

CMBの重力レンズを利用したニュートリノ質量の制限: 現状と今後の課題

並河 俊弥

2012年2月26-28日@伊豆

1. 背景

● 宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

宇宙の進化の初期段階では、光子が電子に散乱され、一種のプラズマを形成している。次第に宇宙の温度が冷えると電子は陽子に捕獲され、光子が自由に進めるようになる。この時期を「宇宙の晴れ上がり」と呼ぶ。宇宙マイクロ波背景輻射 (Cosmic Microwave Background, CMB) とは、この時期から自由に進めるようになった光を地球で観測したものである。COBE、WMAPなどのCMB精密観測により、宇宙の姿が明らかとなってきた。

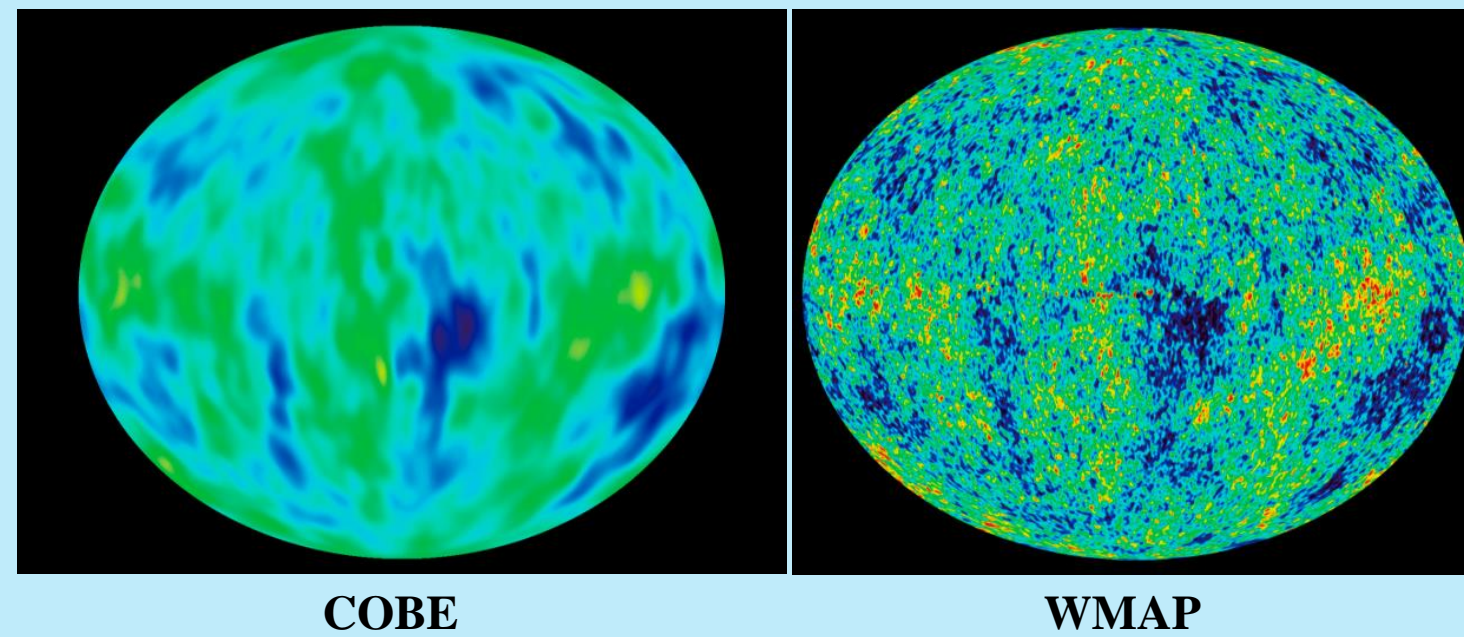
● 宇宙の構成要素

CMB、Ia型超新星などの観測を組み合わせた結果、宇宙の全エネルギー密度の9割以上は、物理的起源の不明な「ダークエネルギー」や「ダークマター」で占められ、我々に馴染みのある物質はわずか数%だと分かった(右図)。現在の宇宙論では、ダークエネルギーやダークマターの物理的起源を明らかにすることが大きな目標の一つとなっている。

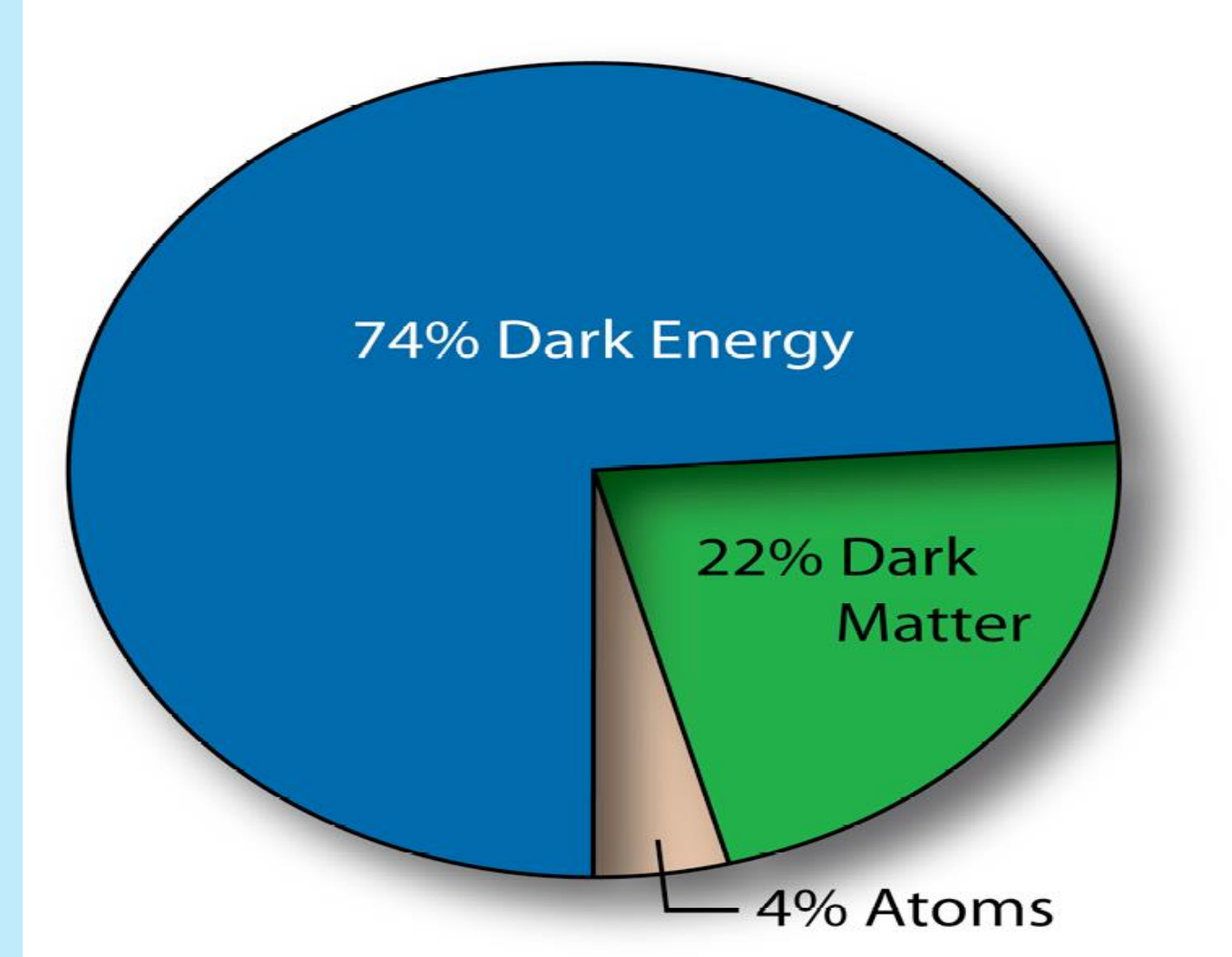
● ニュートリノの質量

ニュートリノ振動実験からニュートリノの質量の自乗差に制限がつけられており、この結果からニュートリノの質量の総和はゼロでないことが分かっている ($\sum m_\nu > 0.05$ eV, M.Maltoni et al 2004)。ただし自乗差しか分からないため、個々のニュートリノの質量は測定できない。一方で、宇宙に質量をもつニュートリノが存在すると、宇宙の膨張率や構造形成などに影響を与える。これを利用することで、宇宙論的観測からニュートリノ質量を制限することができ、現在、 $\sum m_\nu < 0.4 - 0.7$ eV (95% C.L., E.Komatsu et al 2011, B.Reid et al 2010) 程度の上限が得られている。将来的には、宇宙論的観測だけからニュートリノ質量和の値を決めることができると期待されている。

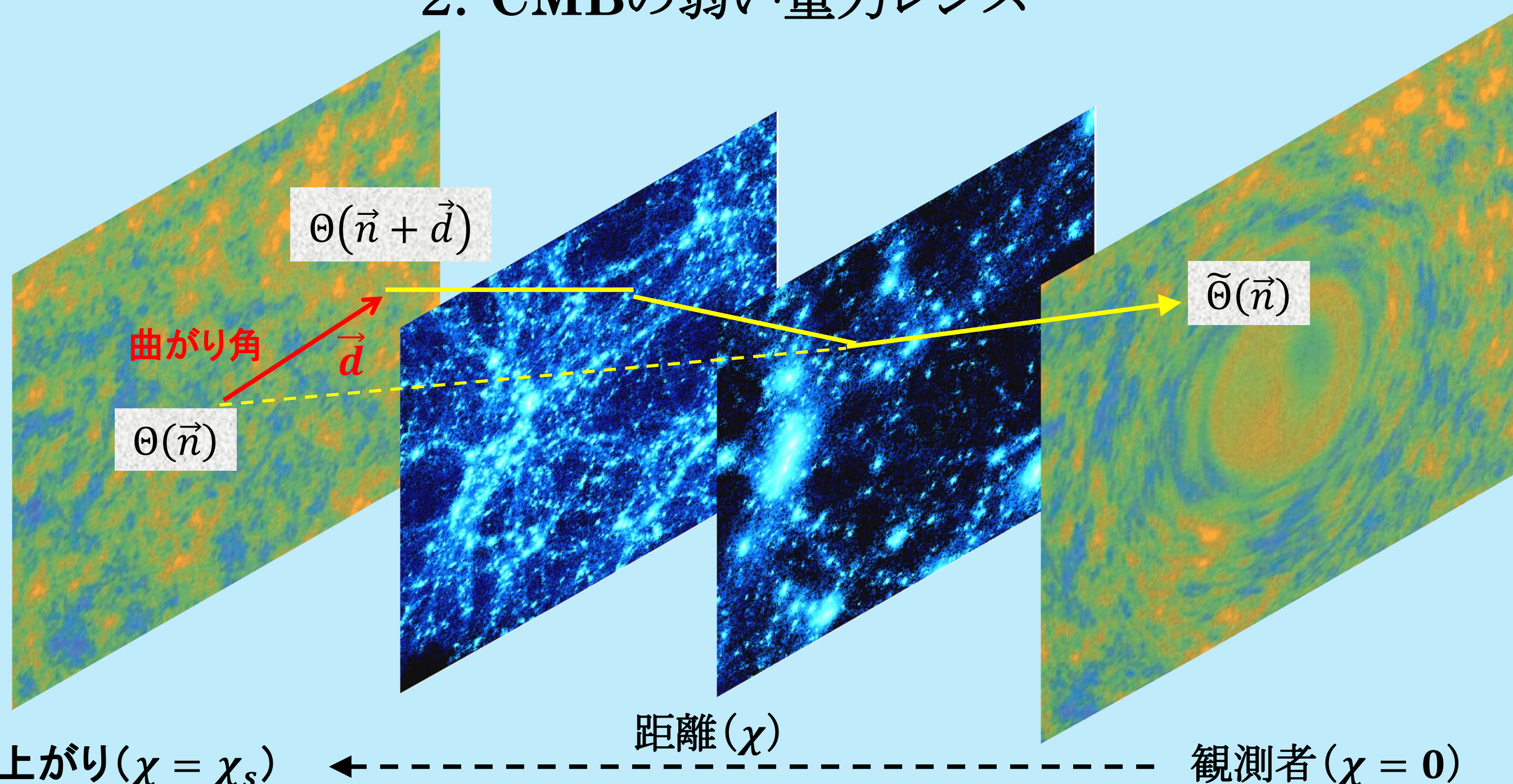
CMBの温度揺らぎのマップ (LAMBDA より引用)



各成分がもつエネルギー密度の、全エネルギーに対する割合



2. CMBの弱い重力レンズ



● CMBの弱い重力レンズ効果 Review: Lewis&Challinor'06, Hanson+'10

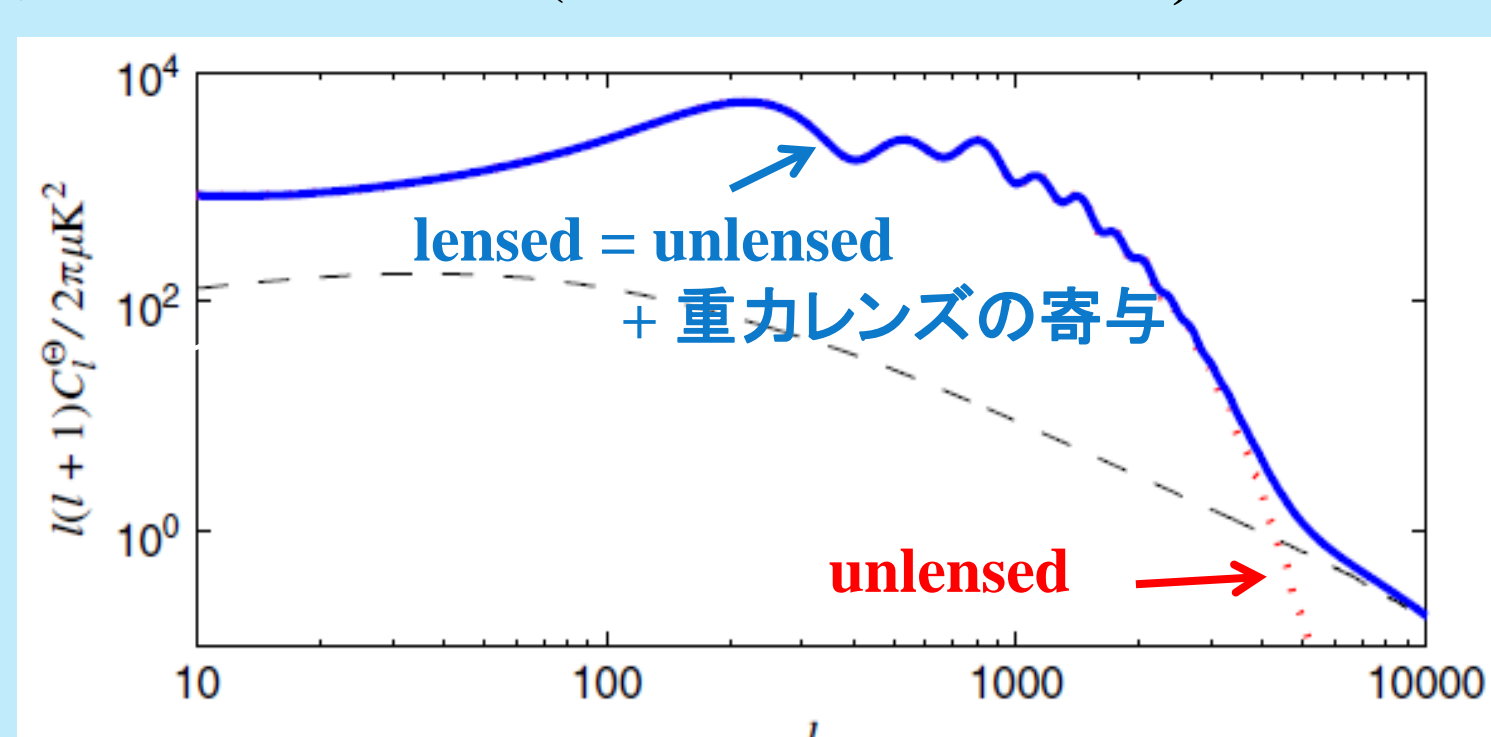
宇宙の晴れ上がりで自由に進めるようになった光は、我々に観測されるまでの間にさまざまな効果を受ける。その一つである重力レンズ効果は、宇宙の大規模構造が作る重力場によって光の軌跡が曲げられ、結果としてCMBの揺らぎのパターンが歪められることである。

● 角度パワースペクトル

揺らぎはある確率に従って生成されるため、その分散などの統計量を調べることに意味がある。宇宙論において頻繁に用いられる統計量として、調和空間での分散である、角度パワースペクトルがある。

$$\tilde{\Theta}(\vec{n}) \xrightarrow{\text{球面調和関数で展開}} \tilde{\Theta}_{\ell m} = \int d\vec{n} Y_{\ell m}^*(\vec{n}) \tilde{\Theta}(\vec{n}) \xrightarrow{\text{統計平均をとる}} \langle \tilde{\Theta}_{\ell m} \tilde{\Theta}_{\ell' m'}^* \rangle = \delta_{\ell\ell'} \delta_{mm'} \tilde{C}_{\ell}^{\Theta\Theta}$$

重力レンズを受けた角度パワースペクトル (Lewis & Challinor '06)



温度揺らぎにおけるレンズの寄与: $\ell > 2000$ (~数arcmin)

→ 重力レンズの寄与を見るには、数arcmin 以上の角度分解能が必要

3. CMBの弱い重力レンズ: 曲がり角再構築の現状

● 曲がり角再構築の方法

CMBの重力レンズ効果を引き起こしている曲がり角を取り出す方法として、重力レンズが生み出す揺らぎの非等方性に着目したものがある (Hu&Okamoto'02)。この方法に基づき、レンズを受けた揺らぎのマップを用いて曲がり角を再構築することができる。

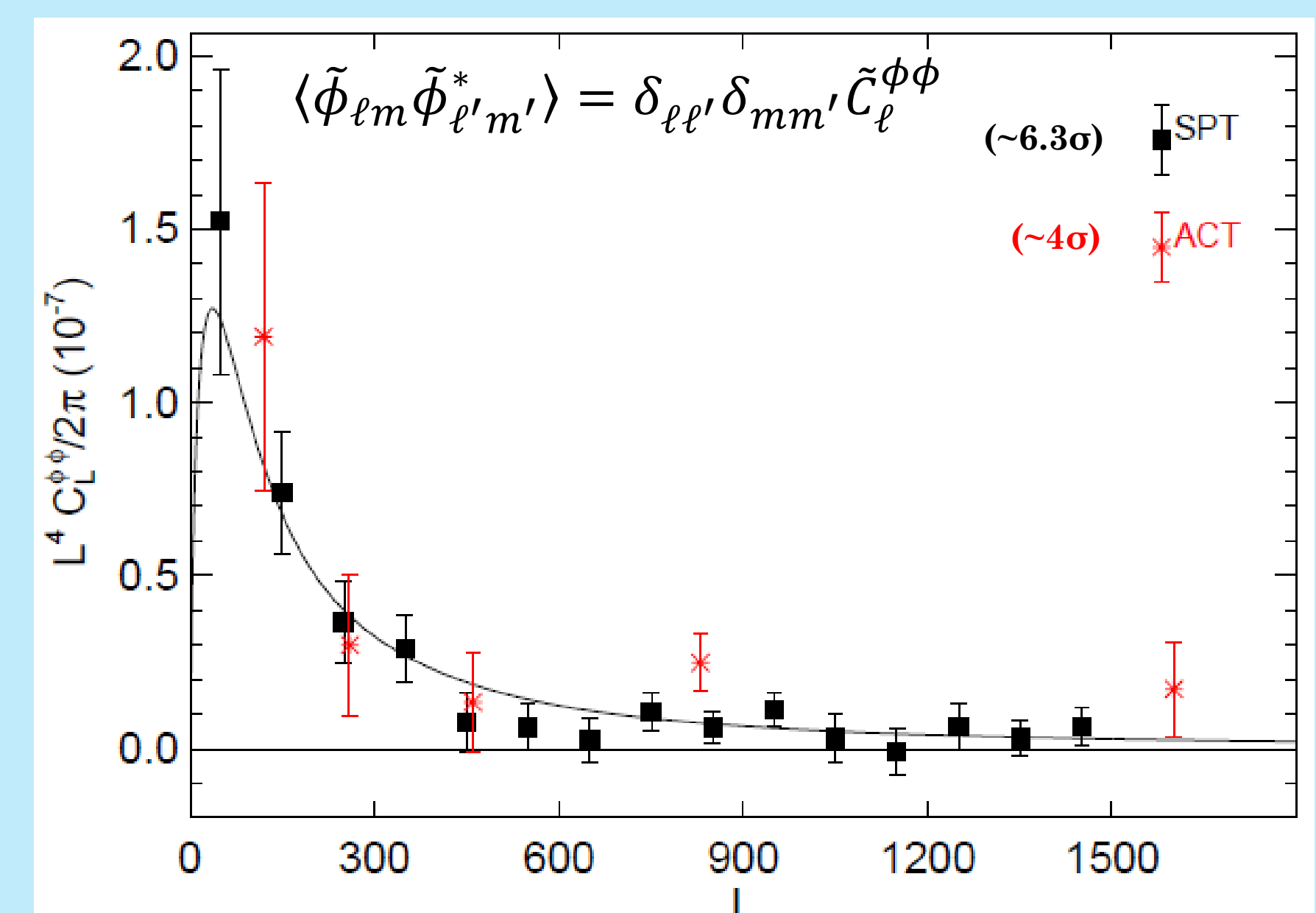
$$\hat{d}_{\vec{\ell}} = N_{\vec{\ell}} \int d^2\vec{L} \frac{\vec{\ell} \cdot \vec{L} C_L^{\Theta\Theta} + \vec{\ell} \cdot (\vec{\ell} - \vec{L}) C_{|\vec{\ell}-\vec{L}|}^{\Theta\Theta}}{2\tilde{C}_{\vec{\ell}}^{\Theta\Theta} \tilde{C}_{\vec{L}}^{\Theta\Theta}} \tilde{\Theta}_{\vec{L}} \tilde{\Theta}_{\vec{\ell}-\vec{L}}$$

● 曲がり角再構築の現状

CMBの重力レンズによる曲がり角はつい最近まで測定できなかったが、去年から今年にかけ、より細かいスケールの揺らぎを測定可能な地上の望遠鏡であるACT、SPTそれぞれで検出された。

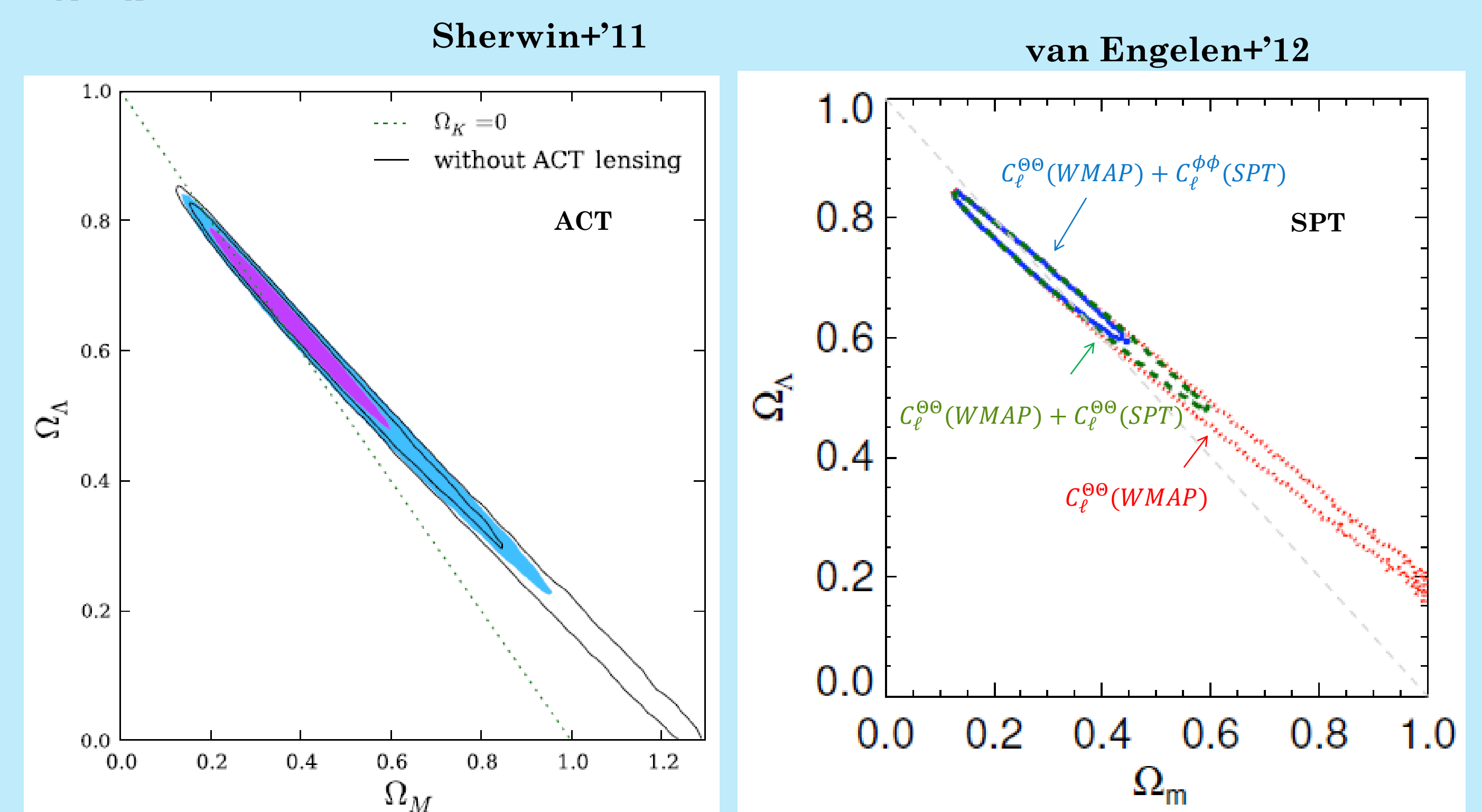
➤ Das+'11 WMAP-7yr + Atacama Cosmology Telescope (ACT)

➤ van Engelen+'12 WMAP-7yr + South Pole Telescope (SPT)



● 宇宙モデルの制限

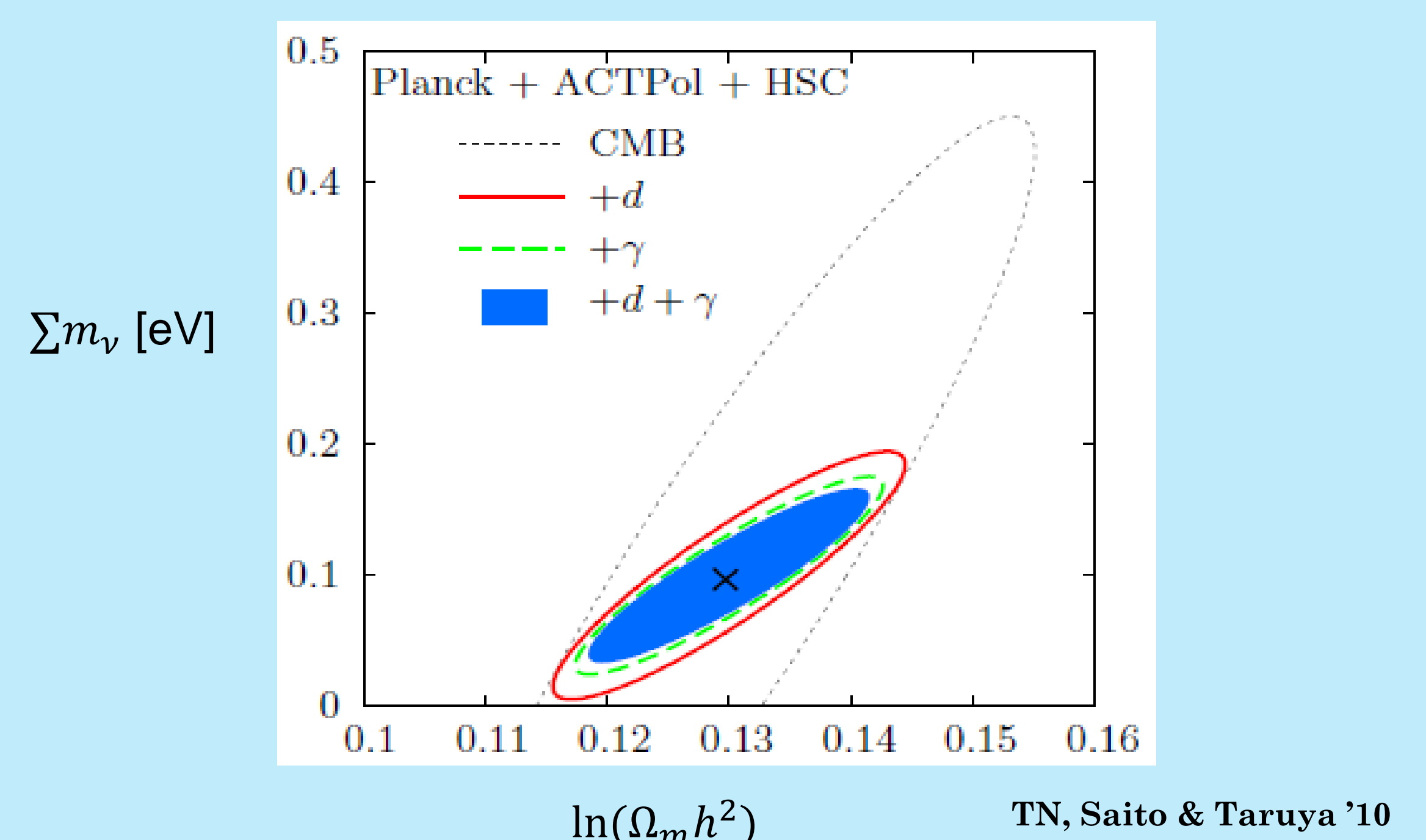
CMBの揺らぎだけを用いて宇宙モデルの制限を行うと、パラメータどうしが縮退し、制限が弱くなる。CMBの測定では、CMBの揺らぎだけでなく重力レンズを引き起こしている重力場の情報も得られるので、パラメータどうしの縮退を解きやすくなり、制限が改善する可能性がある。以図は、物質、ダークエネルギーのエネルギー密度の割合 (Ω_M, Ω_Λ) への制限。



4. CMBの弱い重力レンズ: 将来の展望

● CMBの弱い重力レンズを用いたニュートリノ質量への制限

ニュートリノ質量は、宇宙の構造形成に影響を与えるため、重力場を通じて曲がり角の角度パワースペクトルにも影響を与える。レンズ効果を見ることで、CMBの観測だけから、パラメータの縮退を解きつつニュートリノ質量への厳しいを与えられると期待できる。下図は、現在観測中のPLANCK、およびACTPolのデータを想定した場合に予想される、ニュートリノ質量への制限強さを表す。ただし、中心値は0.1eVとした。



PLANCK、ACTPolから得られるデータを組み合わせることで、Subaru-HSCの銀河サーベイから得られる弱い重力レンズからの制限と同程度となる。