

非一様宇宙モデルの RBAO を用いた検証  
J.P.Zibin,A.Moss,and D. Scott,2008 Phys. Rev. Lett.  
101,251303 のレビュー

大阪市立大学 M1 宇野竜矢

2010 年 8 月 31 日

目次

1	非一様宇宙モデル	2
2	バリオン音響振動 (BAO) について	2
3	まとめ	3

# 1 非一様宇宙モデル

いま、標準宇宙モデルでは観測を説明するためにダークエネルギーを必要としている。ダークエネルギーというのは今の宇宙のエネルギーの大半を占めるエネルギーで、負の圧力をもっているとおもわれていて、正体はまだ判明していない。このダークエネルギーを用いずに観測を説明しようとするアプローチの一つが非一様宇宙モデルである。

現在このダークエネルギーの問題に対するアプローチが三つある。それらは宇宙原理(宇宙は一様等方である。)が成り立つかどうかと一般相対論が大域で成り立つかどうかで分類される。

- ・宇宙原理を認め一般相対性理論が大域でも成り立つとする標準宇宙モデル。
- ・宇宙原理は認めるが大きな領域では一般相対論は修正を受けると考える修正重力理論。
- ・大きな領域での一般相対論は認めるが宇宙原理が成り立っていないのだと考える非一様宇宙モデル。

今回の発表で扱ったのは、広い範囲をみたとき宇宙は非一様であるとする、非一様宇宙モデルである。

今回の論文で用いられていた非一様モデルは時空は LTB 時空だとするモデルである。LTB 時空とは球対称なダスト(圧力の無視できる非相対論的物質)からなる時空である。ここで球対称性を課したのは、CMB の観測から時空はほぼ球対称だということがわかっているからである。われわれの地球はその時空の中心付近にいると考える。そして地球の周りは比較的低密度のボイド領域になっていて、その外側に高密度の領域があるとする。こうしておくことによって、観測の加速膨張が高密度側に低密度領域の星がひかれているとして説明される。

ここで、モデルをどのように検証するかというと、別々の観測事実を説明して説明できなくなったらモデルは使えなくなる。という形で検証を行っていく。今回の論文では CMB の観測と SNIa の観測によって制限がかけられた密度で RBAO の観測が説明できるかということを試している。

## 2 バリオン音響振動 (BAO) について

ここで今回の論文で制限をかけるのに用いていた BAO について簡単に説明をする。制限をかけるのに BAO を用いるのは数学的な取扱いが比較的簡単なので BAO を用いる。BAO とは晴れ上がり以前に光子とバリオンの混合流体中で起こっていた音波振動モードのことをいう。簡単にいえば、バリオンの重力によって混合流体の密度が上がるのだが、ある程度までいくと光子との散乱による圧力が重力に勝って密度が薄まる方向に向かう。この過程が繰り返されることで振動モードが発生する。数学的に取り扱うには、ボルツマン方程式とエネルギー保存の式を連立させて解く。

解くと結果として密度がコサイン型の振動をしていることがわかる。またその振動が混合流体の音速に依存していることもわかる。後述の図の  $k$  はフーリエ展開の波数で、 $\eta$  は共形時間である。またこの解は一様等方をバックグラウンドの時空に仮定しており、考えている非一様モデルも晴れ上がり以前は一様だったと考えているのでこの解をそのまま用いている。

BAO は晴れ上がると同時に一斉に光子とバリオンの相互作用が切れたと仮定して、そこでストップすると思うことにする。そうすると、そのときの密度分布を保ったまま現在まで宇宙膨張、つまりは計量の変化による波長の伸びのみで BAO の特徴的なスケールつまり、波長が成長していることになる。それが CMB や銀河分布の観測を通じて見つかっていて、その特徴的なスケールは  $100h^{-1}Mpc$  である。

成長の仕方は計量によるので BAO スケールは非一様宇宙モデルと標準宇宙モデルで違う成長の仕方を示す。標準宇宙モデルでは場所によらず同じようにスケールの成長がおこる。しかし、非一様宇宙モデルではその非一様性から動径座標の場所によって違う成長をしめす。

次に RBAO(動径方向の BAO) について説明する。RBAO とは動径方向に振動していたと考えられる BAO スケールを測定することをいう。実際どのように観測するかというと SDSS のような銀河サーベイのデータである動径方向に一定の幅をもった帯を考えて、その中で動径方向のみの相関をとって観測を行う。

RBAO の観測データは 2 点しかないがそれを用いてフィットしたのが最後の図で青色の線が標準宇宙モデル、黒い実線が CMB と SNIa にベストフィットするような LTB のモデル。緑色の点線が CMB と SNIa を説明しつつ RBAO のデータにベストフィットできる線になっている。左右の図は左が宇宙初期の密度分布の平均からのゆらぎ  $\delta\rho_i$  に対して

$$\int \delta\rho_i r^2 dr \leq 0 \quad (1)$$

という制限を課したもので、右が制限のない場合である。制限しているほうは  $\Delta\chi = 16$ 、していないほうは  $\Delta\chi = 9.8$  となっている。今のところ一応説明できているのだがもうすこし  $z$  が大きいところでの観測データができればこのモデルが今後も使えるかどうかかわかりそうである。

### 3 まとめ

- ・非一様宇宙モデルは宇宙のダークエネルギー問題を解決するためのアプローチの一つ。
- ・BAO(バリオン音響振動) は晴れ上がり以前にあった光子バリオン混合流体の音波振動モード。
- ・今回の論文に書いてあったモデルは RBAO の観測を説明できたが、さらに測定点が増えたときに説明できるかどうかはわからない。

・非一様宇宙モデルを考える理由

ダークエネルギー問題への1つのアプローチ

ダークエネルギー：一様等方宇宙の加速膨張を説明するために必要なもの負の圧力を持つと考えられる。

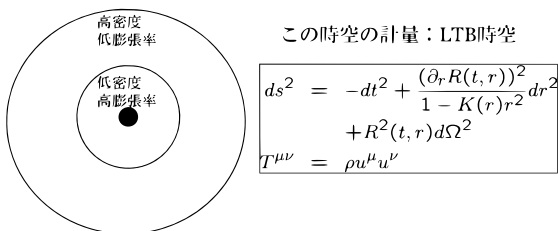
・ダークエネルギーに対する種々のアプローチ  
おもに宇宙原理と大域で一般相対論が成り立つことを仮定するかどうかで分けられる。

宇宙原理	大域での一般相対論	ダークエネルギー	
○	○	○	標準宇宙モデル
○	×	×	修正重力理論
×	○	×	非一様宇宙モデル

宇宙原理：宇宙は一様等方である。

・非一様宇宙モデルとはどんなモデルか

我々は球対称な低密度領域のほぼ中心にいる！



・非一様モデルの検証法

どのように検証するか

別々の観測事実を説明して説明できなくなるとそのモデルは棄却される。

観測の例

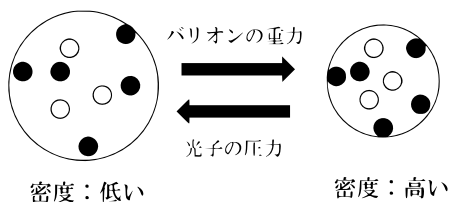
SNIa、CMB、銀河の大規模構造



今回のテーマ BAO(バリオン音響振動)

・BAO(バリオン音響振動)とは

宇宙初期(晴れ上がり前)にあったバリオン光子の混合流体の密度の音波振動モード



結果として得られるバリオンの密度の平均からのゆらぎは

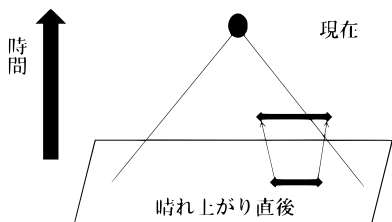
$$\delta_{b,k}(\eta) \propto \cos\{k d_s^c(\eta)\}$$

$$d_s^c(\eta) = \int_0^\eta c_s(\eta') d\eta'$$

$d_s^c$ ：共動系での音速ホライズン

・BAOはどのように観測されるか

BAOは晴れ上がりが起こった瞬間に振動が凍結され、そこからは宇宙膨張にあわせて波長が伸びると仮定する。



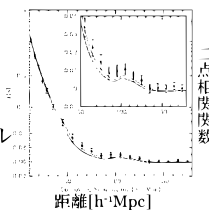
$$\delta_{b,k}(\eta) \propto \cos\{kd_s^c(\eta)\}$$

- ・密度ゆらぎは $\eta$ の関数とも見れるが、 $k$ の関数とも見れる。
- ・また宇宙の晴れ上がりの時にBAOの振動が切れたとすると、その時の形を保ったまいままで来ていると考えられる。

CMBや銀河分布を通じてBAOがみえる！

$$\lambda_{BAO} = 2d_s^c \leftarrow \text{BAOスケール}$$

およそ100 h<sup>-1</sup>Mpc程度の大きさ



標準宇宙モデルと非一様宇宙モデルでBAOスケールの伸びに差が出るだろうか？

➡ 答えはYes!

非一様では動径方向の各点各点で違う伸び方を示す。

・今のモデルでのBAOスケールの成長

動径方向の伸び方

$$d_s^c(t) = d_s^c(t_i) \times \frac{\partial_r R(t, r)}{\partial_r R(t_i, r)}$$

動径座標  $r$  によって伸び方が異なっている。

$$ds^2 = -dt^2 + \frac{(\partial_r R(t, r))^2}{1 - K(r)r^2} dr^2 + R^2(t, r) d\Omega^2$$

・視線方向のBAO=RBAO

動径方向に一定の幅をもった帯を考慮して、そこでさらに動径方向のみの相関をとる

