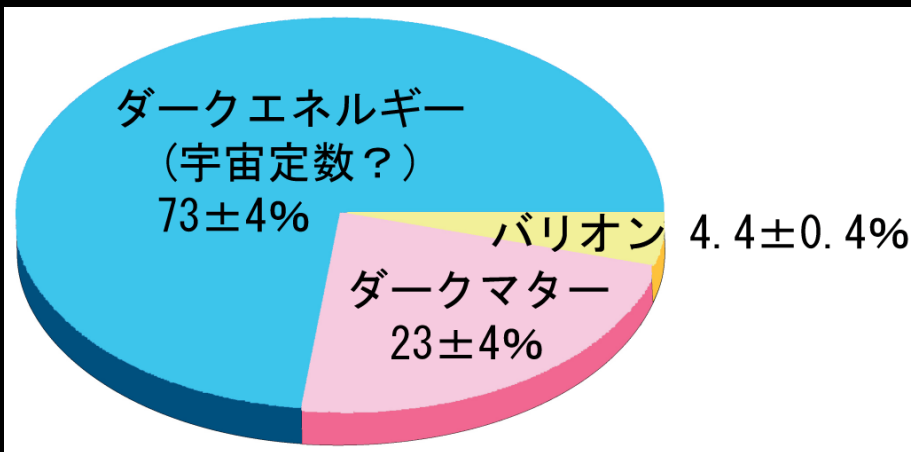


ダークエネルギーとWFMOS



超広視野撮像/分光器で目指す
観測的宇宙論
2006年3月13日@国立天文台

宇宙観は本当に進化したか？

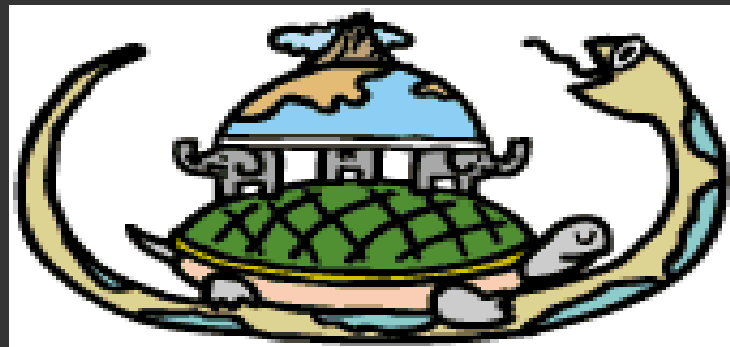
古代エジプト



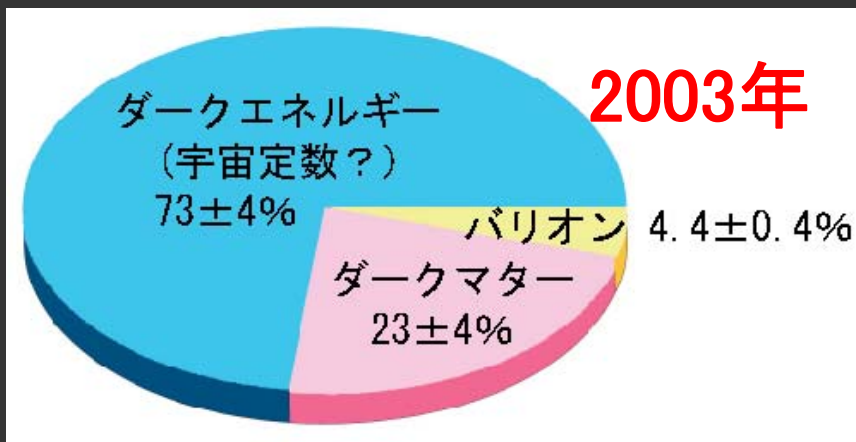
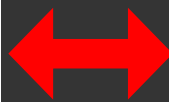
古代中国



古代インド



進歩？



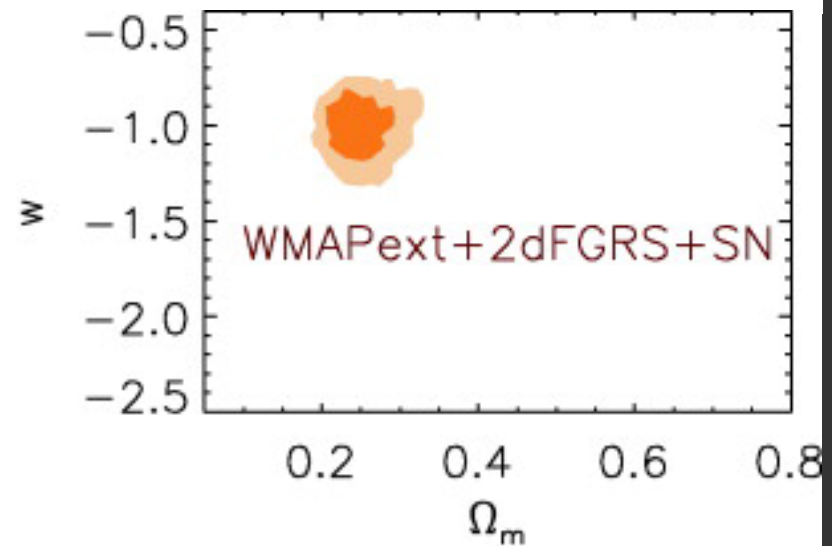
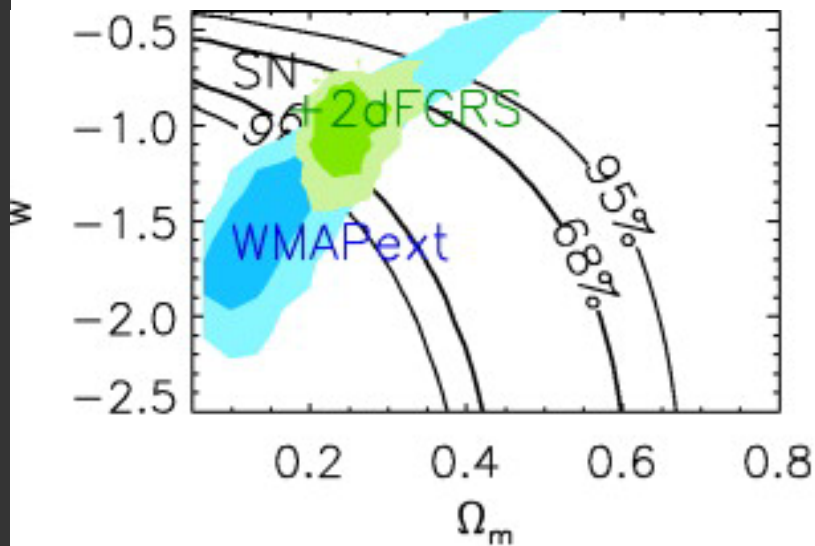
ダークエネルギー探査の意義

- **宇宙は本当に加速膨張しているか**
 - 観測的な系統誤差？
 - 超新星データに対する、ダストや進化効果の存在？
- **ダークエネルギーか？一般相対論の限界か？**
 - 宇宙論的スケールでの自然法則の一般相対論からのずれをダークエネルギーの存在と誤解しているだけ？
 - 仮にそうならば、ダークエネルギーの存在以上に重要な科学的 (>> 物理学的) 大発見！
- **もし、ダークエネルギーが実在するならば、それは宇宙定数か？**
 - その実効的な状態方程式は？
 - 理論の論文は無数にあるが、意味のあるものはない
 - 現時点では、天文観測以外で解明する手段はない

現状のまとめ：ダークエネルギーは宇宙定数か？

- **ダークエネルギーの状態方程式**（現時点では物理ではない、単なるパラメトリゼーション）
 - $p=w\rho \Rightarrow \rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
 - $w=-1$: 宇宙定数
 - $-1 < w < -1/3$: (一般の)ダークエネルギー
- **WMAP+others $\Rightarrow w = -0.98 \pm 0.12$**

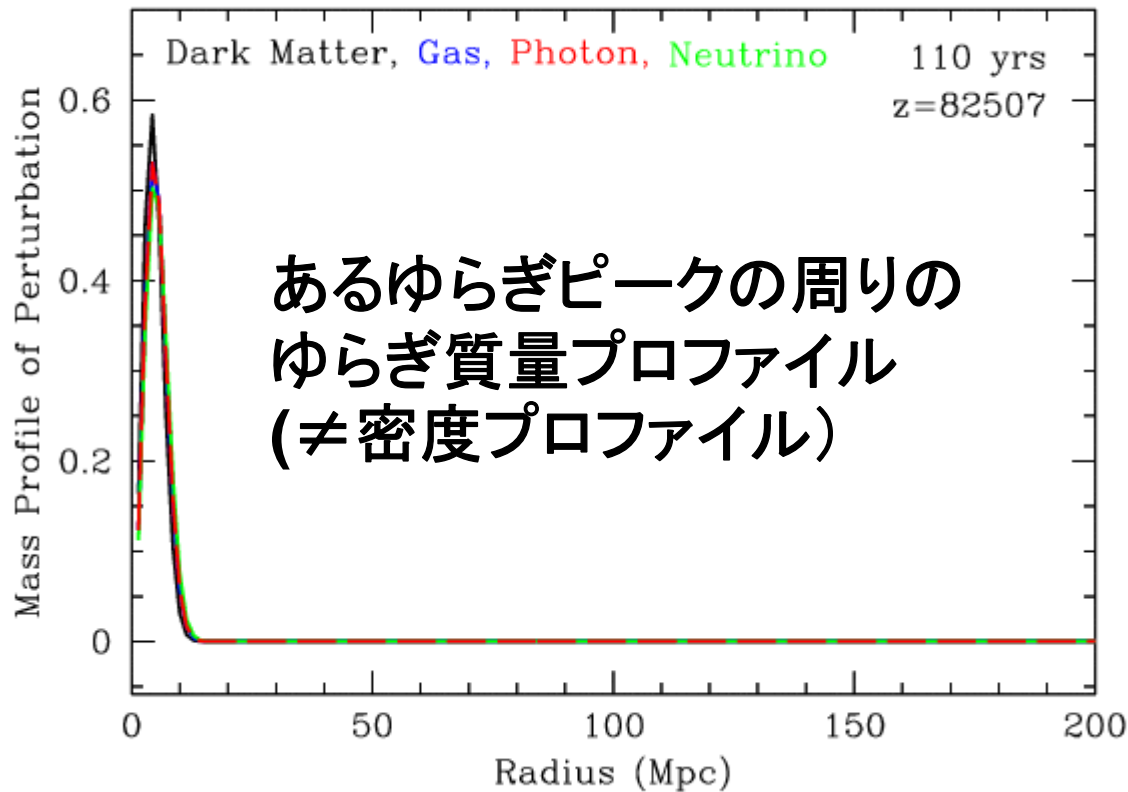
Spergel et al. ApJS 148(2003)175



ダークエネルギー観測からみたWF MOSの概要

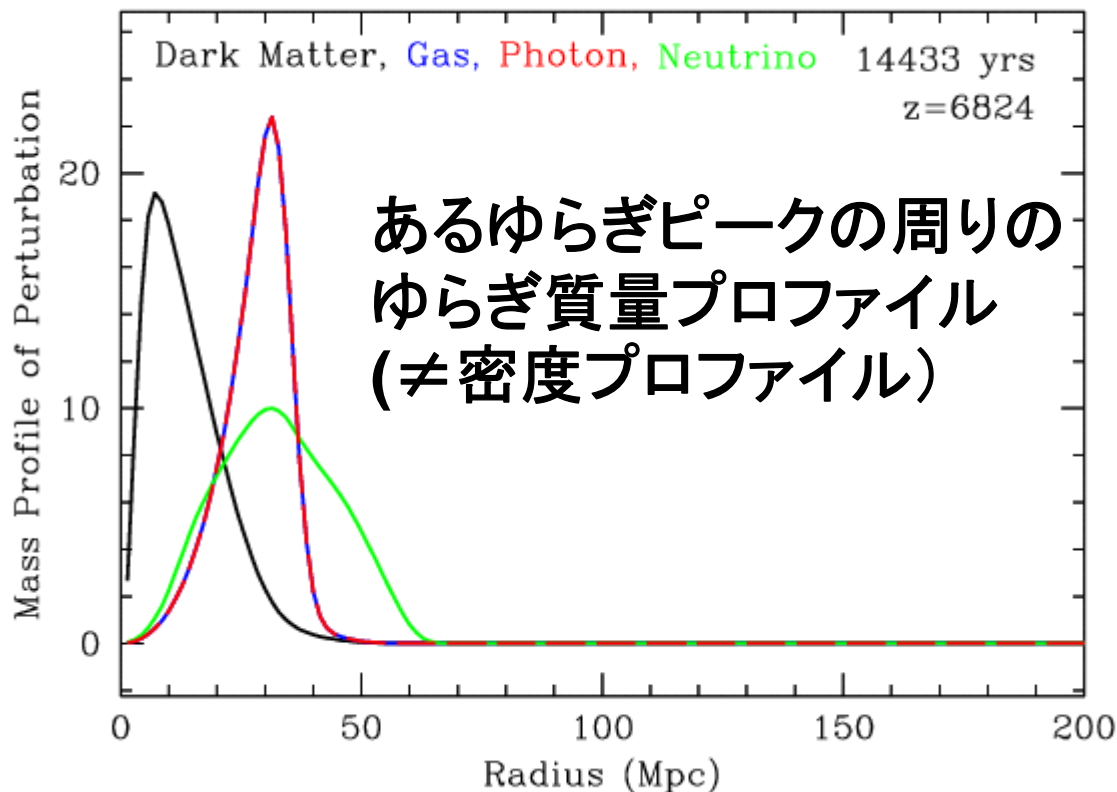
- すばる主焦点に口径 1.5° の広視野カメラ
- 4000天体分光器による赤方偏移サーベイ
 - $0.5 < z < 1.3$: emission line galaxies
 - 2×10^6 個/2000平方度 \Rightarrow 1400ポインティング(900時間)
 - $2.3 < z < 3.3$: Lyman-break galaxies
 - 6×10^5 個/300平方度 \Rightarrow 200ポインティング(800時間)
- 銀河空間分布のバリオン振動スケールを決定し、 $H(z)$, $D_A(z)$ を1%レベルで決定
- w を $\pm 3\%$? , dw/dz を $\pm 25\%$?の精度で決定
 - \Rightarrow ダークエネルギーを観測的に絞り込む

バリオン振動 (1)



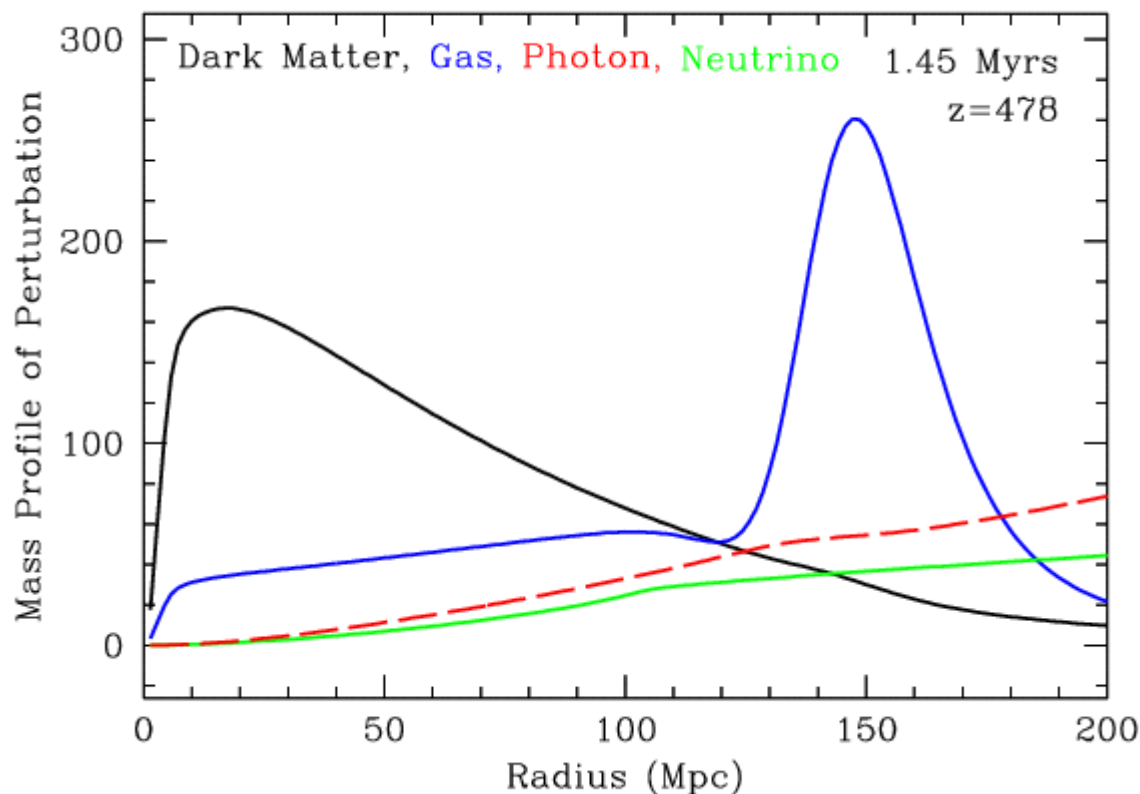
- 宇宙初期では、
ダークマター、バリ
オンガス、光子、
ニュートリノの4成
分すべてが一流体
として振舞う

バリオン振動 (2)



- ニュートリノはほとんど相互作用しないので、外側へ自由に拡がる。
- **ダークマターは、重力だけを受けて基本的には中心にとどまろうとする。**
- バリオンガスと光子は一流体として振舞う。中心密度揺らぎは圧力でもあるので、それによって外側への弾性球面波として伝わる

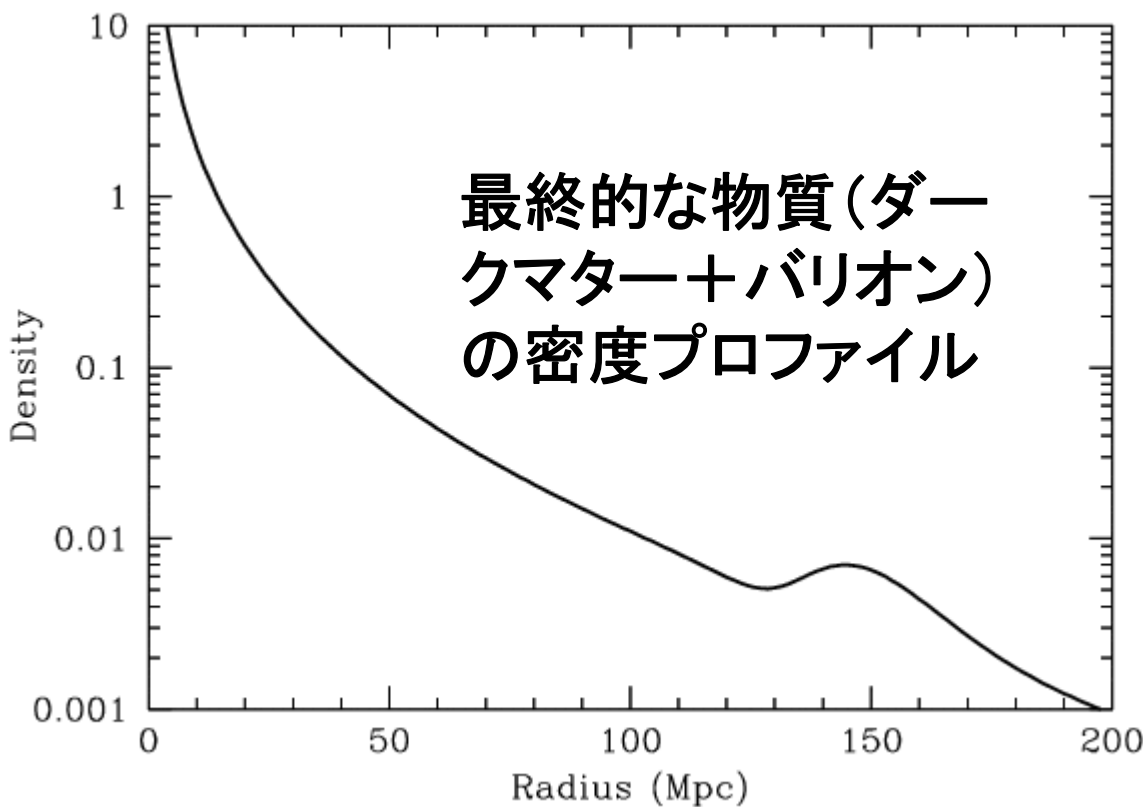
バリオン振動 (3)



■ 再結合($z=1000$)の前までは、バリオンガスと光子は一流体として振舞うが、その後相互作用が切れるにつれ、光子だけが外側へ逃げ始める。

■ **ダークマターのゆらぎは、自己重力によって成長を続ける。**

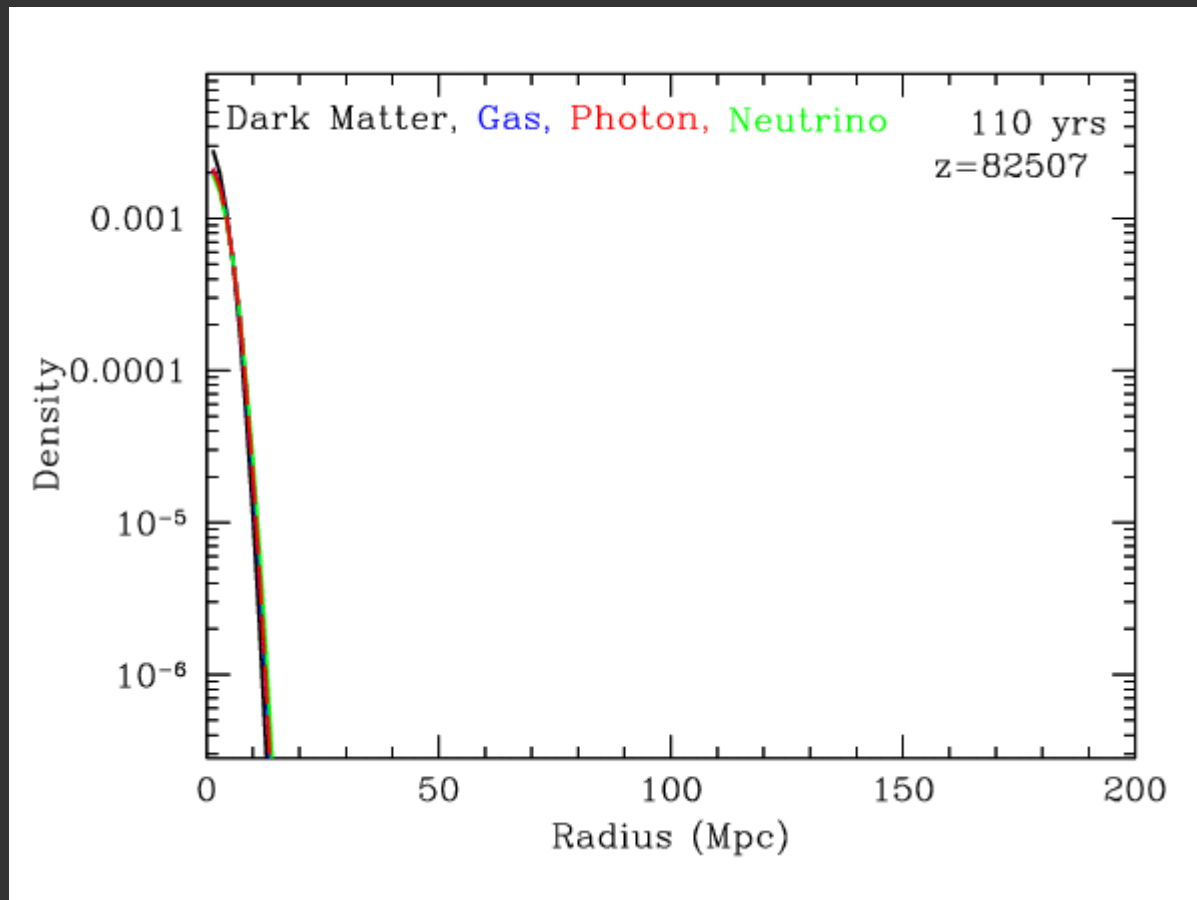
バリオン振動 (4)



■ バリオンガスと光子の相互作用が切れると、バリオンはダークマターのつくる重力ポテンシャルに落ち込んで揺らぎが成長する。

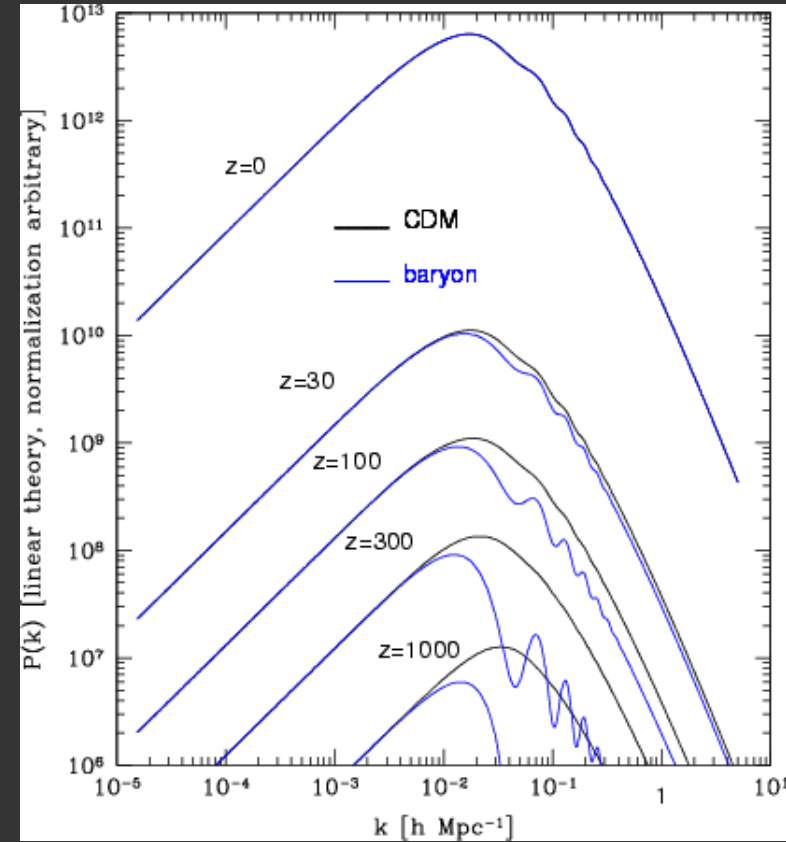
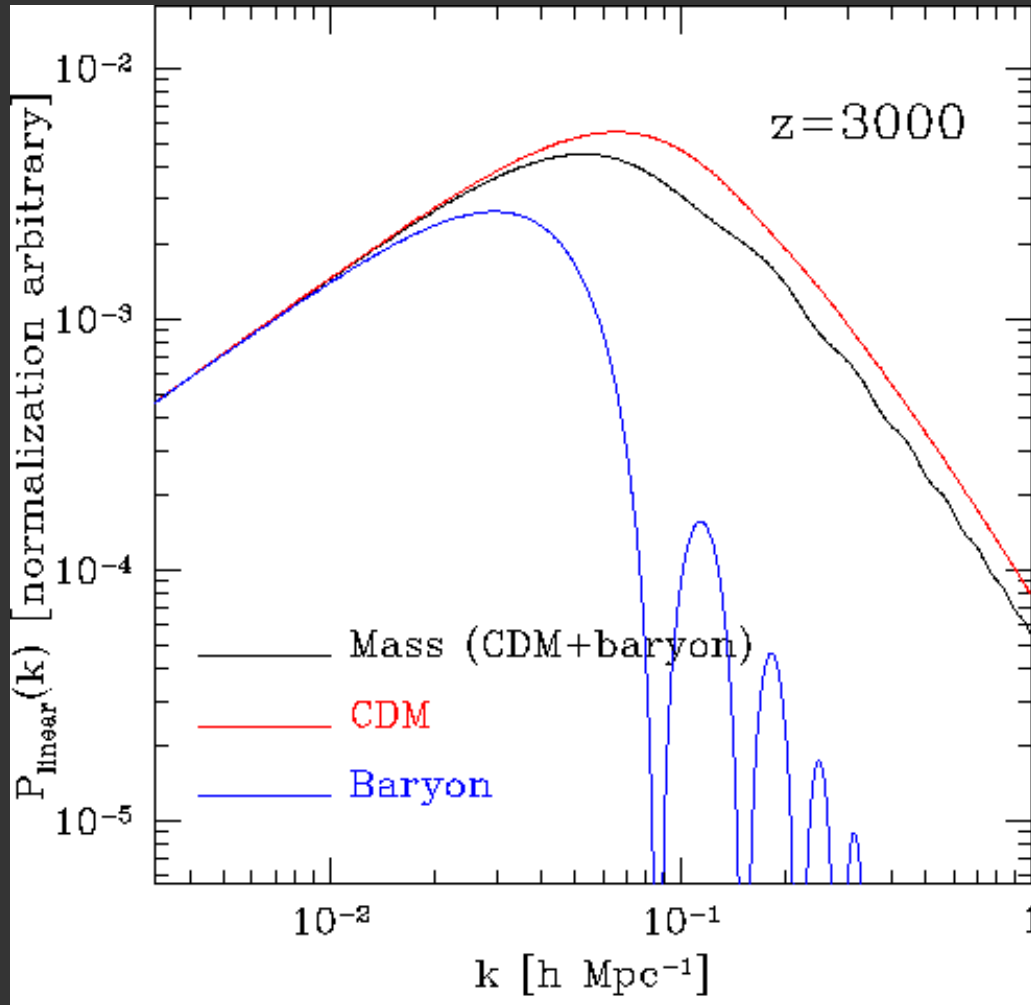
■ **ダークマターは、バリオンゆらぎの作った弾性波ピークの付近での揺らぎの反作用を受け、小さなピークを作る。**

ピークのまわりの密度プロファイルの進化



http://cmb.as.arizona.edu/~eisenste/acousticpeak/acoustic_physics.html

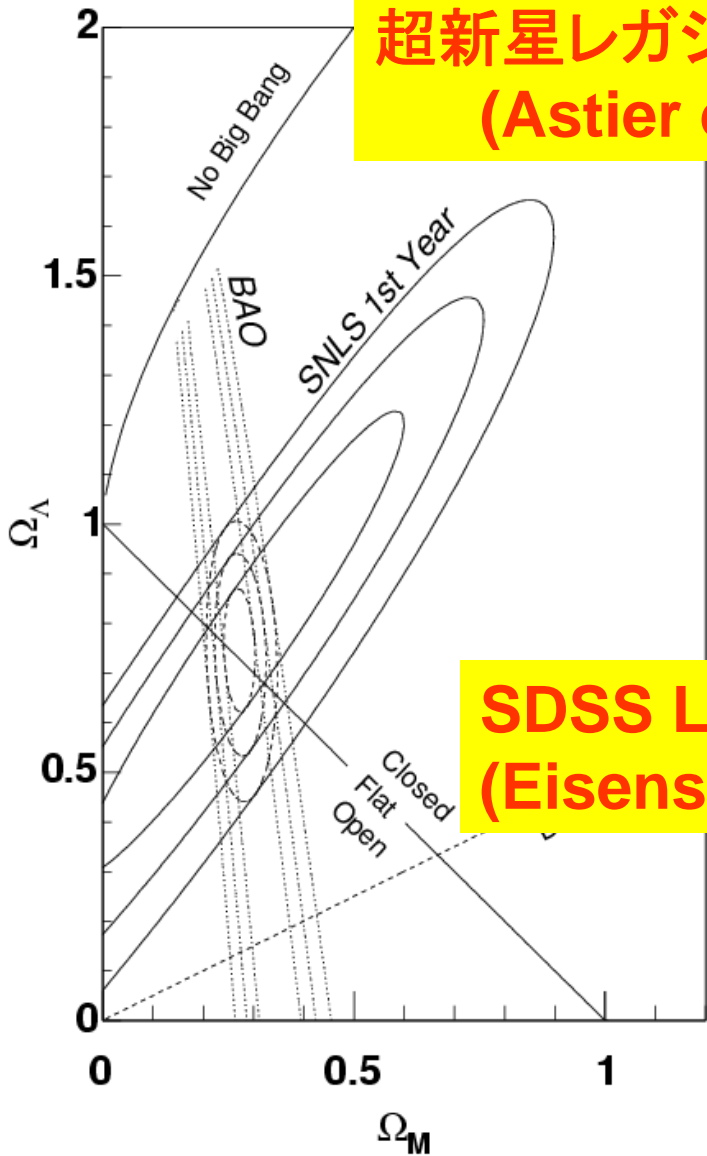
BAO(バリオン弾性振動)と パワースペクトルの進化



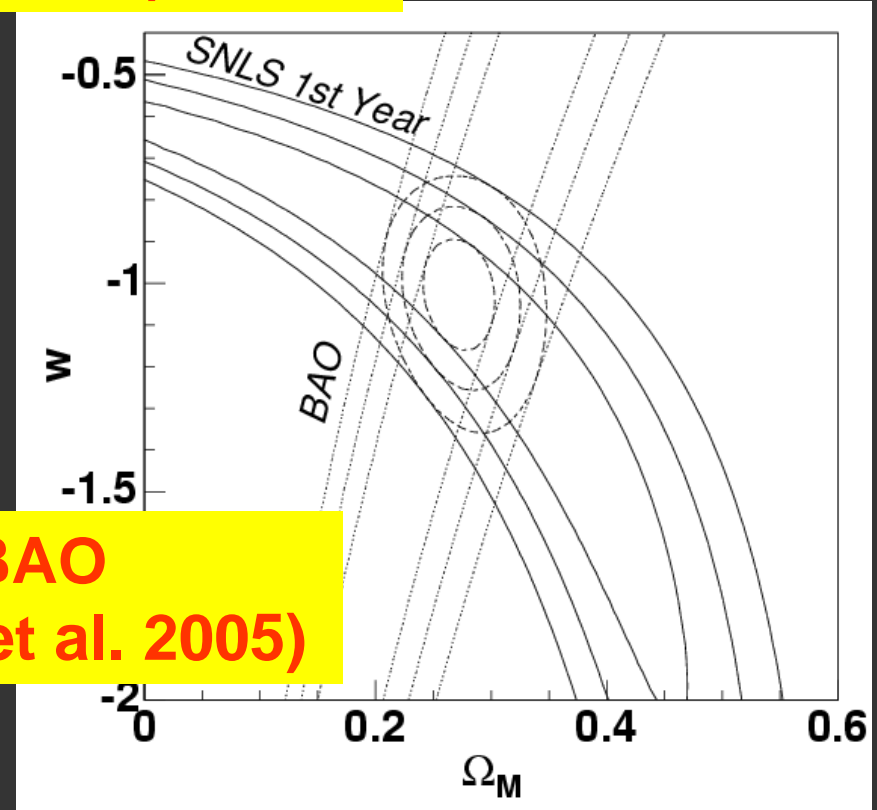
CMBFASTを用いた結果
(東大: 樽家篤史)

超新星とBAOからのダークエネルギーへの制限

超新星レガシーサーベイ1年目
(Astier et al. 2006)



SDSS LRG BAO
(Eisenstein et al. 2005)



$$w = -1.023 \pm 0.090 \text{ (系統誤差)} \\ \pm 0.054 \text{ (統計誤差)}$$

他のダークエネルギー将来計画

- **DES: Dark Energy Survey**
 - 5000平方度の測光サーベイ@チリ4m
 - 2009年にサーベイ開始を目指す
- **LSST: Large Synoptic Survey Telescope**
 - 20000平方度の測光サーベイ@メキシコ/チリ8.4m
 - 2013年にサーベイ開始を目指す
- **JDEM: Joint Dark Energy Mission (NASA+DOE)**
 - スペースミッション
 - $0.5 < z < 1.7$ の超新星サーベイ
 - SNAP: SuperNova Acceleration Probe
 - Destiny: Dark Energy Space Telescope

WF MOSの意義

- **ダークエネルギー問題に対して重要な天文学的貢献をなすことが期待できる**
 - 測光観測サーベイの提案は数多くあるが、この規模の分光観測サーベイ提案は他に存在しない
 - HyperSuprime-Camとの相補性が高く、互いにその成果を充分に引き出しあう相乗効果が期待できる (target selection, weak lensing)
- **ダークエネルギーを念頭においた計画ではあるが、実質的にはSDSSを高赤方偏移にひろげているだけ(つまり、天文学の自然な発展形)という考え方もできる**
 - 物理のコミュニティーから天文に対する予算を増やす
 - ダークエネルギーにこだわらない広い天文学的研究が可能になるはずで、この機会を**利用する**という発想が大切／得策
 - ある割合を高分散分光器にして惑星探査・フォローアップなどにも使えないか？

WF MOSの問題点

- すでに $w = -1 \pm 0.1$ という結果があるのなら、「ダークエネルギー＝宇宙定数」と結論してよいのではないか？
- 予想されている精度が本当に達成できるか？
- 数値がわかったとしても、ダークエネルギーの正体の解明につながるような信頼できる理論が存在するか？
- 結局どこかが別の方法でやるはずだから、あえてすばるでやらなくても良いのでは？
- 日本がサイエンスをリードできるか？
- すばるでの他の観測プロジェクトの遂行に重大な支障が出るのではないか？
- 必要な予算は本当に確保できるか？
- このような大掛かりな計画には多大な労力と資源の注入が必要で、それに対する責任体制は確立しているか？

WF MOSに対する現在の反応

- 天文関係者の中に情報が適切に伝達されていないことが最大の問題
- さまざまな風説、疑惑が一人歩きしている
- ペリーによる黒船来航？（山田亨2005）
 - 日本の近代化と同時に様々な問題も残した

米国軍艦
“WF MOS号”



日本の光赤外天文民



WF MOSの問題点とその回答 (1)

- すでに $w = -1 \pm 0.1$ という結果があるのなら、「ダークエネルギー＝宇宙定数」と結論してよいのではないか？
- 未知なるものを可能な限り追求することこそ、科学の本質。後は結果論。
- 予想されている精度が本当に達成できるか？
- 正直、まだ楽観的な予想というべきだと思う。理論的にもチャレンジな要素が多く、詳細な検討が必要。だからこそ今後の詰めが必須。今後一年間の検討結果を最終判断の条件とすべき。
- 数値がわかったとしても、ダークエネルギーの正体の解明につながるような信頼できる理論が存在するか？
- 多分ない。価値観によるが逆に言えば、完全に天文学観測主導の分野であると位置づけることが可能。

WF MOSの問題点とその回答 (2)

- 結局どこかが別の方法でやるはずだから、あえて「すばる」でやらなくても良いのでは？
- それも一つの見識ではあるが、異なる方法論の系統誤差の存在は自明ではない。だからこそ、独立な方法で検証する意味がある(私がよく言う、「宇宙論は多数決」という原理)。それに直接かつ積極的にかかわるチャンスがあるときにをものにしないでいては、真の独創的貢献はできない。
- 日本がサイエンスをリードできるか？ また、このような大掛かりな計画には多大な労力と資源の注入が必要で、それに対する責任体制は確立しているか？
- 潜在的には関係する理論家の層は厚く(東北大、東大、国立天文台、名古屋大、京都大、広島大)、それらのオールジャパン的な体制づくりは容易。むしろ、ハード的な側面でのマンパワーが不足しているというべき。

WF MOSの問題点とその回答 (3)

- すばるでの他の観測プロジェクトの遂行に重大な支障が出るのではないか？
- それが起こらないことを必須の条件として検討するしかない。その度合いによっては、残念ながら計画を断念せざるをえないとする決断もありうるほどの重要なファクターだと認識している。
- 必要な予算は本当に確保できるか？
- 物理コミュニティーを巻き込んだ競争的資金獲得はある程度可能。前述のDESはFermilab、LSSTはSLACが中心となっていることを考えると、高エネルギーコミュニティーから天文への移動はすでに本格的に起こっている。また、仮に日本だけで単独でやることを出発点として比較するならば、今回はそもそもアメリカとの折半によって半額で実現される点は魅力的。それにしても、日本が期待される予算額を競争的資金だけで確保することは困難であろうから、国立天文台からのマッチングファンド的な考え方でのサポートは必要。

満たすべき条件

- サイエンスの結果を出す段階で、日本が十分貢献できること。少なくとも論文の半分はPASJに出版することが目標。
- (夜数の割り当ての問題は別として)他のプロジェクトが今までと同じように遂行できるように十分配慮すること
- 予算の節減に最大限努力し、ある割合は競争的資金でカバーすること(ただし、ある程度マッチングファンド的なものは天文台に期待せざるを得まい)

結論

- この計画が真剣に検討されていることこそ、すばるの実績が認められている証拠に他ならず、日本として誇るべき事実
- 今後の8m望遠鏡の国際的共有・有効利用の先鞭をきるという意味においても画期的
- **上述の問題点がクリアされることを前提として、HyperSuprime+WF MOSを推進すべき**
 - 「慎重な検討の結果見送る」判断は簡単であるが、もしもダークエネルギー≠宇宙定数という示唆が得られれば、歴史に残る「すばる」の成果となることは間違いない
 - ただし、ダークエネルギー問題にどのような解答が得られるかはあくまでも結果論
 - 仮に、宇宙定数である可能性が高まった「だけ」に終わったとしても、達成された誤差の値を評価すべき
 - もちろん、ダークエネルギー＝宇宙定数という描像が確立されたとすればそれは単純に「予想通り」という以上の大きな意義を持つことは忘れてはならない