

奈良女子大学 女性先端科学者セミナー

銀河の分布を表す統計力学

中道 晶香

県立ぐんま天文台

自己紹介 県立ぐんま天文台で 観測普及研究員をしています。



口径150cm望遠鏡(国内有数)

本物の体験

望遠鏡で天体を見る

研究者との交流

公共天文台 開かれた利用

学校との連携、生涯学習

観測研究 多数の観測装置

国際協力



☆ 遊びに来てください。

夜の地球・・・人の集まり具合が表れている



撮影 DMSP衛星 NASA GSFC

宇宙では、天体はどのように集まっているのでしょうか？

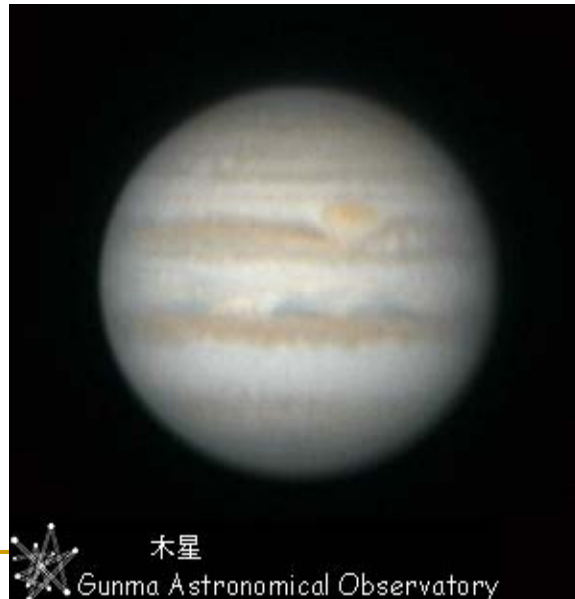
太陽系 ～ 太陽と惑星たち ～



日本惑星
協会より



火星



木星

Gunma Astronomical Observatory



土星 2005年1月6日撮影

Gunma Astronomical Observatory

銀河 ～ 星たちの群れ ～



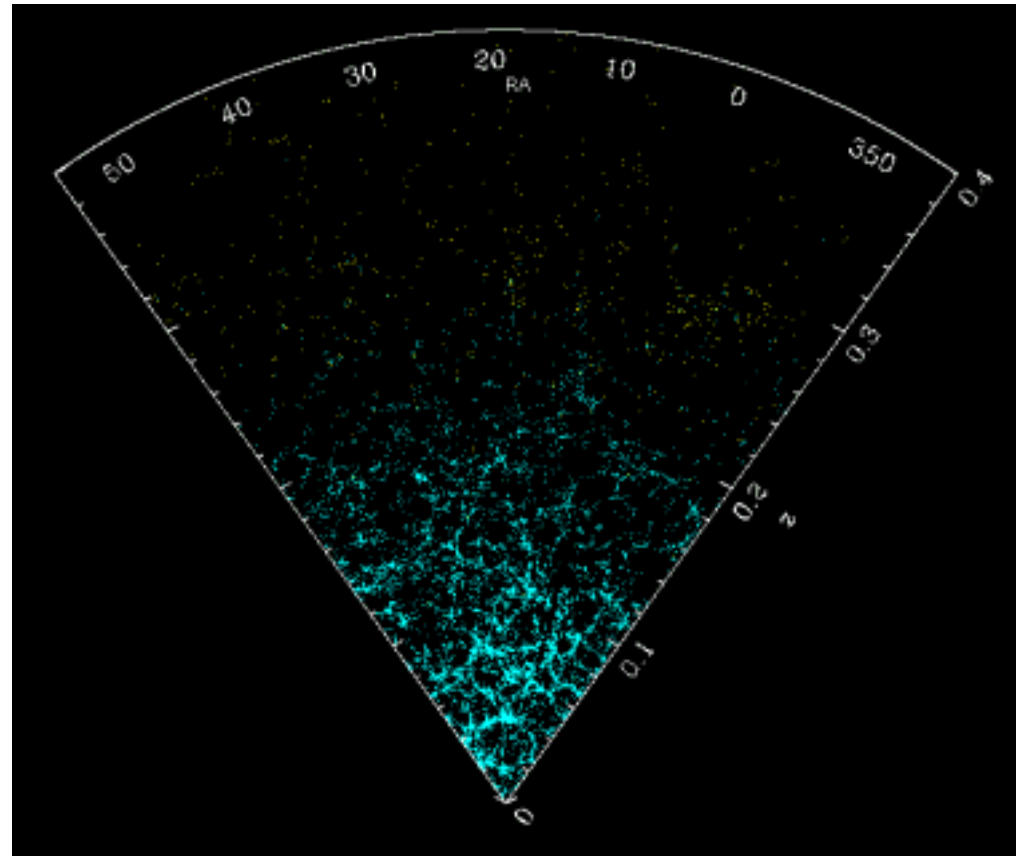
銀河団 ～銀河たちの群れ～



銀河の群れ

- ボイド： 銀河の無い
巨大な領域

壁(シート)状や繊維
(フィラメント)状の構造に
囲まれている空洞



SDSSのサーベイの中の銀河の分布
(A. Pope)

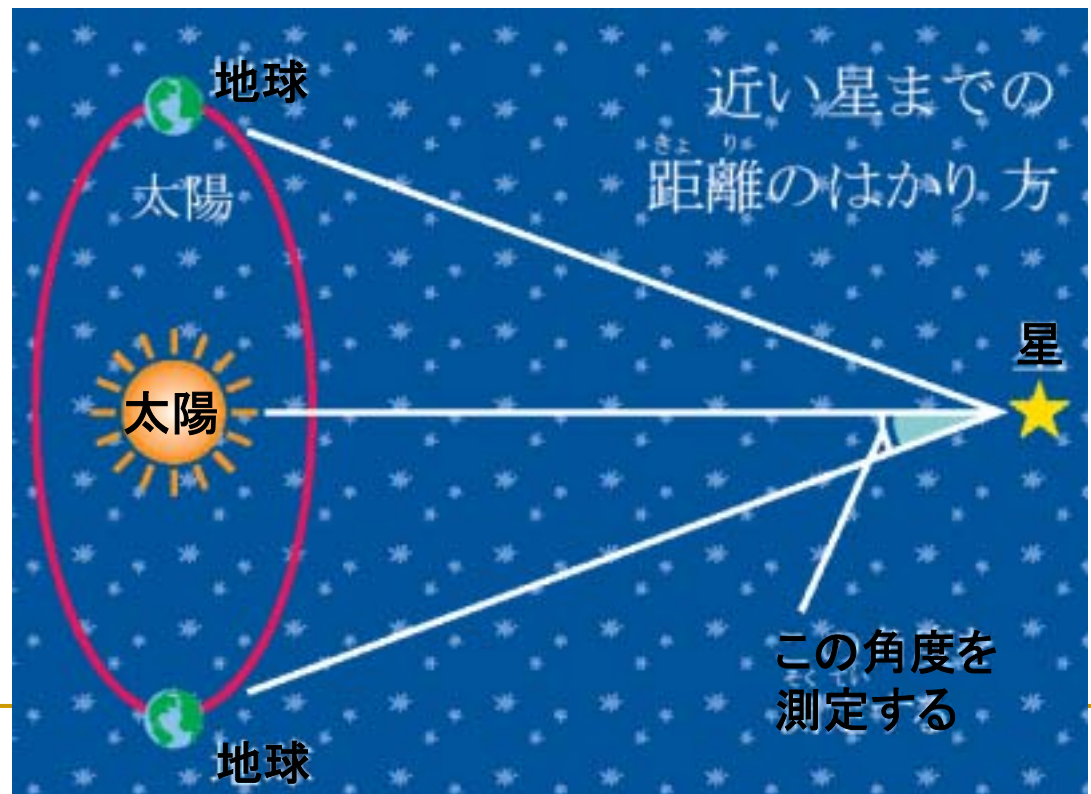
銀河の集まり具合は どうなっている？

- 奥行き(天体までの距離)は、どうやって測ればいいのか？
- いろいろな測り方がありますが、本日は2種類の測り方を紹介します。

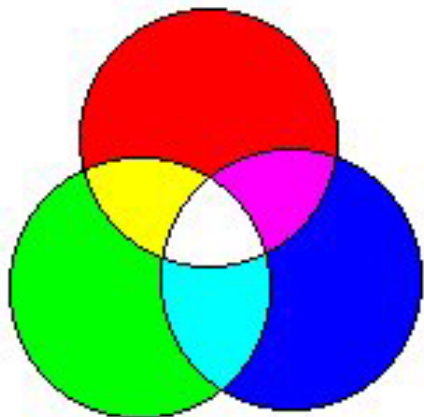
近い星までの距離の測り方

地球は太陽のまわりを1年かけて回っているので、春と秋の地球から星を見る角度の差を測る。

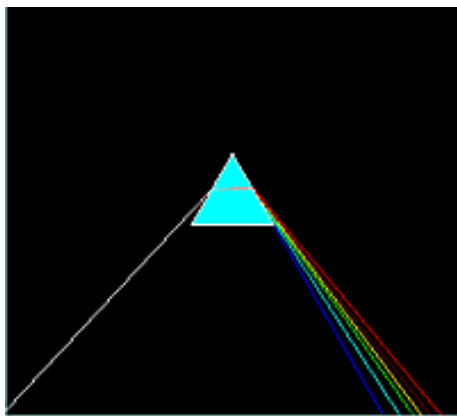
遠い星ほど、角度の差は小さくなる。



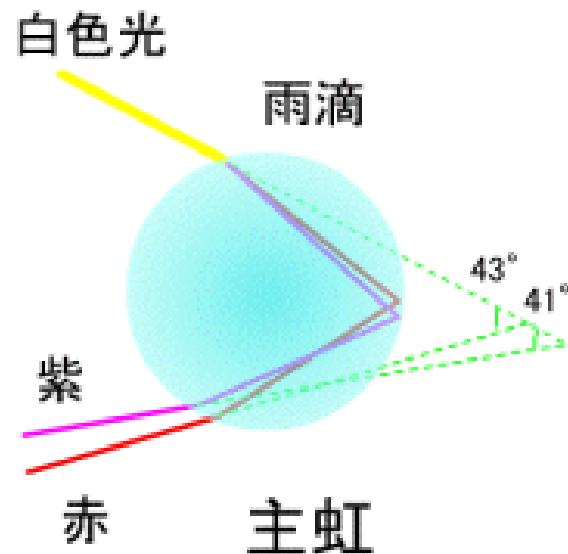
遠い天体までの距離を測るには、その天体のスペクトルを使います。



太陽の光は白っぽく見えますが、いろいろな色の光がまざっています。



プリズム分光

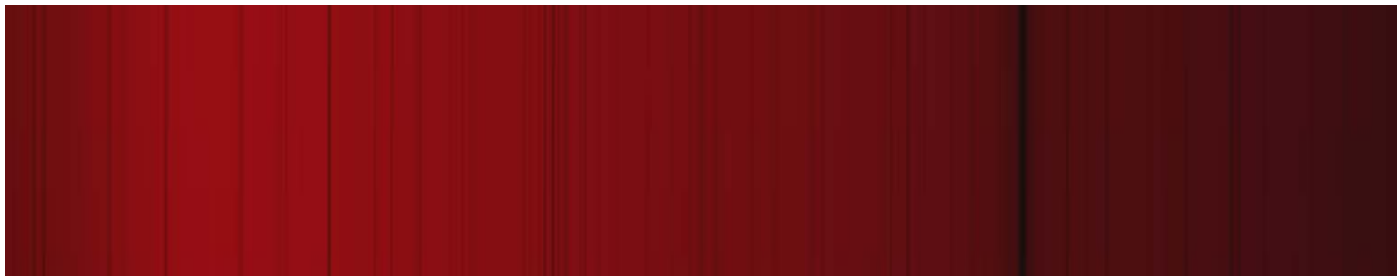


スペクトル

太陽のスペクトル



赤い色の一部を大きくして見ると

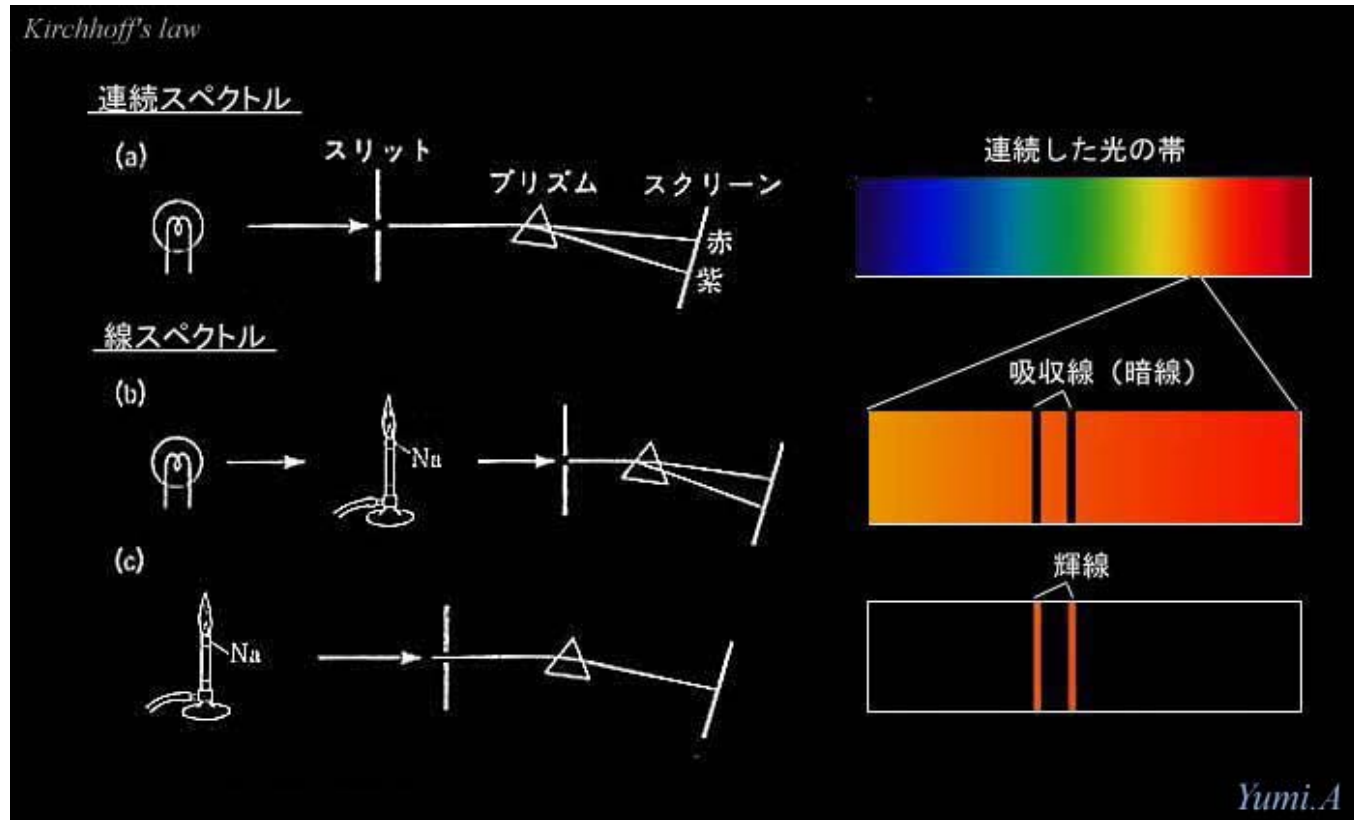


黄色や他の色の中にも吸収線がたくさん！

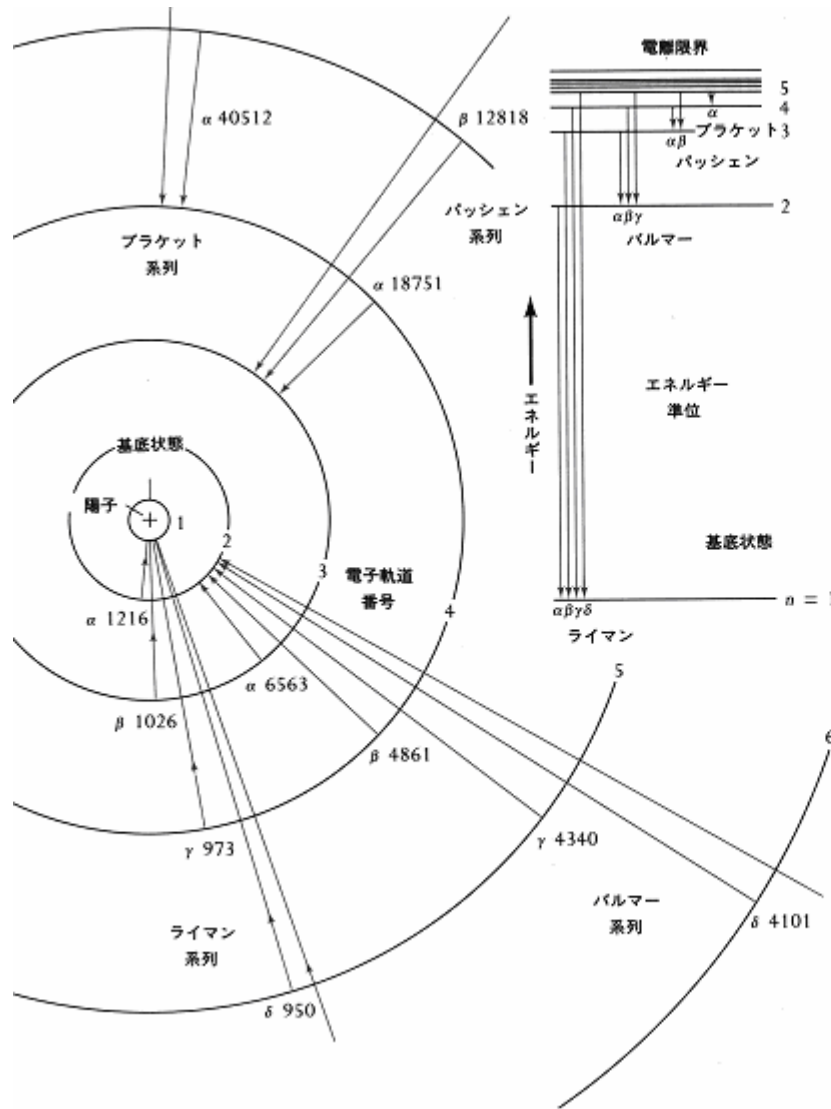


スペクトルの吸収線は何？

ナトリウム ランプの場合

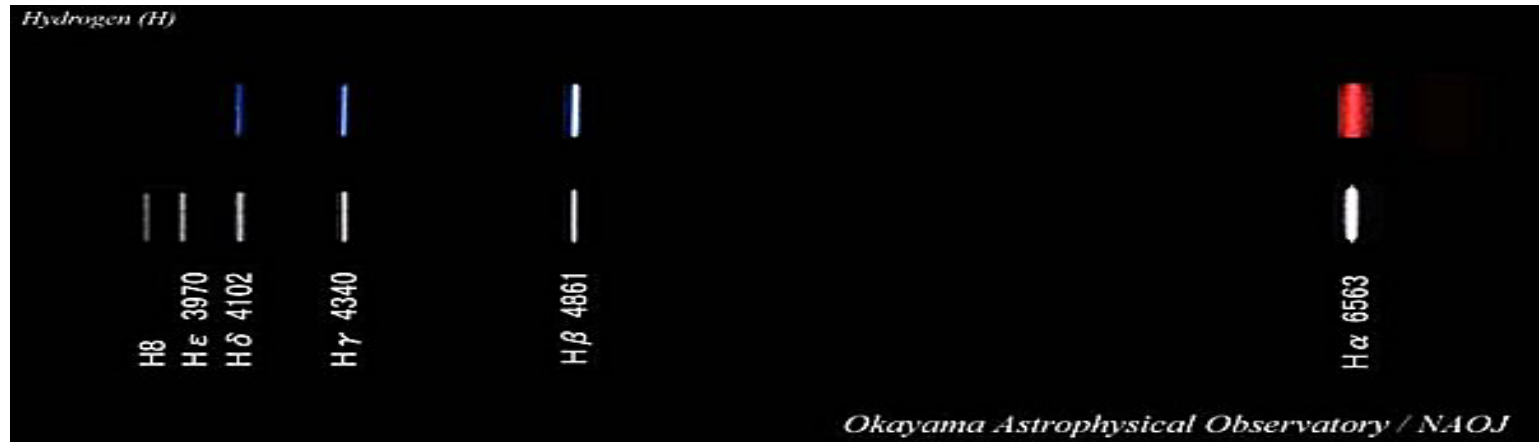


水素原子模型



物質の種類によって、決まった色の光を放出したり吸収したりします。

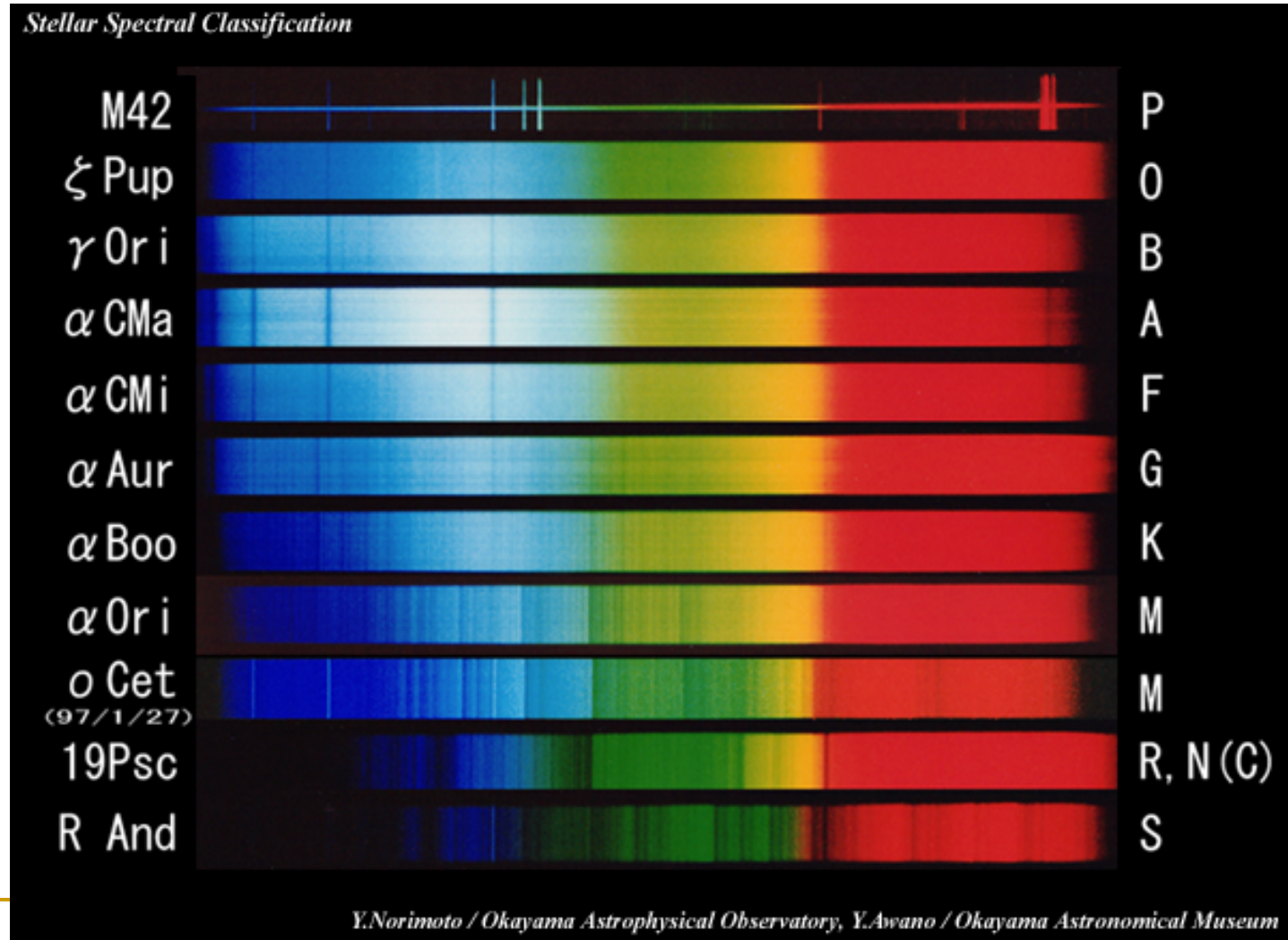
水素ガスが放出したり吸収したりする光



太陽のスペクトルの赤色の中の吸収線は、
水素ガスがこの色の光を吸収した証拠



星のスペクトルには いくつかの型がある



オリオン星雲

とも座ゼータ星

オリオン座ガンマ星

おおいぬ座アルファ星

こいぬ座アルファ星

ぎよしゃ座アルファ星

うしかい座アルファ星

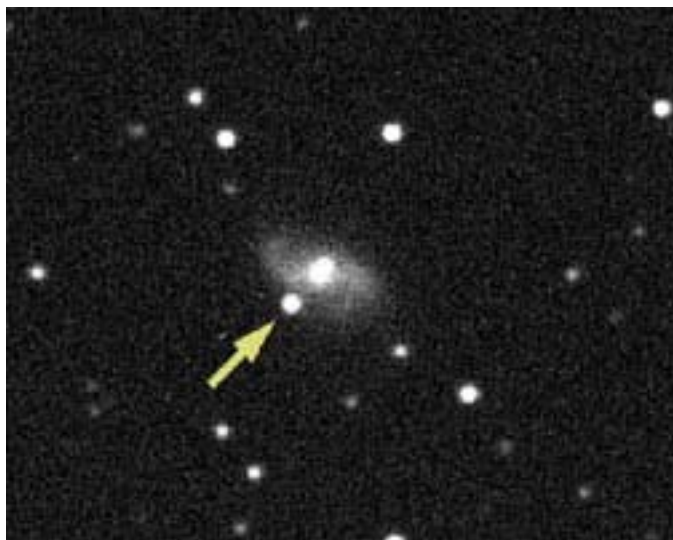
オリオン座アルファ星

くじら座 オミクロン 星

みなみのうお座19星

アンドロメダ座R星

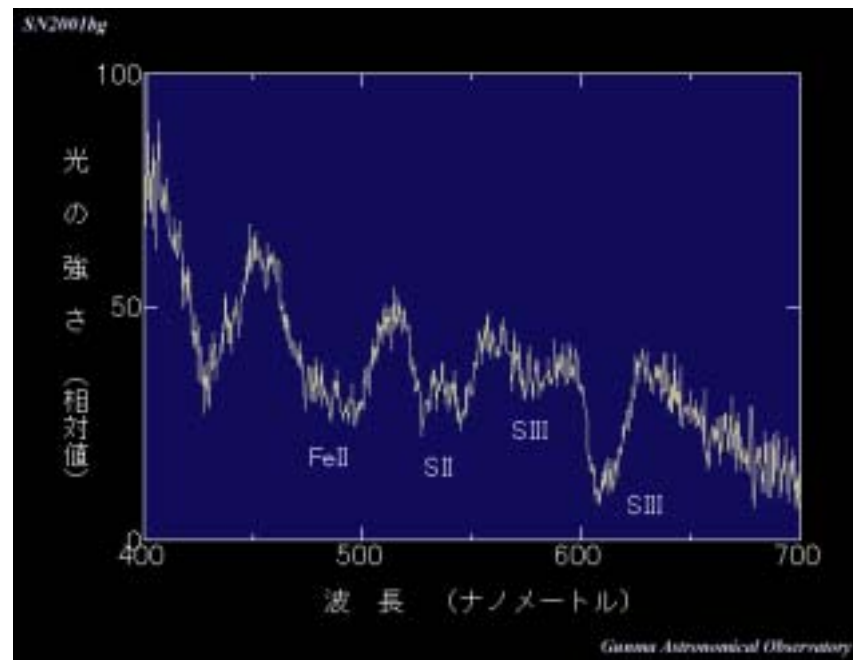
急に明るく見えた星のスペクトルを調べ、 Ia型の超新星だとわかった場合



2001年5月

かに座の銀河NGC2608に
現れた超新星 SN2001bg

↑ 光の強さ



紫 ← スペクトルの色 → 赤

このスペクトルは
Ia型

Ia型の超新星とは

- 片方の星が先に進化して光らなくなった(白色わい星)ところに、もう片方の巨星のガスが降り積もって爆発

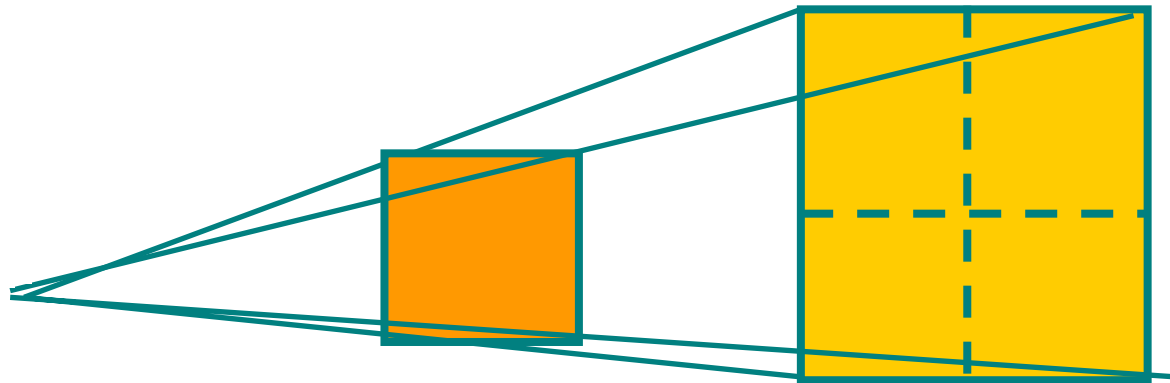


Ia型の超新星は、どれも同じ
明るさになる



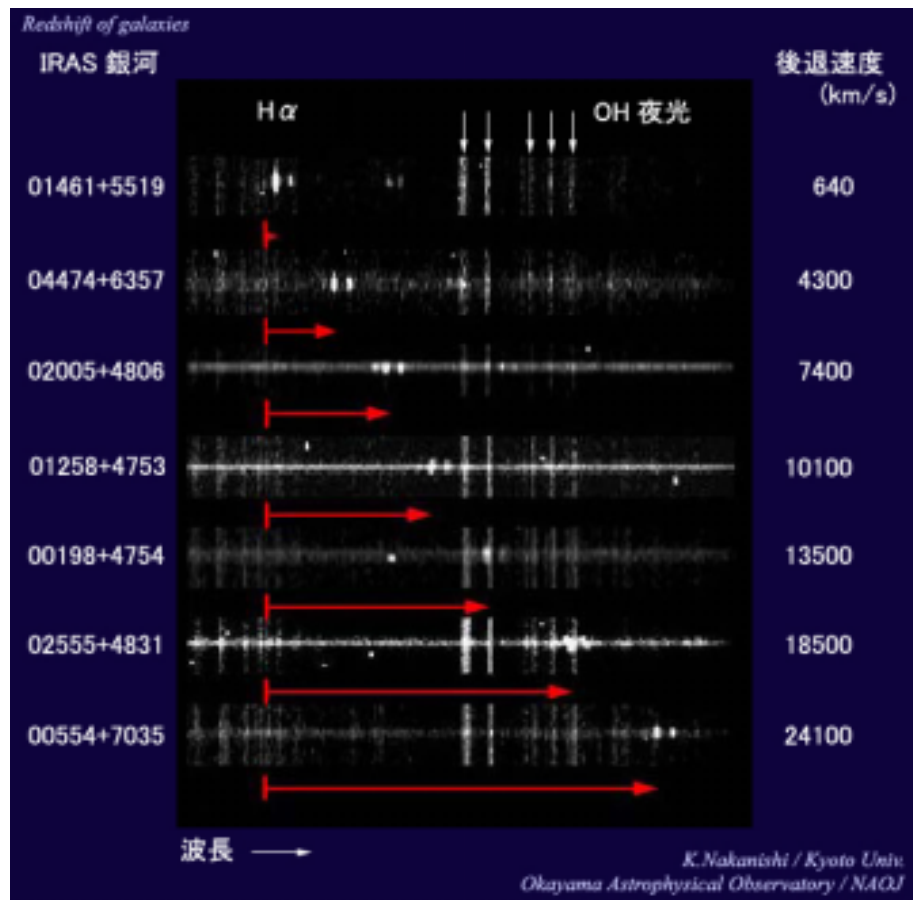
これが明るく見える → 近い

暗く見える → 遠い



超新星が現れた銀河までの距離がわかる！

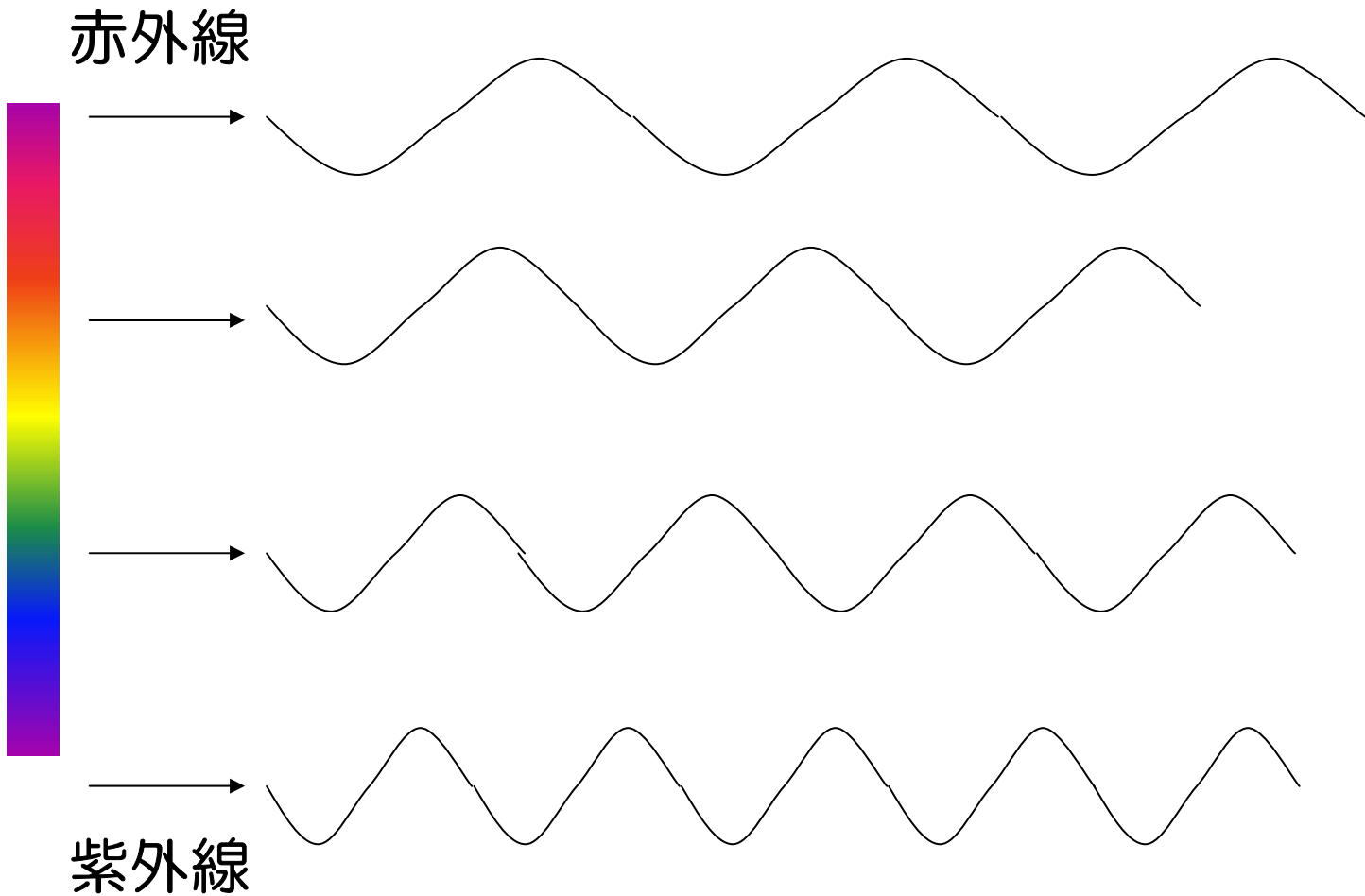
距離がわかった銀河たちのスペクトルは、遠い銀河ほど色が赤くずれている



遠い

スペクトルの色 → 赤い方へ

光の色の違いは、波長の違いです



遠くの天体ほど波長が長く伸びているのです。
(赤方偏移)

なぜ遠い天体ほど波長が長く伸びるのでしょうか？



「宇宙空間が膨張しているから」と考えるのが自然

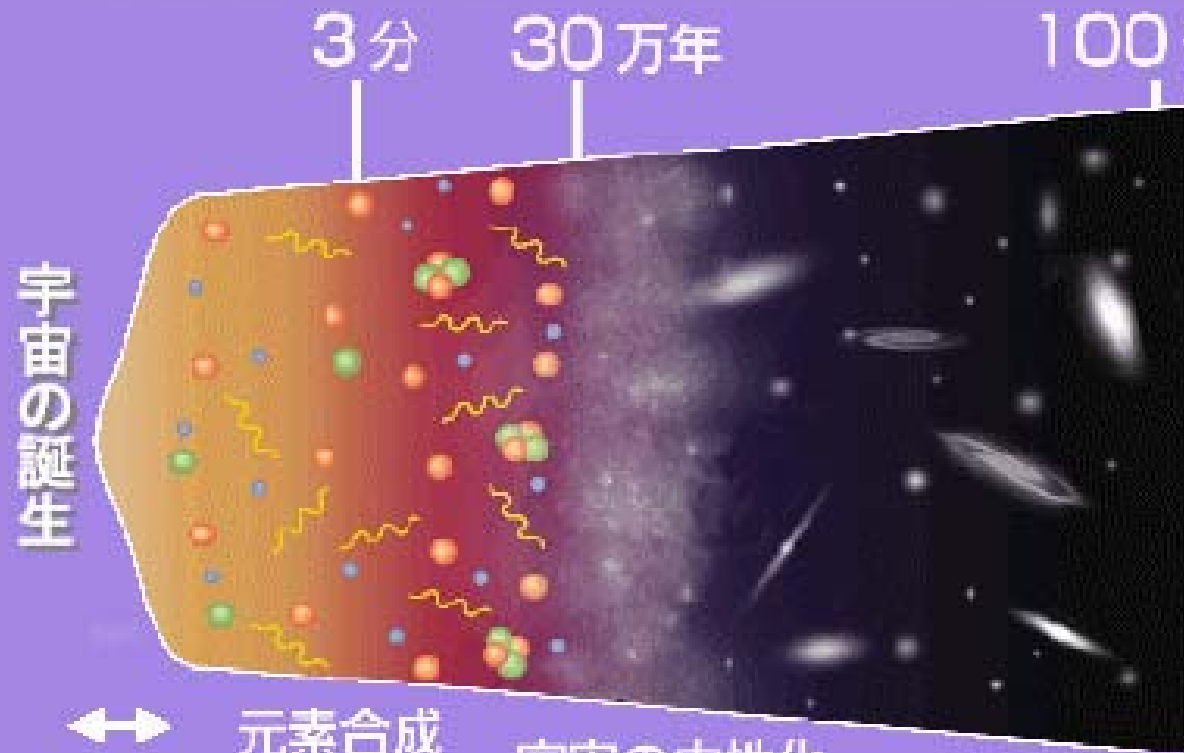


我々が宇宙の中心だと考えるのは不自然



すべての距離が一定の割合で伸びるので、
膨張の中心はありません。

現在
137
億年



量子ゆらぎの生成 ← 元素合成 → 宇宙の中性化 → 銀河形成

過去の宇宙のスペクトル



宇宙の大構造

これで銀河の分布地図を作ることができます。

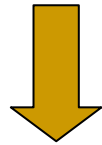
- 望遠鏡で銀河の場所を調べる。
- 銀河のスペクトルを観測し、色のずれ具合から、距離を求める。 $z = \Delta \lambda / \lambda$

銀河の集まり具合を表す指標は？

統計力学！

普通の統計での重力の不具合 その1

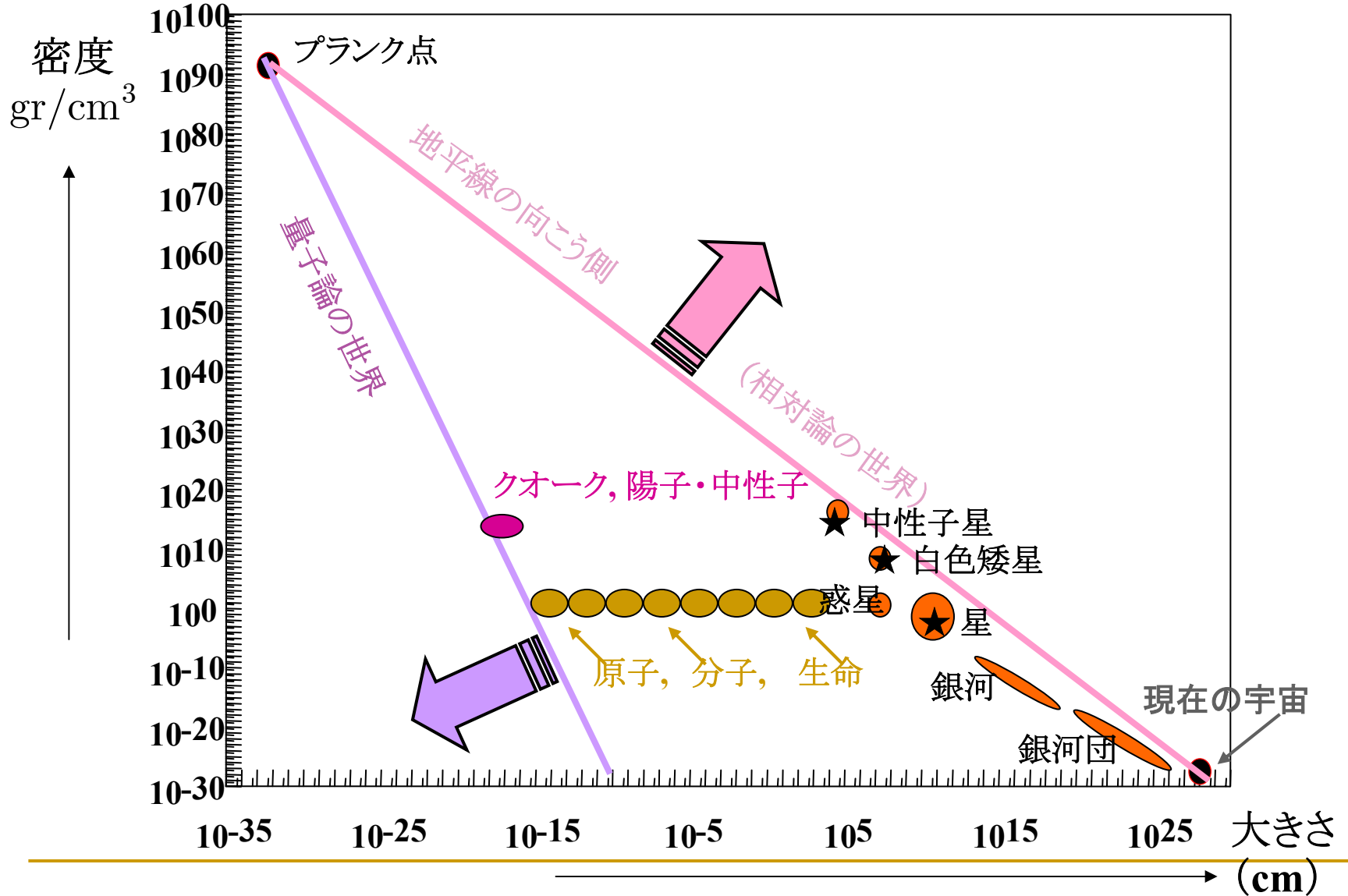
- 重力が作る構造は、何か小さな要素が集まった塊にはなっていない。（池内さんの図）



重力系では、構成する要素の素直な
たし算（相加性）が成り立たない。

しかし、普通の統計は、系の相加性を
仮定している。

密度と大きさ: de Vaucouleurs-池内



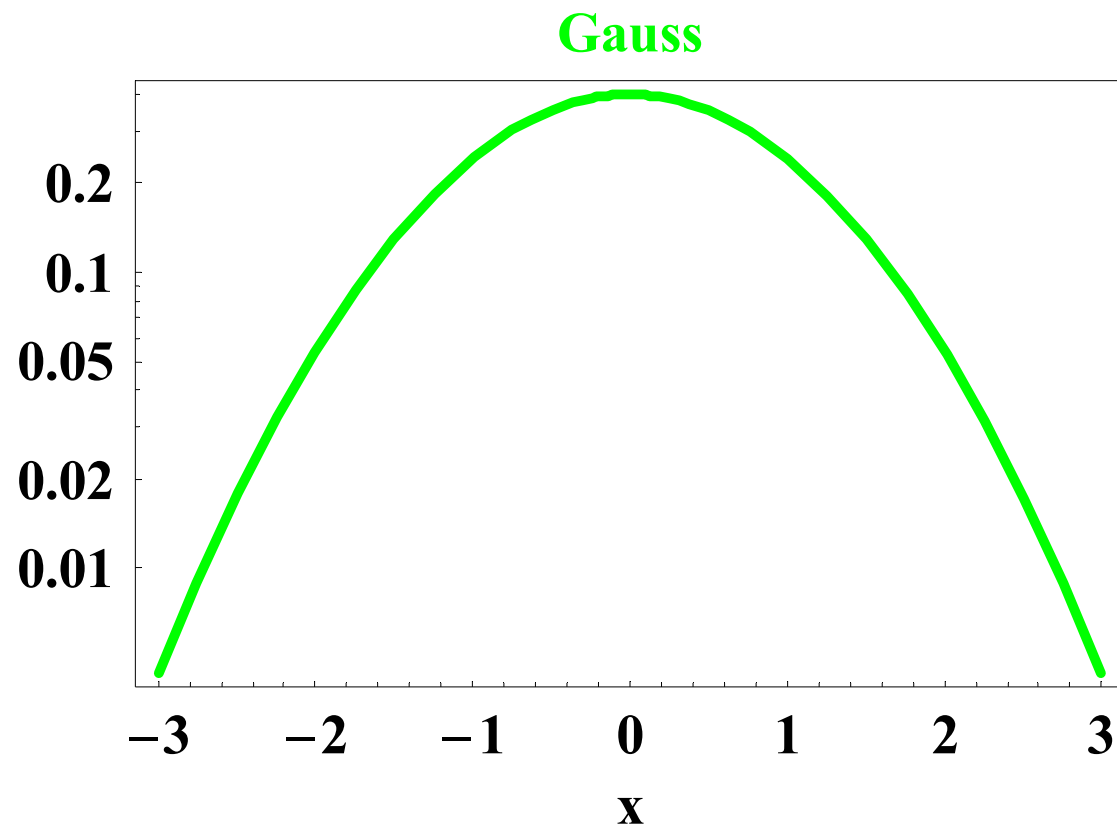
普通の統計での重力の不具合 その2

- 重力は長距離力なので、どこまでも力が及ぶ。

しかし、普通の統計(ボルツマン統計)では、
ある程度 離れると急激に影響が無くなる。

普通の統計の分布 (ボルツマン分布)

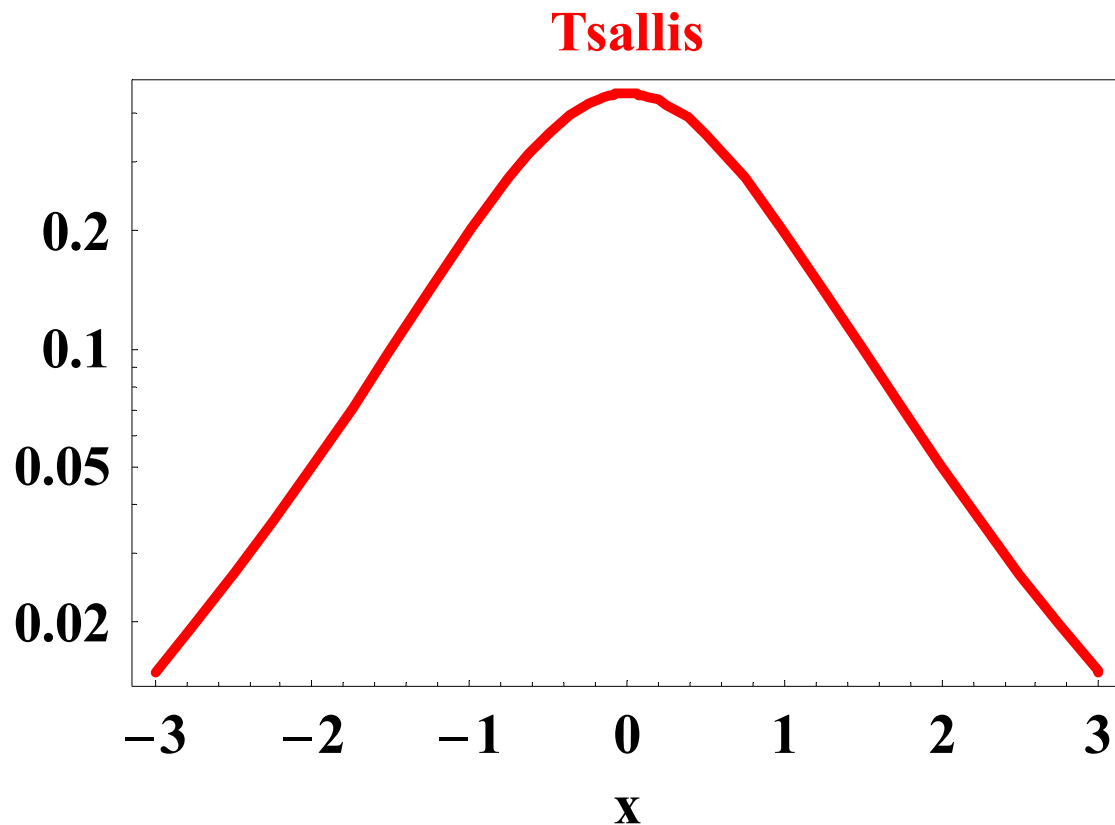
- 分布の端(テイル)は短い



テイルの長い分布

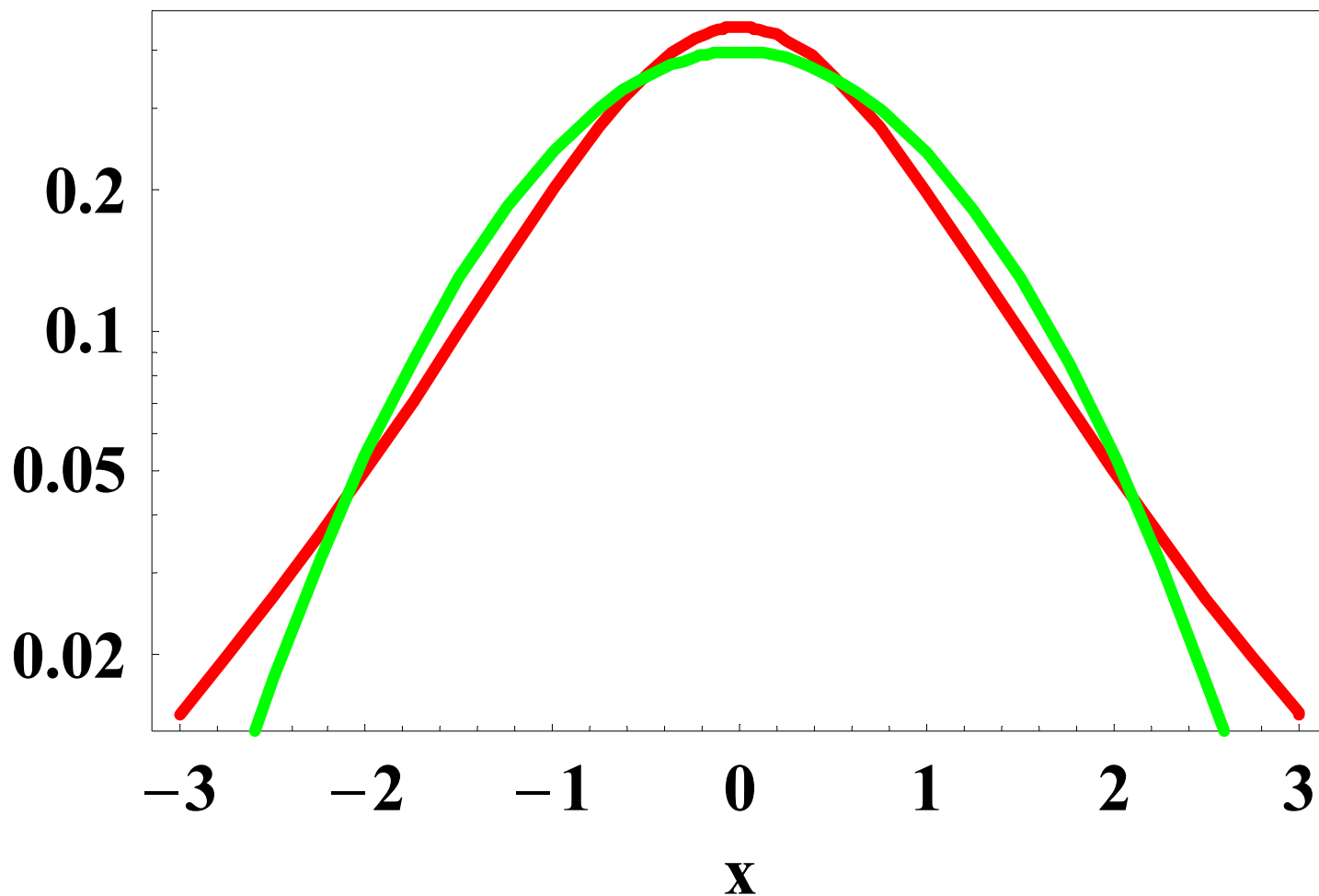
Tsallis 分布、 Renyi 分布

分布は、端の方までテイルを引く べき型



普通の分布(ボルツマン統計 ガウス型の例) と べき型分布(Tsallis統計)を 比べる

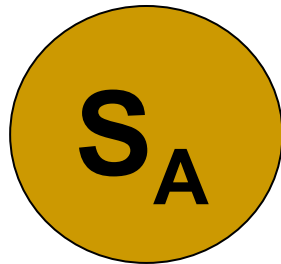
Gauss and Tsallis



普通の統計(ボルツマン統計)とは

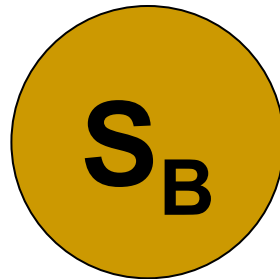
S : 乱雑さ(エントロピー) : 熱の変化を温度で割った量

銀河A系



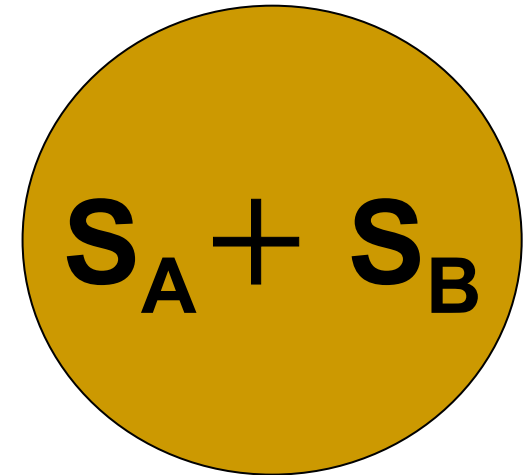
+

銀河B系



合成
=

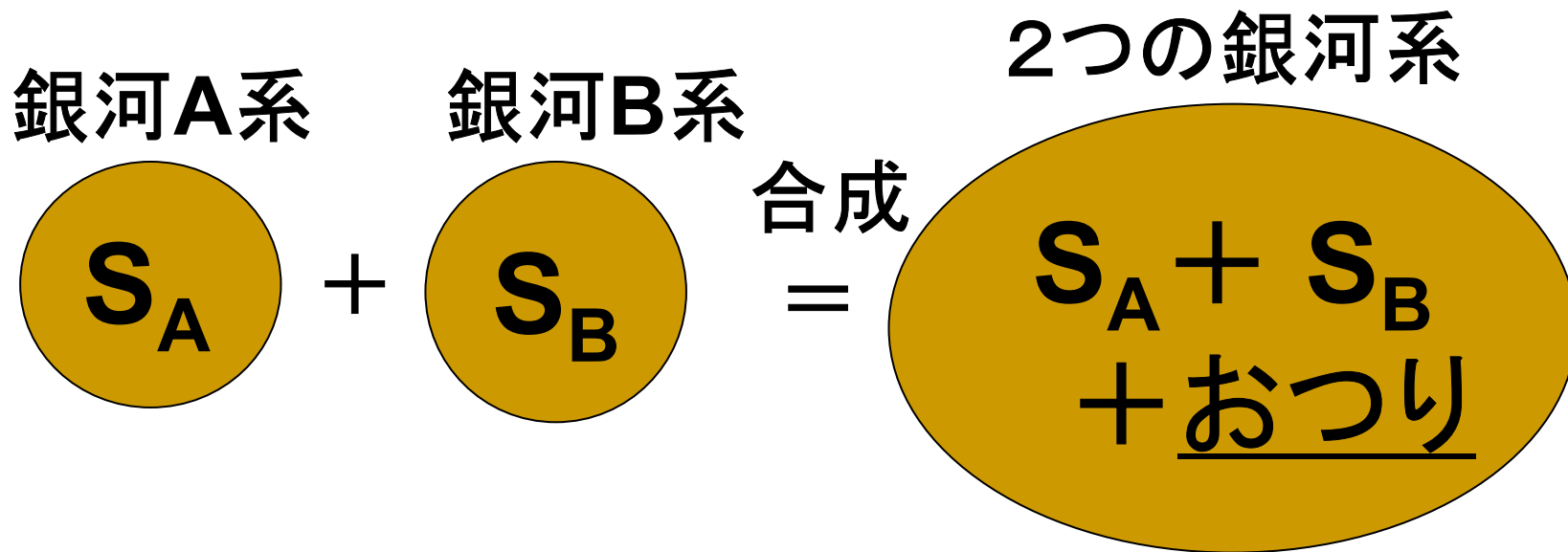
2つの銀河系



- 相加性が成り立つ

非相加な統計 (Tsallis統計) とは

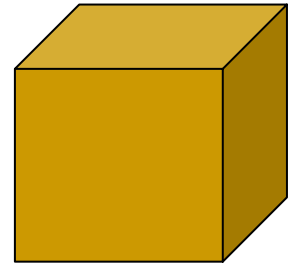
- 相加性が成り立たない



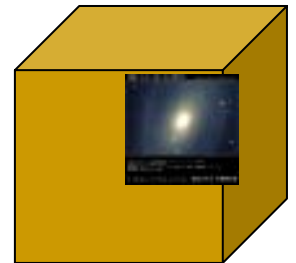
おつり: $(1 - q) \times S_A \times S_B$

銀河を統計的に数える ～ カウント・イン・セル法 ～

- ある体積の中に銀河が1つも無い確率
ボイド確率 $f(0)$



ある体積の中に銀河を1つ見つける確率
 $f(1)$

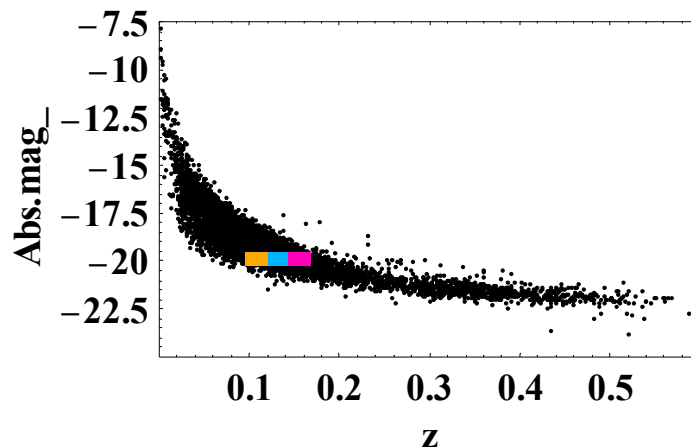


ある体積の中に銀河を2つ見つける確率
 $f(2)$



観測データ スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)

- アパッチポイント天文台 (米国・ニューメキシコ州)
- 口径2.5m主望遠鏡
- 分光された565,715個の銀河のカタログのうち、RA 150~210度、DEC 48~67度だけを選び、視野の端を捨て、絶対等級と赤方偏移を限定した5つの領域を選ぶ。



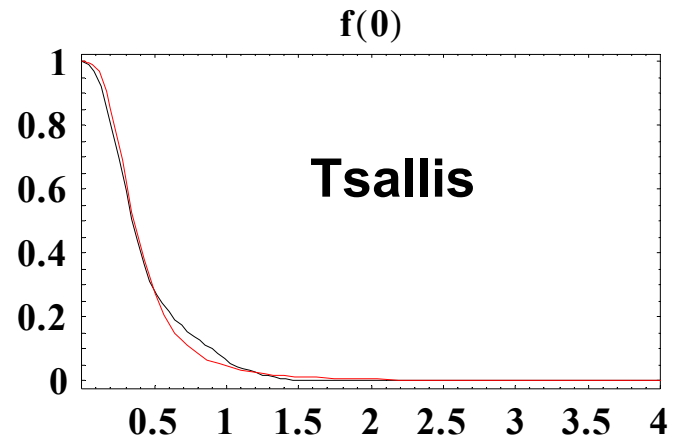
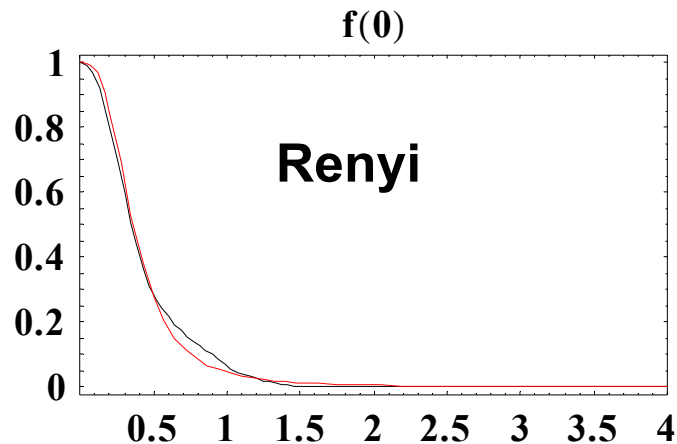
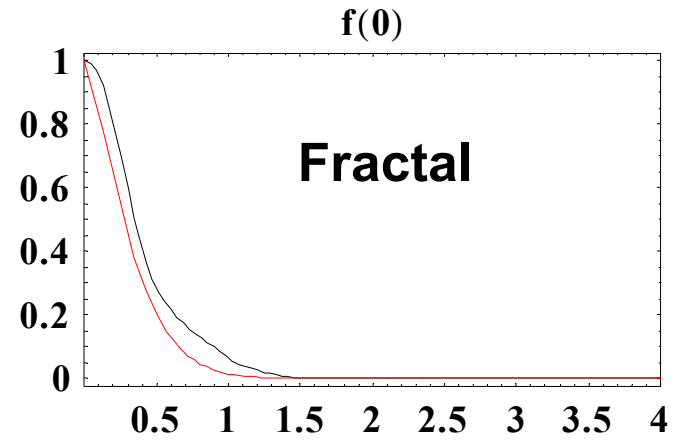
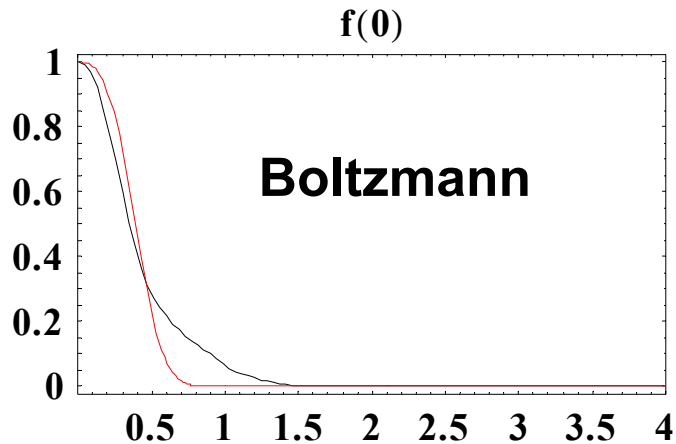
様々な統計の理論モデル

統計理論	加法的?	分布関数のテイルは長い?
普通の統計 (ボルツマン)	○	×
フラクタル	×	×
Renyi	○	○
Tsallis	×	○

■ 観測データと4種類の統計力学の比較

ボイド確率 v.s. 距離

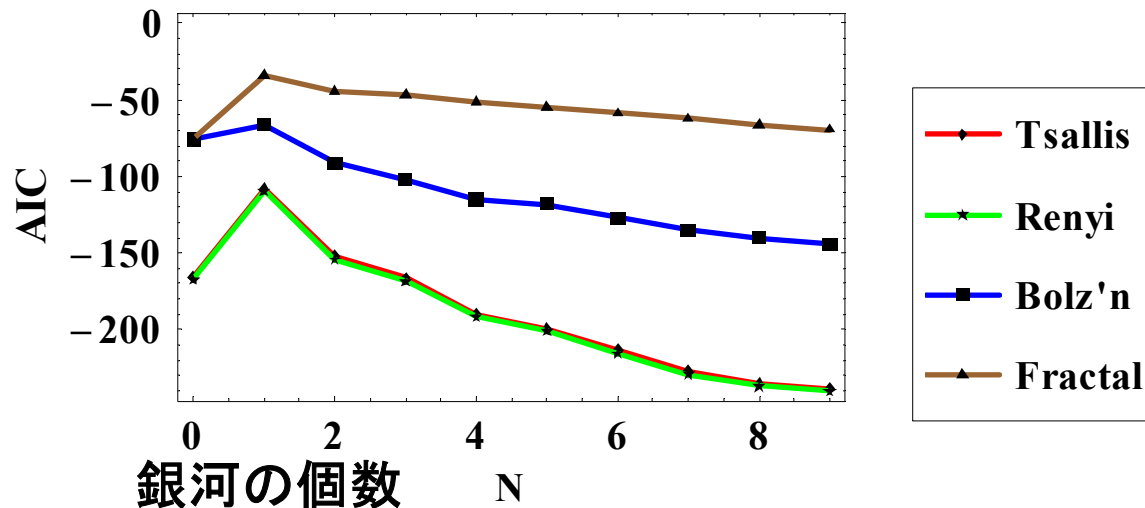
- 銀河の個数密度に依存しない結果を得るため、横軸の距離はスケーリングしてあります。



赤池情報量規準(AIC)を用いて、4種類の統計モデルを比較

■ AIC: Better model has smaller AIC measure

$$\text{AIC} = -2 \times (\text{maximum log likelihood}) + 2 \times (\text{number of parameters})$$



SDSSデータの解析結果

- 15 種類のvolume limited samples で同じ結果!
- Tsallis 統計とRenyi統計が、銀河分布をベスト・フィット。
- 従って、分布関数のテイルが長いことが、主に重力によって形成された宇宙の大規模構造を表すエッセンシャルな性質。
- ここでは、赤方偏移依存性は見えませんでした。(観測データの赤方偏移が比較的小さかったため。)
- これらの結果は、別の観測データ CfAll Southの解析結果 (Physica A 341 (2004) 215-233)とコンシステント。

宇宙論的 N体シミュレーション (Tatekawa&Mizuno astro-ph/0608691) との比較

■ ダークエネルギー・モデル $p = w \rho$

いろいろな w の値についてのシミュレーションと比較

$w = -0.5, -0.8, -0.9, -1.0, -1.1, -1.2, -1.5$ について

初期条件5種類ずつ計算

銀河 128の3乗 個

赤方偏移 $z = 10, 5, 4, 3, 2, 1, 0$



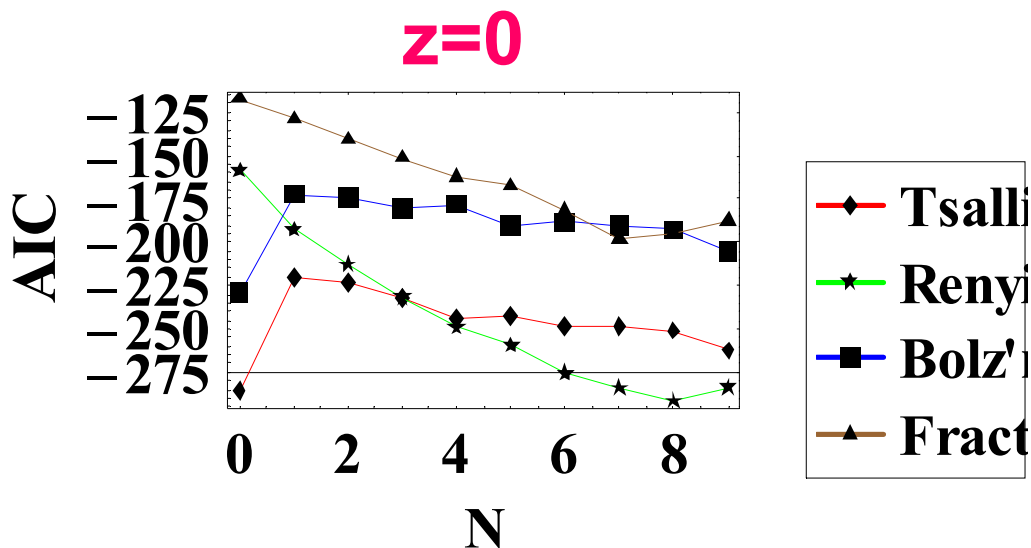
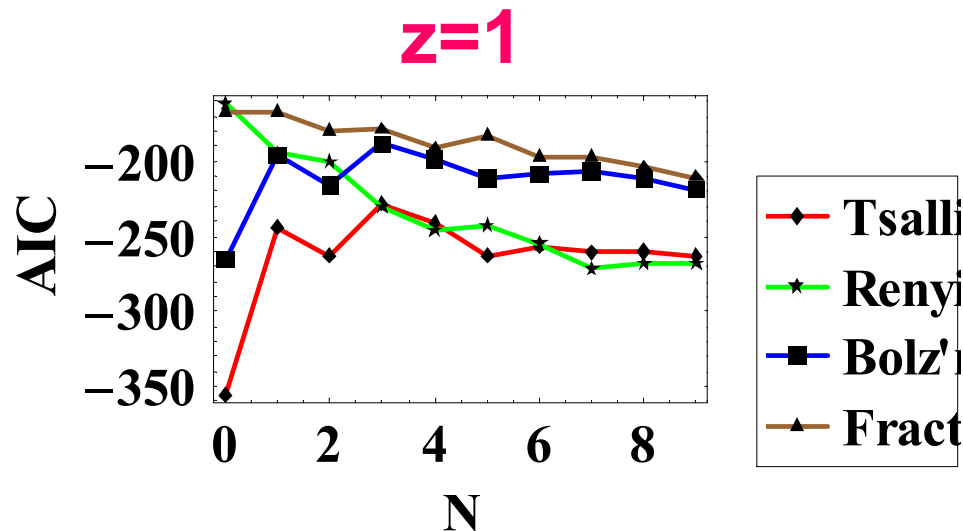
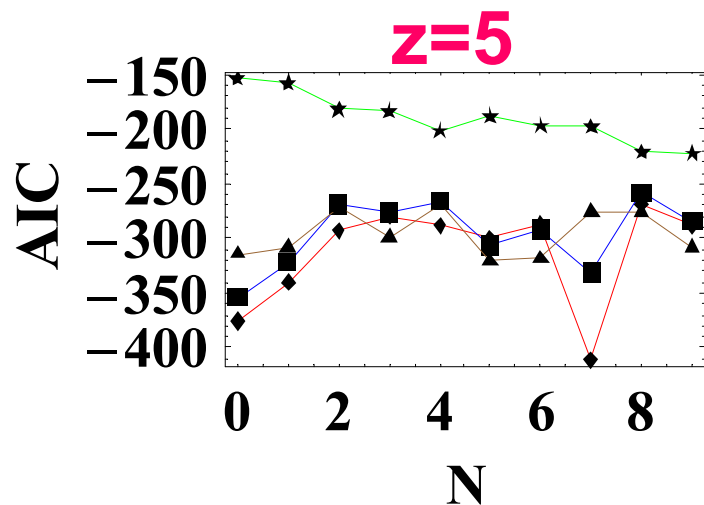
宇宙の時間発展を追う

★ w 依存性 ?

★ z (赤方偏移) 依存性 ?

4種類の統計理論モデルを比較

$w=-0.9$ の場合のAIC



シミュレーションの解析結果

- 全ての w 、全ての z について、Tsallis統計は良くフィットしている。
- z が大きい時(昔)は、Boltzmann統計も良く合う。
- z が小さくなるにつれて(時間発展するにつれて)、Boltzmann 統計は合わなくなり、Renyi統計が Tsallisと同程度に良く合ってくる。宇宙の大規模構造が形成されてくる様子を反映している。
- w 依存性は、残念ながらほとんど見えない。
- z の小さいところ ($z=0,1$)での振る舞いは、N体シミュレーションとSDSS 観測データとは、必ずしも一致しない。
両者の違いは、見えないダークマターの分布の違いか？
現在、考察中です。

おまけ： 育児と仕事の両立は楽しい

- 子供からは絶対的な信頼を得られる。
- 子供の言動に癒される。「ママ大好き。」
子供の視線は毎日が大発見の連続。
- 仕事のストレスは帰宅後に育児で癒し、
育児のストレスは仕事で発散できる。



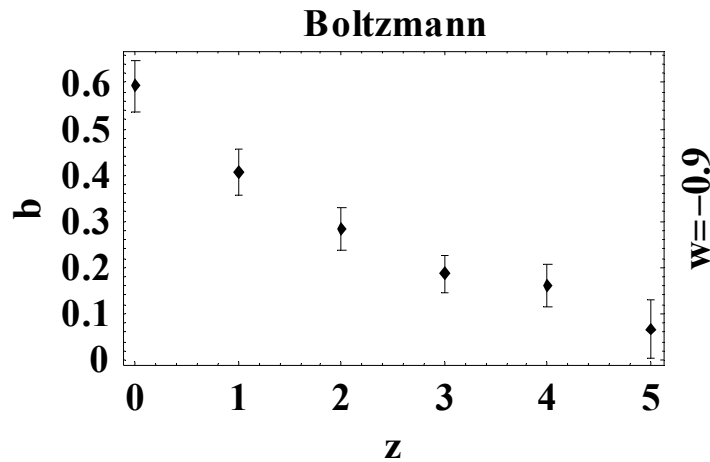
☆親は、時間管理、計画性が向上(マシ)。

☆子供は、多くの人に大切にされる。保育園の先生、ベビーシッターさん達・・・愛情深く、社交的に育つはず。

助けられた物：洗濯乾燥機、食器洗い乾燥機、食材の宅配

★親の介護・・・家族だけで抱え込まず、社会サービスを探して頼ろう。ケアマネージャー、ヘルパー、相談員、病院のケースワーカーさんにお世話になりました。相談するだけでも気が楽に。

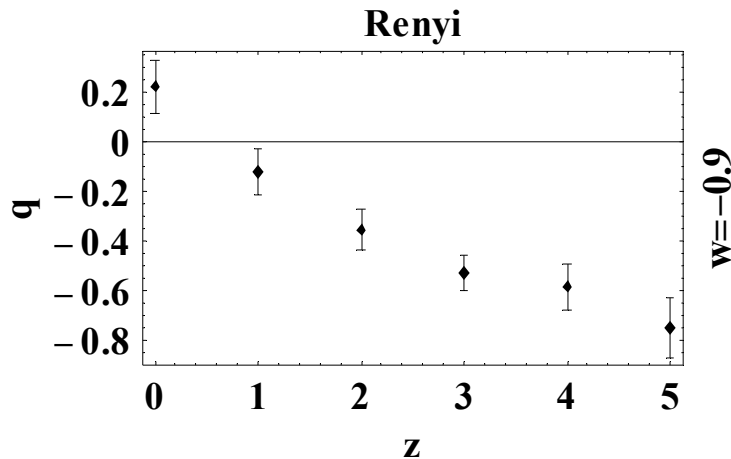
Parameters of each statistical models depend on redshift.



As smaller z , value of parameter b in Boltzmann becomes larger:

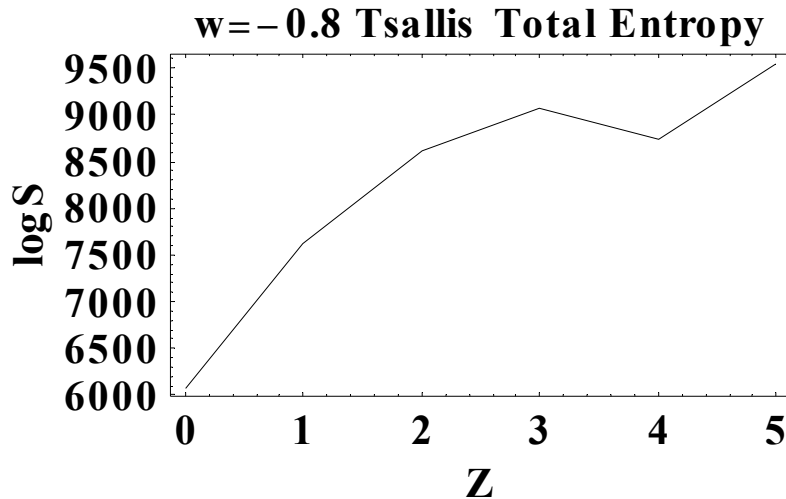
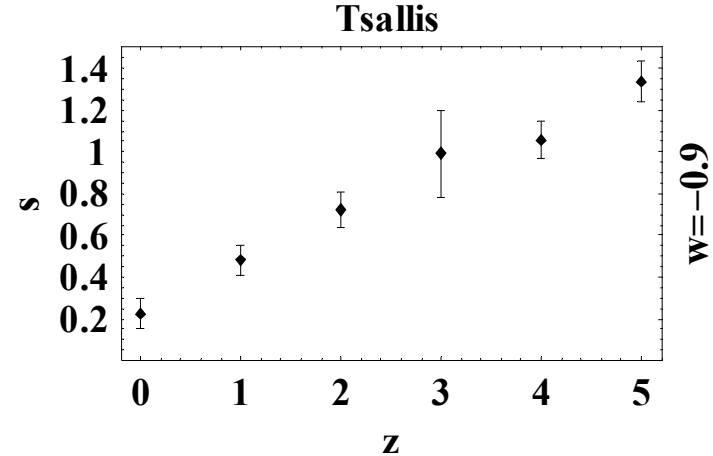
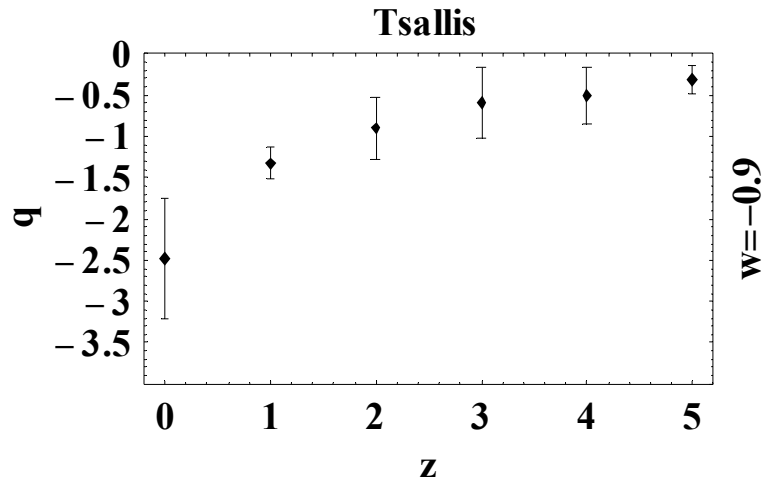
Represents forming large-scale structure .

Consistent with Saslaw et al.



As smaller z , value of parameter q in Renyi becomes larger:

Parameters of each statistical models depend on redshift.



As smaller z , value of parameter q and s in Tsallis become smaller.

Also total entropy of Tsallis becomes smaller.

C.f.) Temperature determined by velocity variances becomes higher.

理論(いろいろな統計理論)と 観測値を比べる

- 銀河はどんな統計に従って分布しているのかがわかる。



- その統計の性質から、銀河の分布に普遍的な性質がわかる。



- 宇宙の大規模構造を作る重力の普遍的な性質がわかる。

世界を作る4種類の力

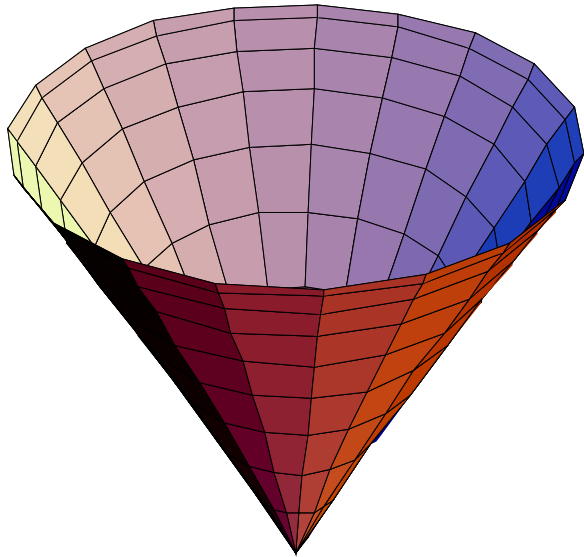
- ① 重力 : 常に引力として働く。
無限遠まで力が及ぶ。
- ② 電磁力 : 電荷を持つ粒子間に働く。引力と斥力。
正の電荷の周りに負の電荷が集まって
力をさえぎる。
- ③ 弱い力 : 素粒子を変身させる。引力は無い。
力は 10^{-18}m までしか届かない。
- ④ 強い力 : クォーク間に働く。
力は 10^{-15}m までしか届かない。

自己重力系を研究するための 2種類の方法

- ① なるべく多くの効果を取り入れ、どのように時間発展するかを追う方法。
ガスの力学、エネルギーの放射、環境・・・

- ② 統計力学的アプローチ（我々はこの方法）
1つ1つの銀河をまとめて集団の分布として扱う方法。
最も大事な重力の効果に着目し、天体の構造の普遍的（ユニバーサル）な性質を理解するのが目的。

参考) 宇宙の歴史

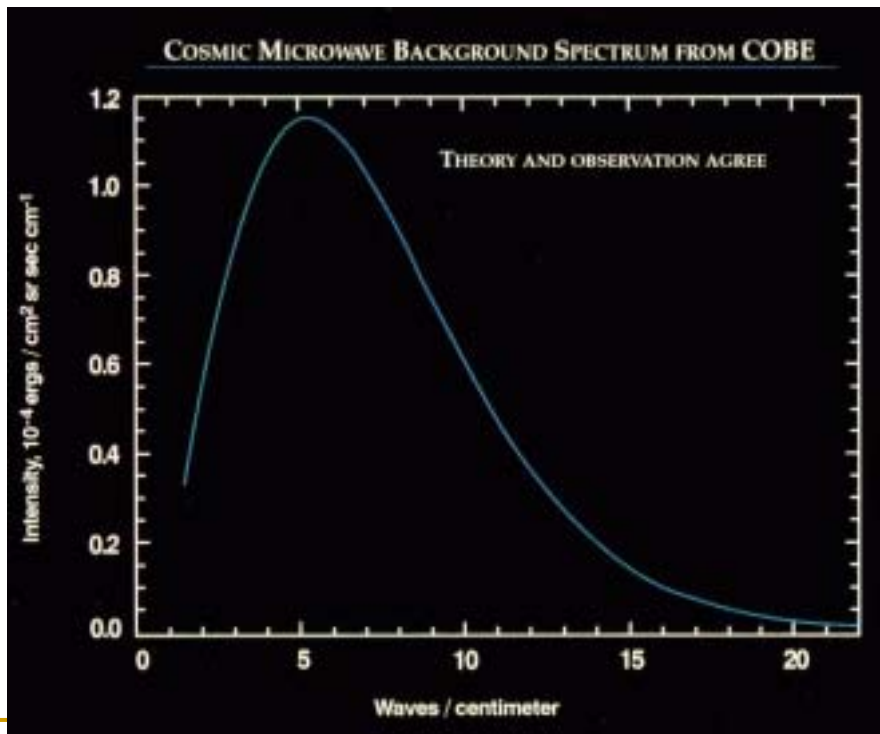


宇宙がずっと膨張していれば、
過去には宇宙は密度が高く
熱かったはずです。

過去には、物質を構成する
陽子や電子はばらばらになって
光と作用しあっていたはずです。

- かつて、宇宙の光の放出・吸収がつり合っていました。
 - 宇宙膨張に伴って、この時の宇宙のスペクトルを保ったまま冷えてきたはず。
- その頃の宇宙のスペクトルが観測されています。

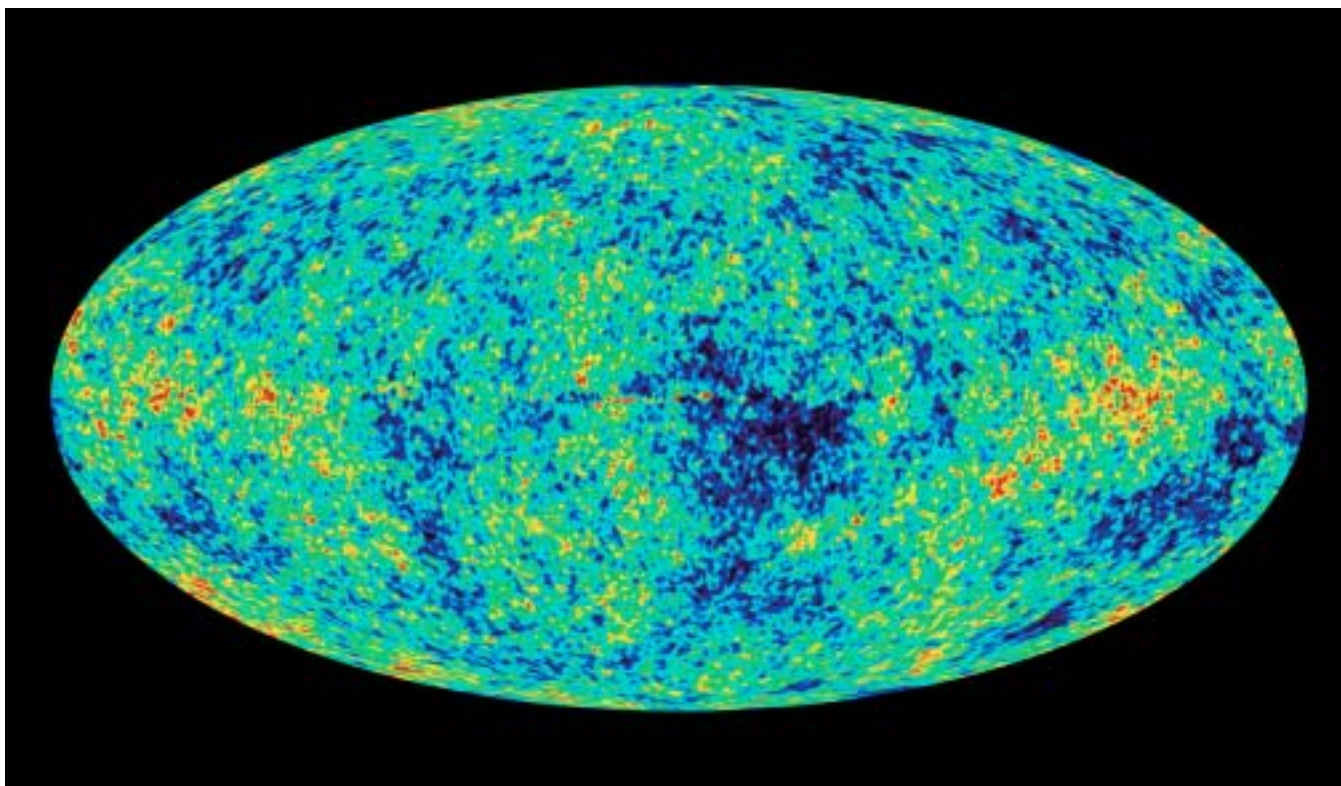
↑ 光の強さ



電波信号として
観測された
初期宇宙の
スペクトル

短い ← 波長 → 長い

- このスペクトルを詳しく観測すると、過去の宇宙の温度が、方向によって0.001%程度わずかに揺らいでいることがわかりました。



赤： 高温 青： 低温

- 天空の角度10度程度の範囲で温度が変わっているのです。これは、現在観測されている、銀河の群れが進化してきた痕跡と一致しています。
- 銀河の種となる「宇宙の密度揺らぎ」が存在すれば、この時期の温度も揺らいでいるはずだからです。
- つまり、銀河の種が発見されたのです。



深宇宙探査の進展

CfA

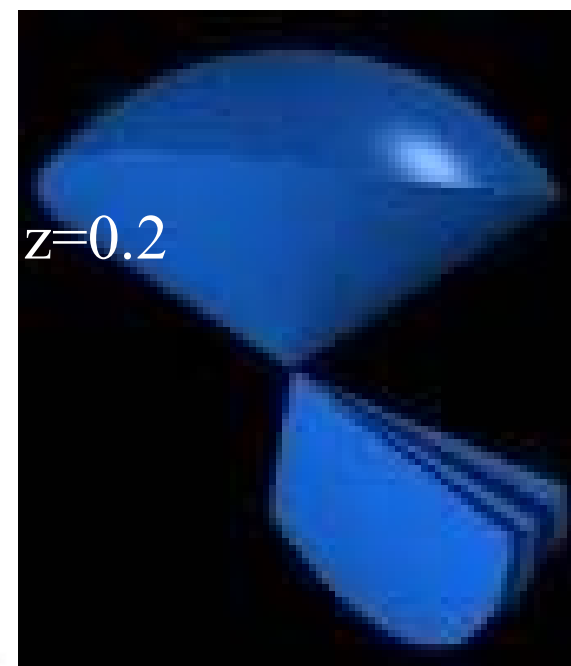
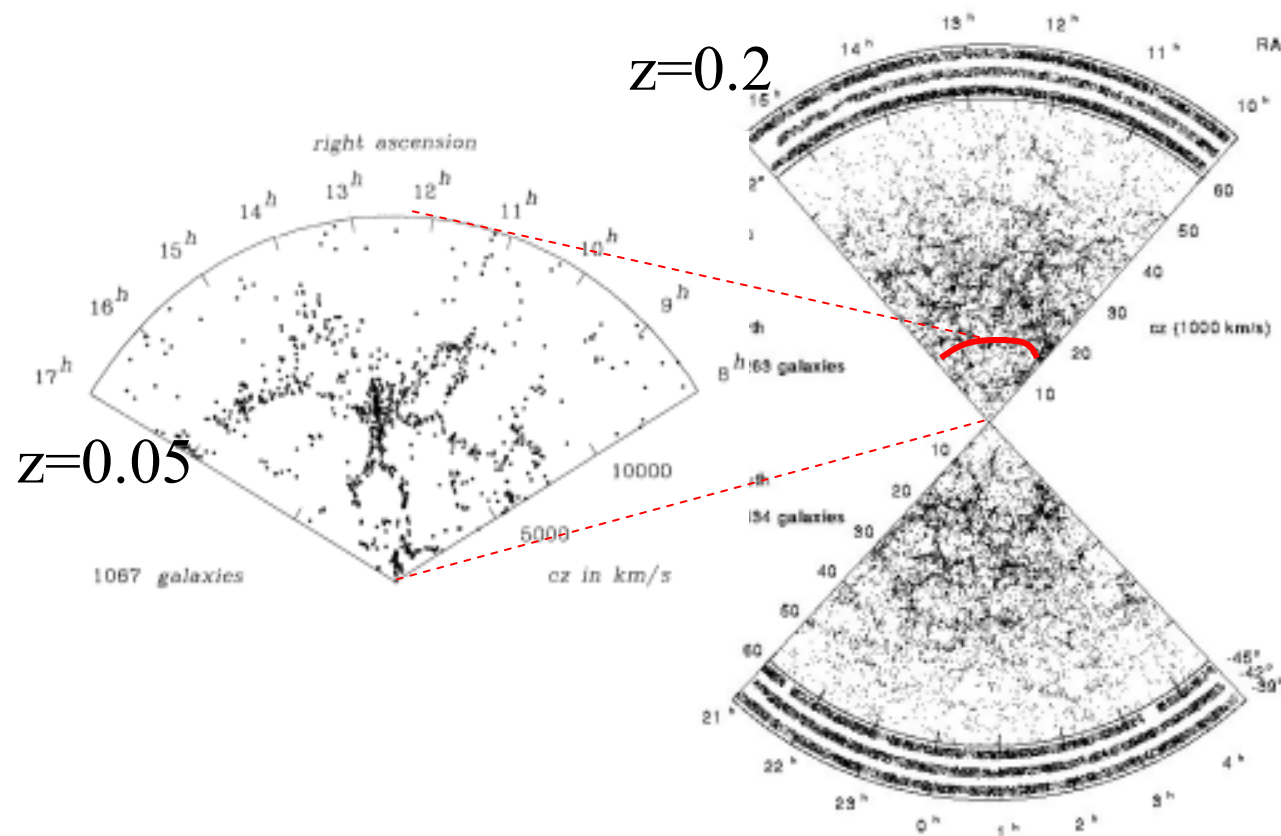
銀河1067個

Las Campanas

銀河26000個

SDSS

銀河80万個(予定)



全天の4分の1

宇宙の大構造に関する統計解析が可能になってきた