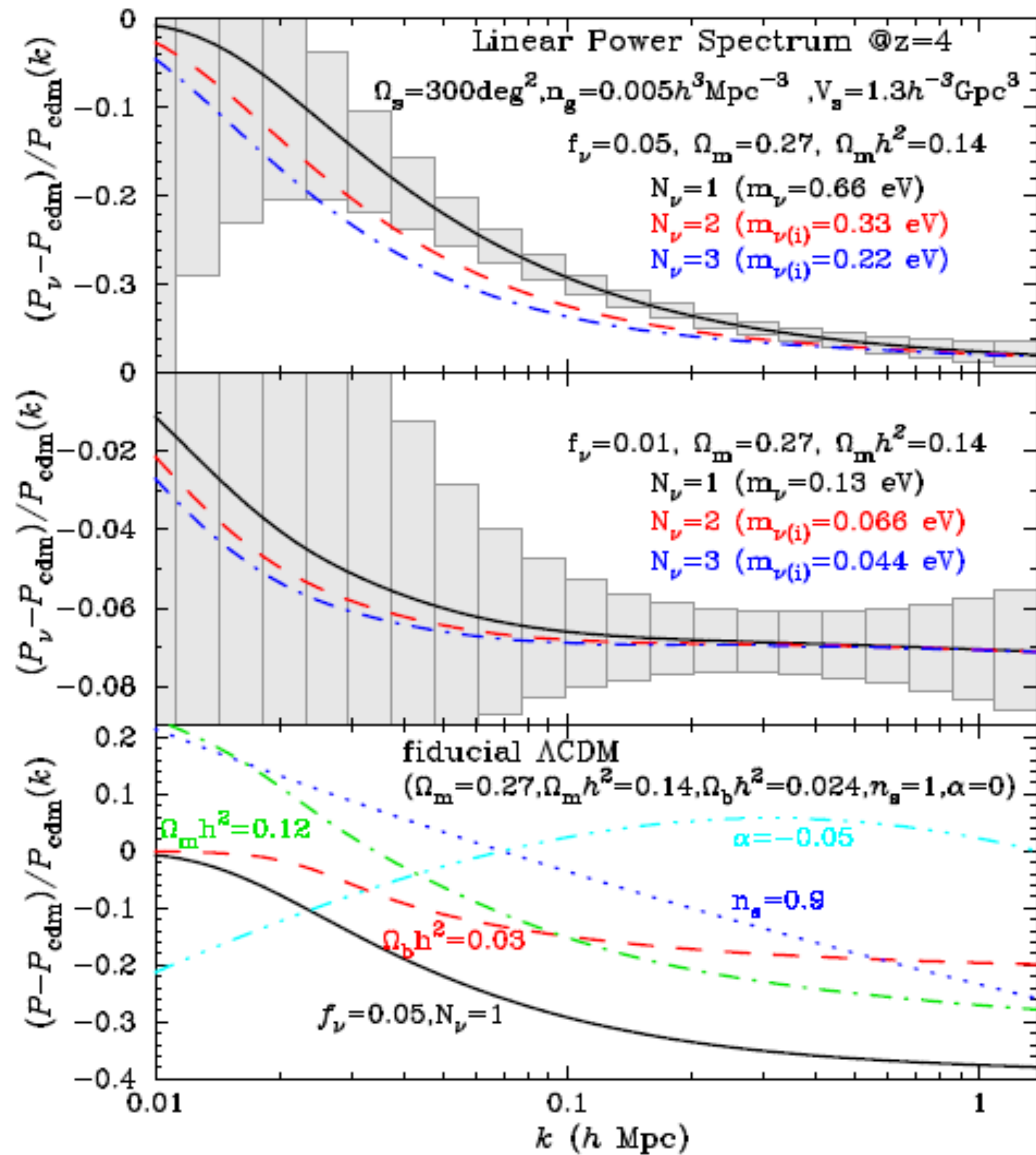
- バリオジェネシスの解明に向け、理論に求められる事は？
- **理論的には、完全に行き詰まっている！**
 - なぜ？実験データがなさすぎるため。
- 最も有望視されている福来—柳田理論（レプトジェネシス）の発展を押し進めるには、ニュートリノセクターの理解が必須。しかし、実験的に決定的に欠けているものがある。

バリオン物質の起源

- 直接的に実験で検証するのは困難なため、間接的データが必要。以下の二つは特に重要。
- **ニュートリノ質量**の絶対値の測定。
- **CP対称性の破れ**のパラメータ（小林-益川位相など）の精密測定。

ニュートリノ質量

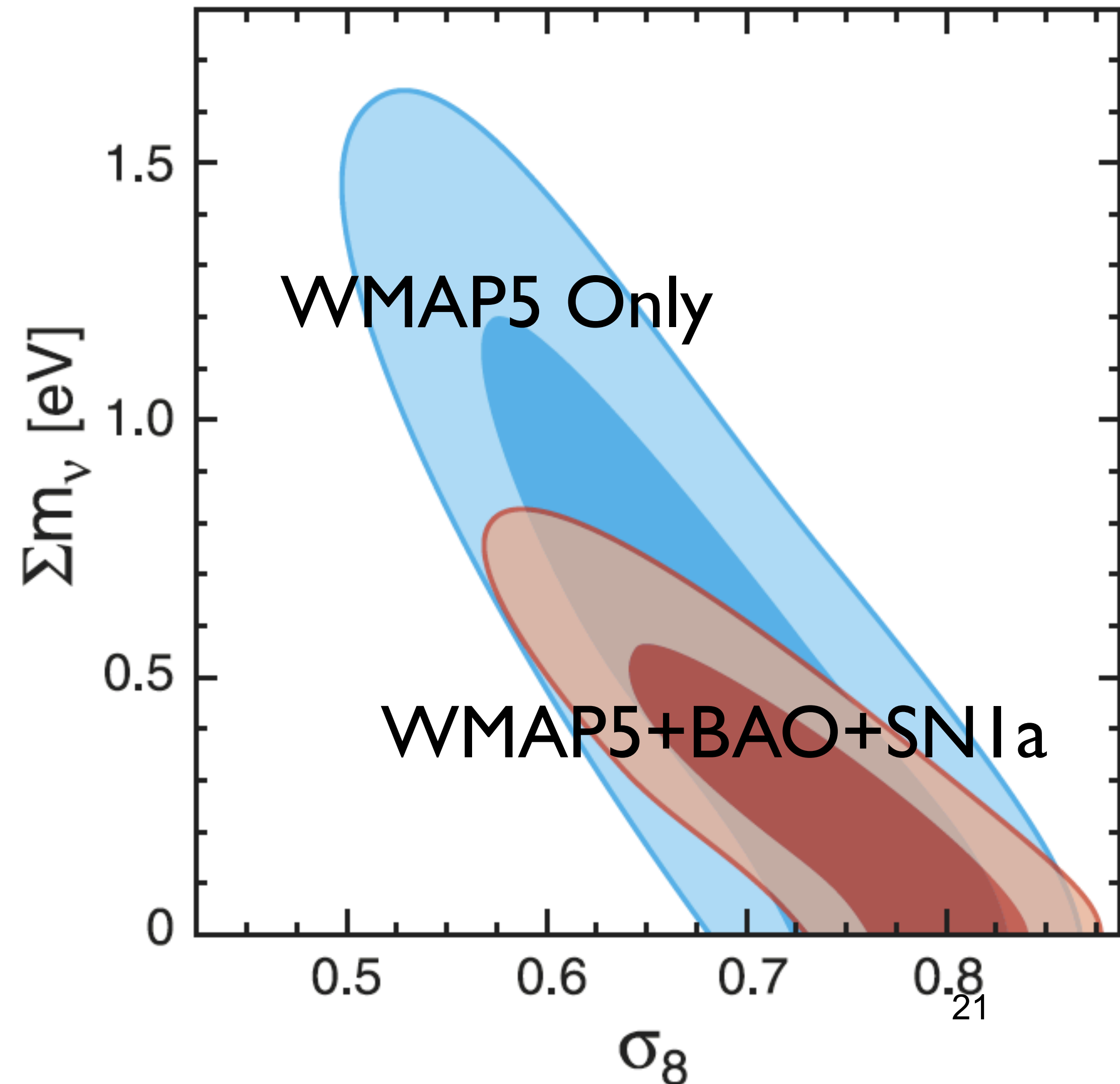
- 向こう10年、トリチウム β 崩壊では、電子型ニュートリノの質量を $\sim 0.2\text{eV}$ の精度で測定するのが精一杯 (KATRIN実験) ${}^3_1\text{T} \rightarrow {}^3_2\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
- 銀河のパワースペクトルを用いれば、ニュートリノ振動で得られている下限値 $\sim 0.05\text{eV}$ に迫る事が可能 (Takada, Komatsu & Futamase 2006)
- どうやってニュートリノによる効果とそれ以外の効果を分ける? この分野の理論的工作は始まったばかり (e.g., Saito et al. 2008)



- ニュートリノの質量密度と全質量密度の比, Ω_ν / Ω_m , に比例して、銀河パワースペクトルが小さくなる。
- この効果が効くスケールは、ニュートリノの速度分散と共形時間の積で決まる。
- 銀河サーベイで十分に測定可能、0.05eVも十分達成可能

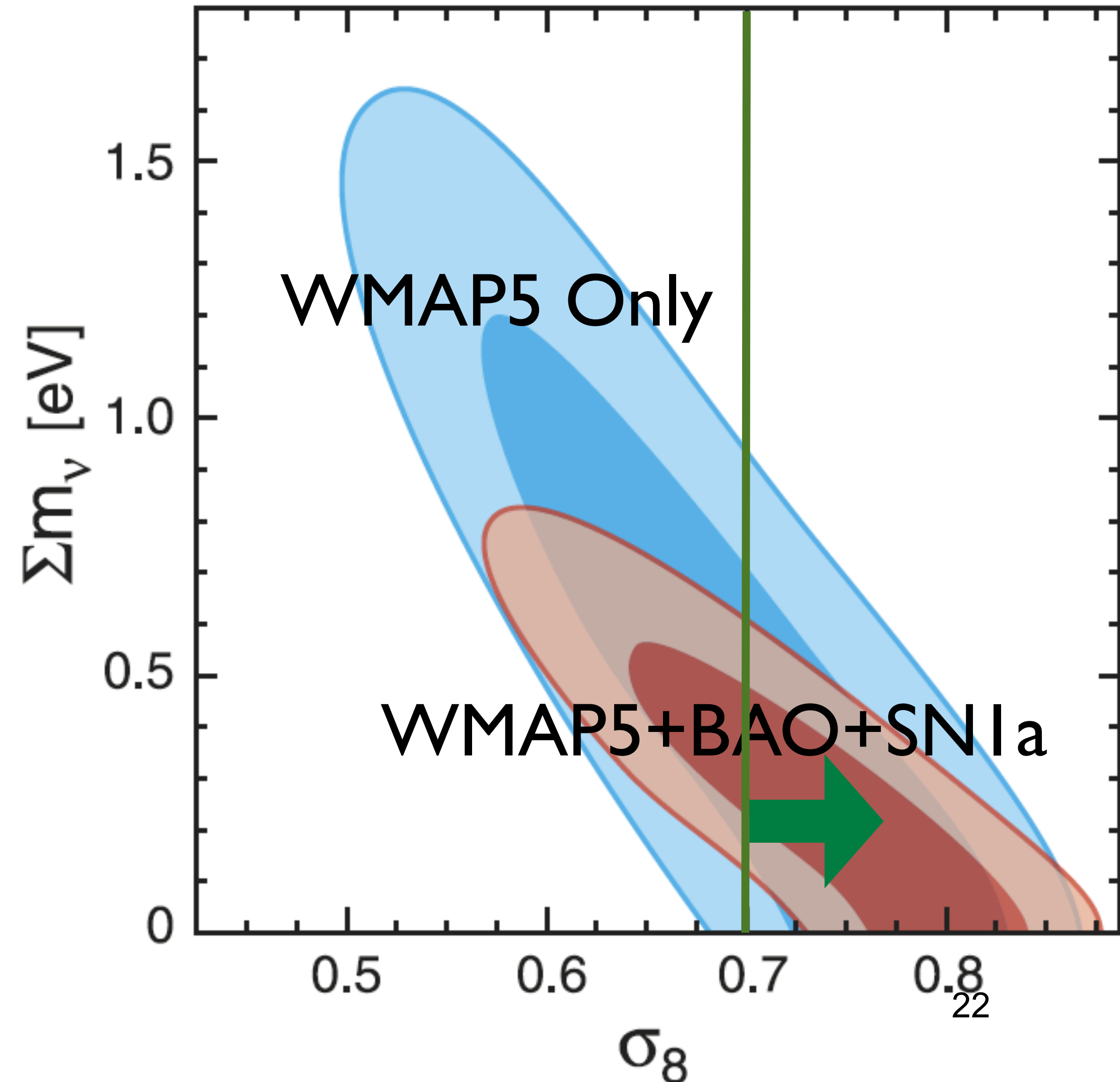
WMAP+距離測定より

- WMAPのデータのみでは
 $\Sigma m_\nu < 1.3 \text{ eV}$ (95%CL)
- WMAPのデータに近傍の距離測定(BAO, SNIa)を足すと
 $\Sigma m_\nu < 0.67 \text{ eV}$ (95%CL)
- 銀河パワースペクトルの減衰の効果は使っていない
(データも理論も不十分)



揺らぎの大きさの重要性

- 銀河パワースペクトルの減衰の効果の重要性は、次のようにも言い換えられる：
- ニュートリノ質量は現在の物質揺らぎの大きさ σ_8 を小さくする。従って、 σ_8 の下限値がわかれば、ニュートリノ質量への制限が強くなる。



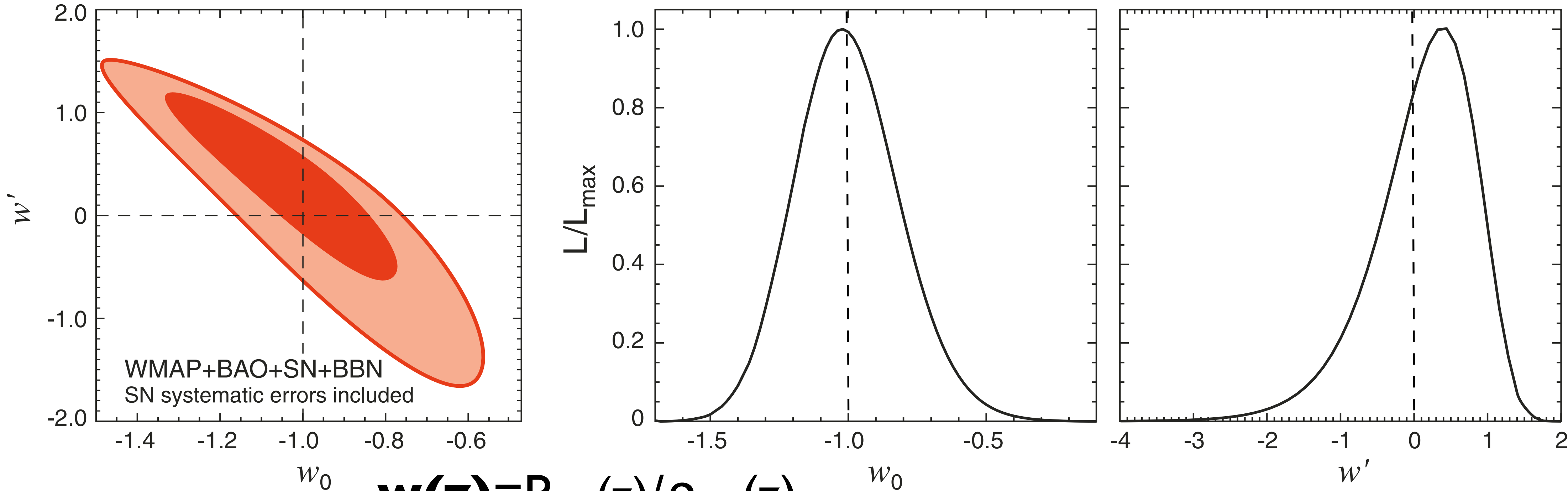
10～20年間に 解決すべき宇宙論問題

- 暗黒物質とは何か？
- **暗黒エネルギーとは何か？**
- **ビッグバンの起源は何か？**
- バリオン物質の起源は何か？

暗黒エネルギーの正体

- **宇宙の加速膨張の源**である暗黒エネルギーは、物質でなければ粒子でもない。その名前とは裏腹に、エネルギーですらないかもしれない！
- その効果は、過去および現在の**宇宙の膨張速度の進化**を通して測定するのが最も効果的。
- 膨張速度の進化は、たくさんの**超新星や銀河までの距離測定**を通して行うのが最も効率が良い。

暗黒エネルギー：観測的現状



$$\mathbf{w}(\mathbf{z}) = P_{\text{DE}}(\mathbf{z}) / \rho_{\text{DE}}(\mathbf{z})$$

$$= \mathbf{w}_0 + \mathbf{w}' \mathbf{z} / (1 + \mathbf{z})$$

- $w_0 = -1.00 \pm 0.19$ & $w' = 0.11 \pm 0.70$ (68%CL)
- w が一定とすると、 $w = -0.99 \pm 0.06$ (68%CL)

暗黒エネルギー：理論的課題

- 「暗黒エネルギーが何か」という問題への理論的研究は、完全に行き詰まっている。しかし！
- 最も重要な課題は「**なぜ真空のエネルギーが小さいのか**」あるいは「**なぜ真空のエネルギーが宇宙膨張に影響しないのか**」という問題。
- この問題から目を背けてはいけない。

暗黒エネルギー：理論的課題

- もう一つの理論的課題は、「いかにして暗黒エネルギーの正体を観測的につきとめる手法を編み出すか」 (i.e., JDEM をやるにあたって、最適なデザインは何か)
- 超新星？ Rest-frame近赤外の観測はどのくらい有効か？
- 銀河サーベイ？ 非線形性は理解できているか？
- 銀河団？ Self-calibrationなんて本当に信じていいのか？
- 重力レンズ？ 楽観視しすぎてないか？

ビッグバンの起源：

理論的課題

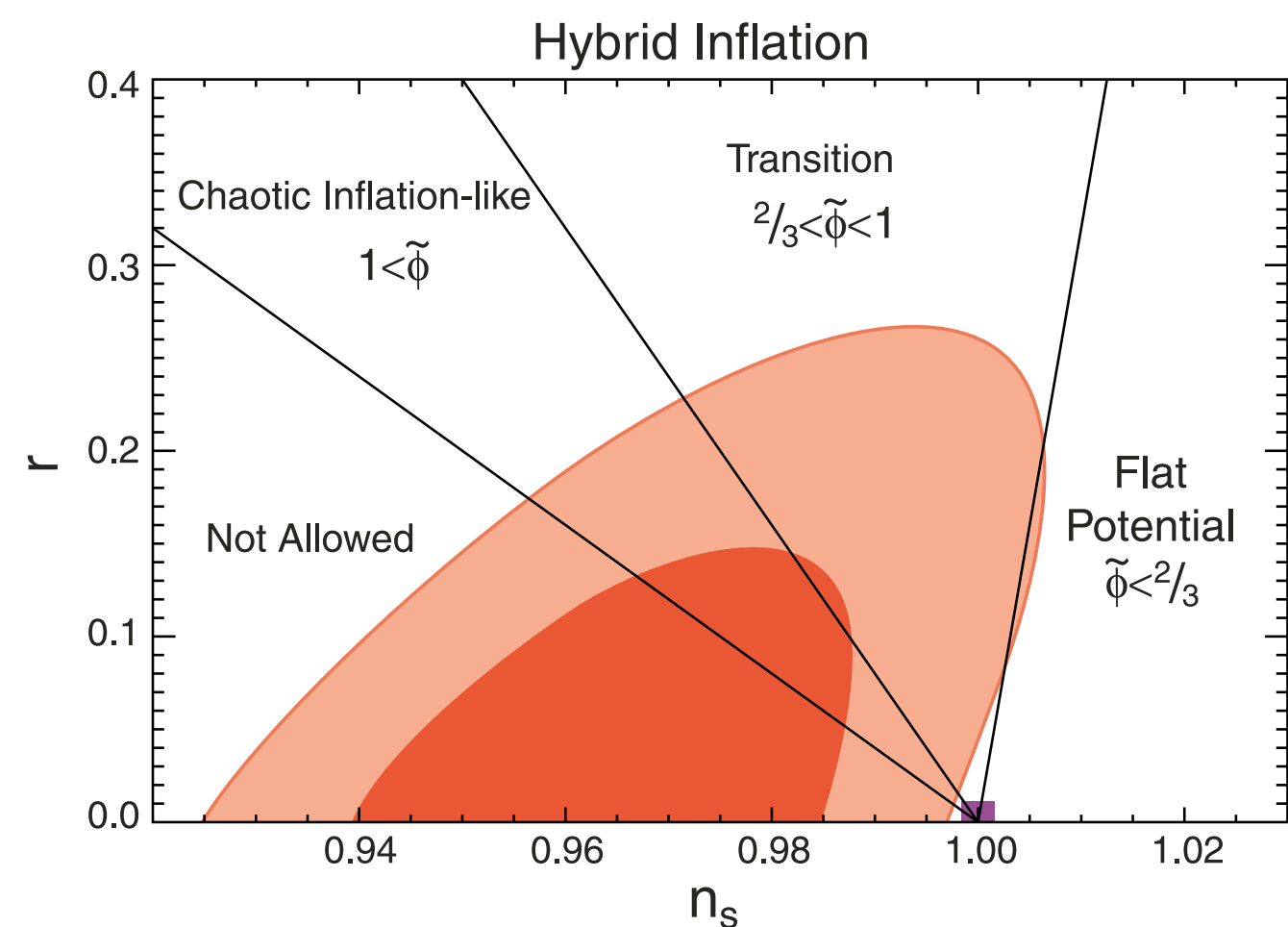
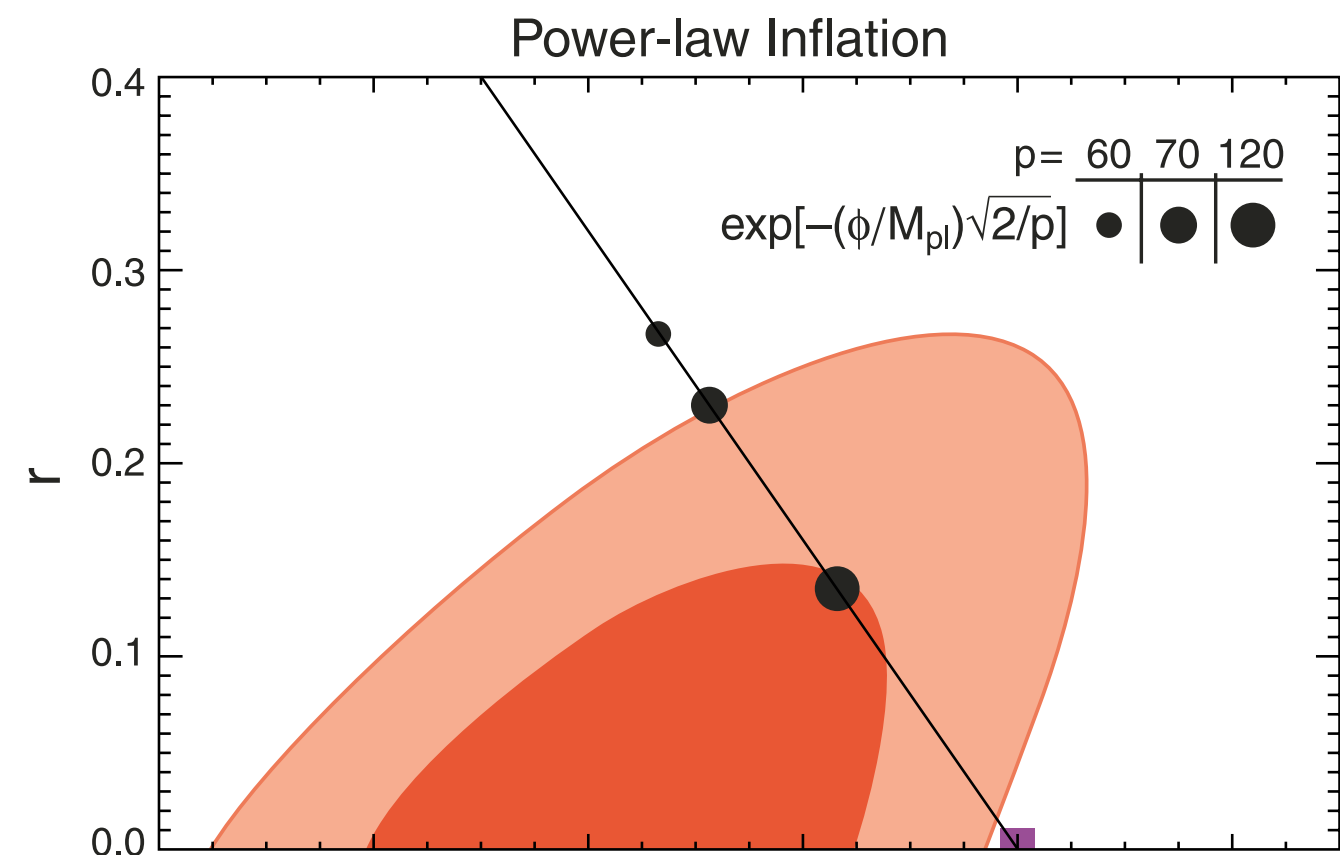
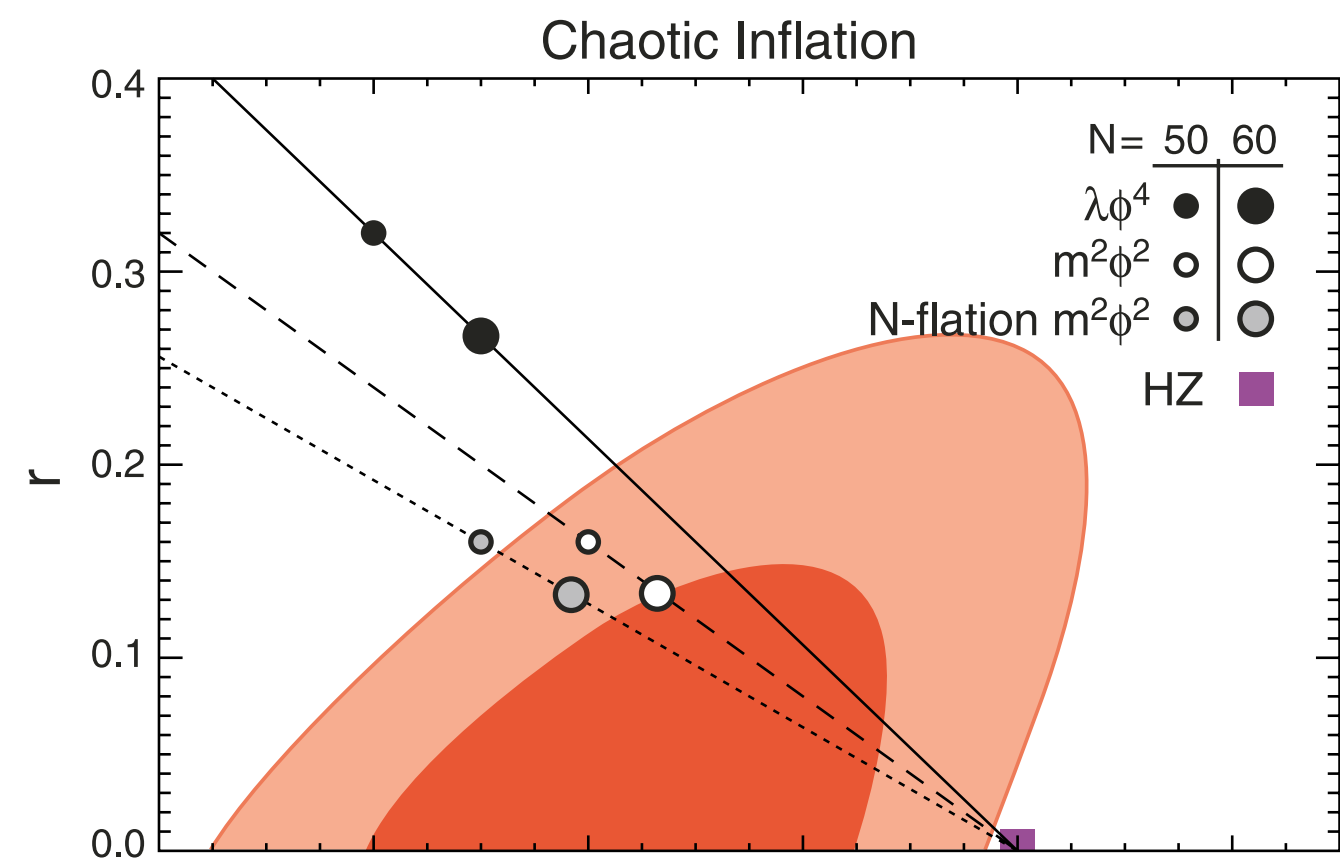
- まあ、要するにインフレーションの事です
- 流行は「ストリング理論からのインフレーション」、あるいは「原始重力波の大きいモデル」「非ガウス揺らぎの大きいモデル」を探す事
- どんな観測をすれば、我々の宇宙を記述するインフレーションを特定できるのか？

ビッグバンの起源：理論的課題

- **非ガウス性**を用い、インフラトンの相互作用を直接探る可能性：3点関数はほぼ終了。次は4点。
- **原始重力波**を使い、ビッグバン以前、およびビッグバンそのものの振る舞いが直接見える可能性：理論的に残された事ってあるか？あとは観測待ちなのでは？

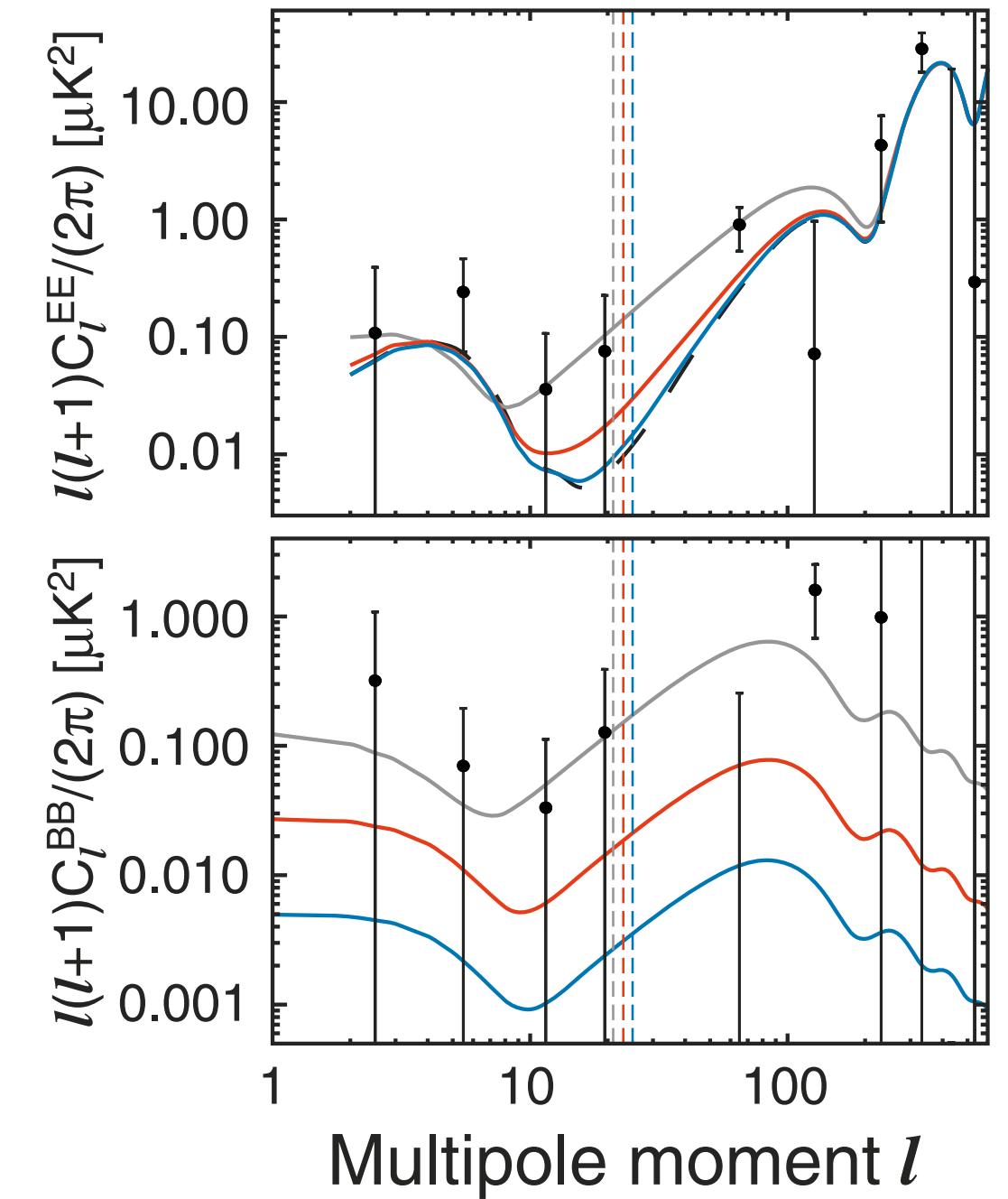
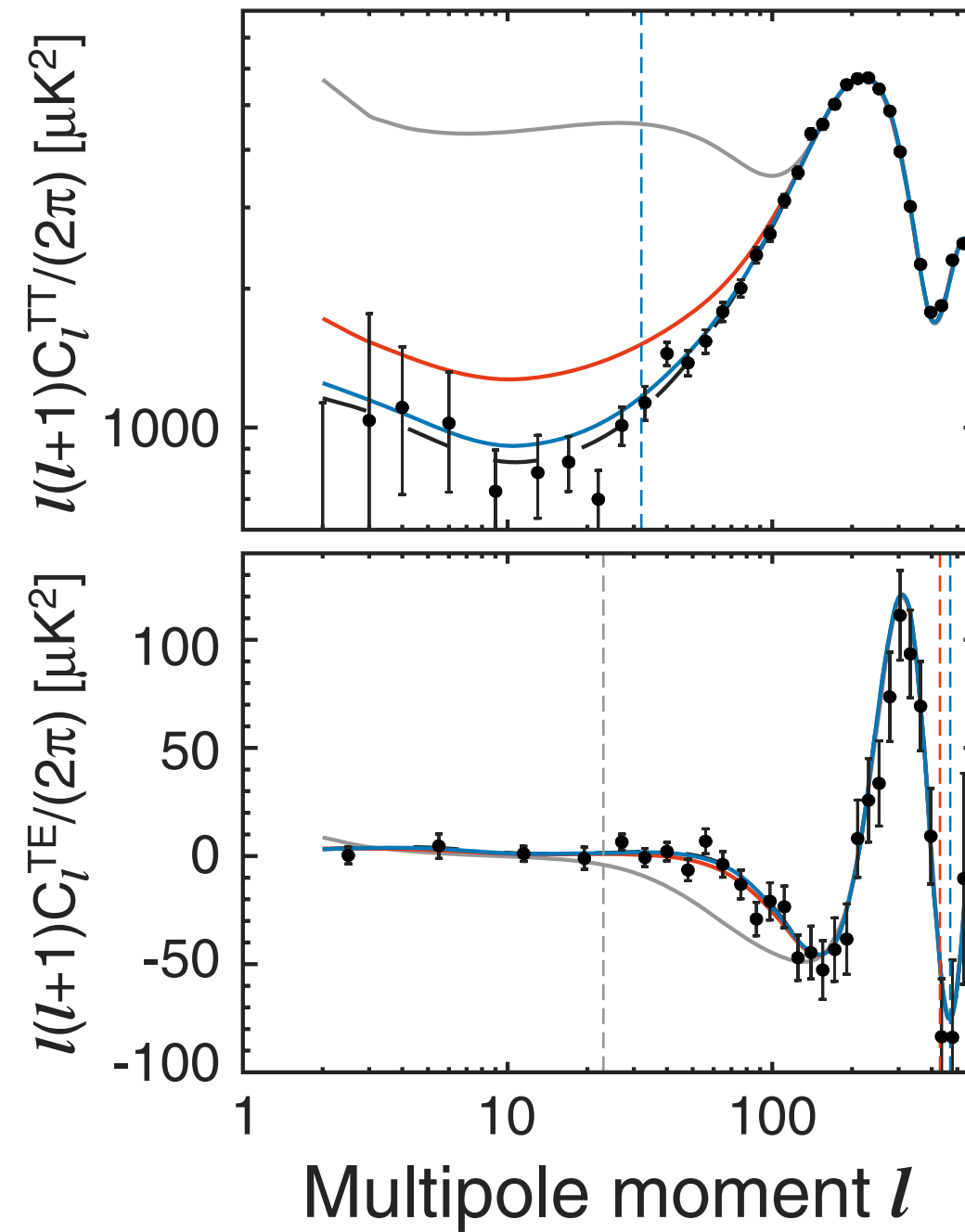
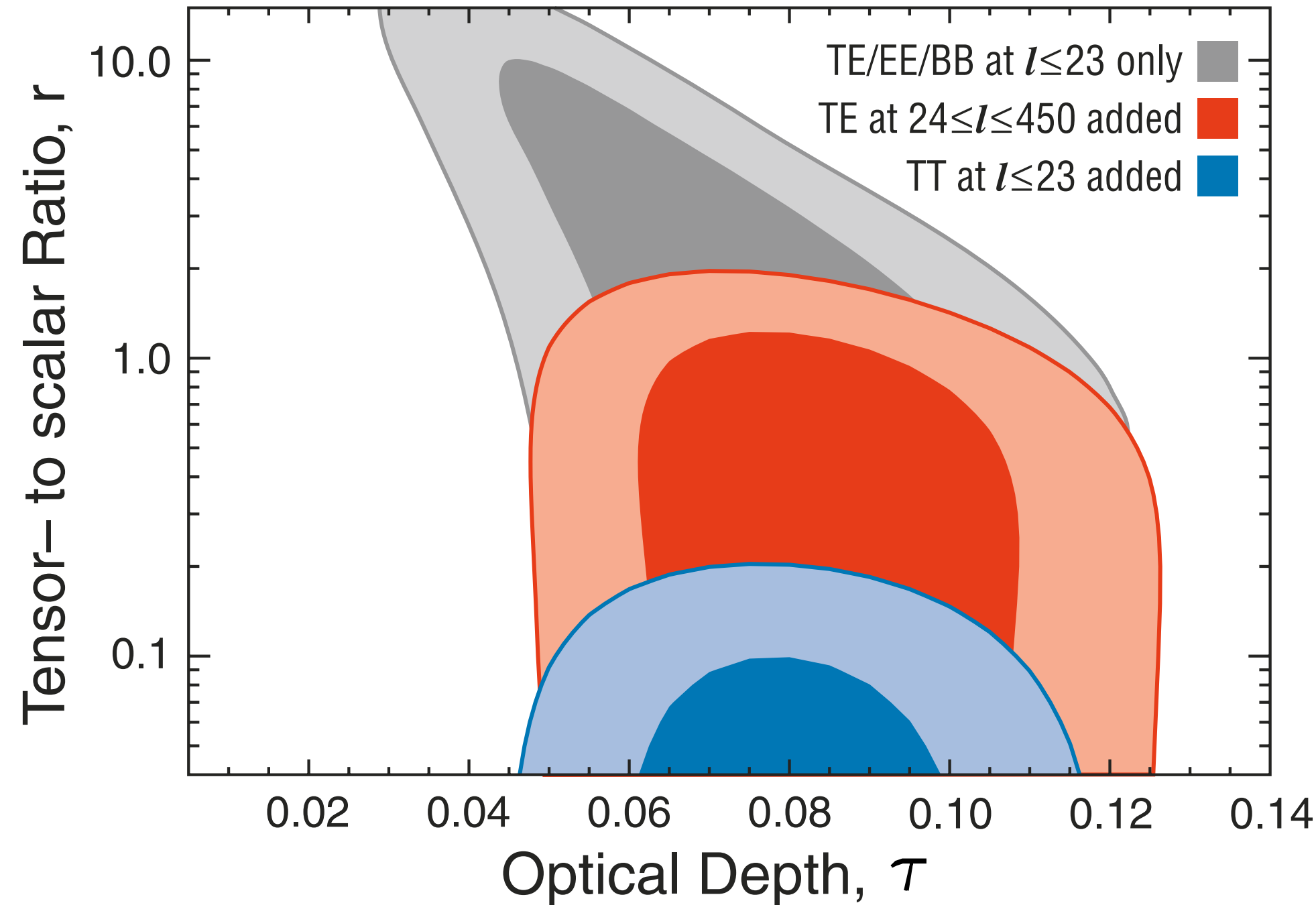
原始重力波：現状

- 重力波のパワーを密度揺らぎのパワーで割ったものを r とすると、
- **$r < 0.22$ (95% CL)**
- Planckはこれより4倍ほど良い制限を与える。



原始重力波とWMAP

Komatsu et al. (2008)



- もし n_s を固定すれば、
 - Low- l の EE と BB のみから $r < 20$ (95% CL); + high- l TE を足すと $r < 2$ (95% CL); + low- l TT を足すと $r < 0.2$ (95% CL)
- 従って、WMAP の制限は主に TT データに依っている。

これらの課題に最大公約数で 寄与できる単一観測手法

- **スペースからの銀河サーベイ @z=1-6**
- 非ガウス揺らぎへの感度はPlanckより良い
- 原始パワースペクトルの精度も $n_s \sim \alpha_s \sim 10^{-3}$ までいく
- ニュートリノ質量も0.05eVまでいく
- 暗黒エネルギーへの感度も抜群 ($D_A(z)$, $H(z)$, $G(z)$ の測定を通じて)
- 唯一できないのが原始重力波：でも、羽澄さんがやってくれるから

スペースからの 銀河サーベイと天文学

- **スペースからの銀河サーベイ @ $z=1-6$**
- 天文コミュニティにとっても重要なデータを提供する
 - 星形成率の精密測定 @ $z=1-6$ 、など
- スペクトル観測のみにするか？ イメージングも入れるか？
- イメージングを入れた方が天文コミュニティは嬉しいが、コストがかさむ問題

欧米の流れ

- **暗黒エネルギーの正体、およびビッグバンの起源の解明**に特化して、欧米の観測計画の流れを概観してみる。
- アメリカ合衆国：Beyond Einstein Missions
- ヨーロッパ連合：Cosmic Vision

Beyond Einstein Missions

- 2017年打ち上げを目指した、衛星観測計画。
- **Joint Dark Energy Mission (JDEM):** 暗黒エネルギーの解明
- **Inflation Probe:** ビッグバンの起源の解明
- 両者ともに千億円規模

Beyond Einstein Missions

- 2017年打ち上げを目指した、衛星観測計画。
- **Joint Dark Energy Mission (JDEM):** 暗黒エネルギーの解明 (採択済)
- **Inflation Probe:** ビッグバンの起源の解明
- JDEMは混迷の一途を辿っている。予算 (800億円) では到底無理そう。

Cosmic Vision

- 2015 - 2025年に実現すべき衛星観測計画。
- **DUNE, SPACE:** 暗黒エネルギーの解明
- **B-Pol:** ビッグバンの起源の解明

Cosmic Vision

- 2015 - 2025年に実現すべき衛星観測計画。
- **DUNE+SPACE=EUCLID:** 暗黒エネルギー (採択済)
- **B-Pol:** ビッグバンの起源の解明
- ただし、特筆すべきは来年打ち上げ予定の宇宙マイクロ波背景輻射観測衛星**Planck**。

なんとなく

- なんか、ごちゃごちゃやってるけども
- 結局、（LISAみたいに）JDEM+EUCLID = 欧米のジョイント計画となっていて、（LISAみたいに）いつまでたっても打ち上がらない、という結果になる可能性は、低くないと思う

日本主導の衛星計画？

- 暗黒エネルギー探査： **スペース銀河サーベイ**
- ビッグバンの起源探査： **LiteBIRD** (羽澄さん)

まとめ

- 宇宙論の重要課題は（任意の順番で）
- 暗黒物質, 暗黒エネルギー, インフレーション, バリオジェネシス
- 基本的理論研究も重要だが、**「どうやったら観測的に実証できるか」「新しい観測手法は何か」**という視点はますます重要になってくる
- ブレイクスルーをもたらす観測手法を考えるのも、理論の重要な役割

テキサス大学オーステイン

Center for Cosmology

- 来年一月より始動！

Research Unit, Center for Cosmology

Astronomy

Volker Bromm

Karl Gebhardt

Gary Hill

Eiichiro Komatsu(Director)

Milos Milosavljevic

Paul Shapiro

Physics

Duane Dicus

Jacques Distler

Willy Fischler

Vadim Kaplunovsky

Sonia Paban

Steven Weinberg