宇宙の歴史と銀河の形成・進化

長島雅裕(長崎大学教育学部)

おおまかな話の流れ

- 1. 銀河とは何だろうか
 - その多様性と規則性
- 2. 膨張する宇宙
- 3. 構造の進化
- 4. 銀河の進化
- 5. これからの銀河形成論
- 6. まとめ



天の川

夏の「天の川」 …星の集まり

天の川=「銀河系」(我々の銀河)



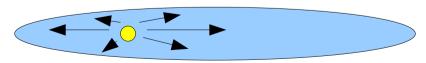
1年を通じて撮影した 天の川をつなげた「パノラマ写真」



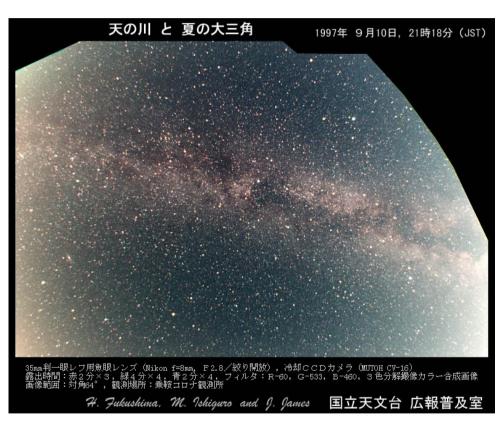
銀河とはどのようなものか



我々の銀河系(内側から見ている)



←アンドロメダ銀河 (代表的な渦巻銀河)





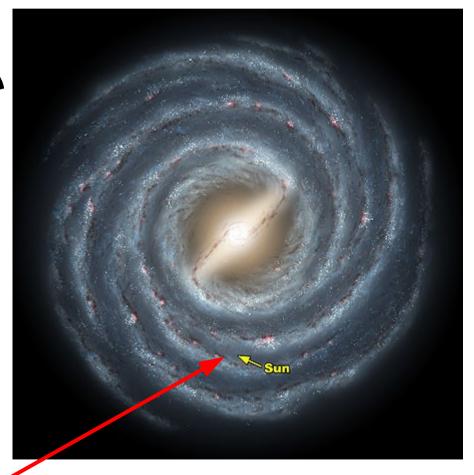
銀河系の想像図

- ・ 銀河系:約1千億個の星の集団
- 渦巻型(棒渦巻き型?)の銀河
- 宇宙の中では大きめ
- 銀河系の外には出られない
 - 巨大なので
- 様々な観測から推測する

注:以下で出てくる数字は大雑把なものです。2倍3倍は誤差のうち、桁が合っていればOKと思ってください。

「1=2」が成り立つ世界です。

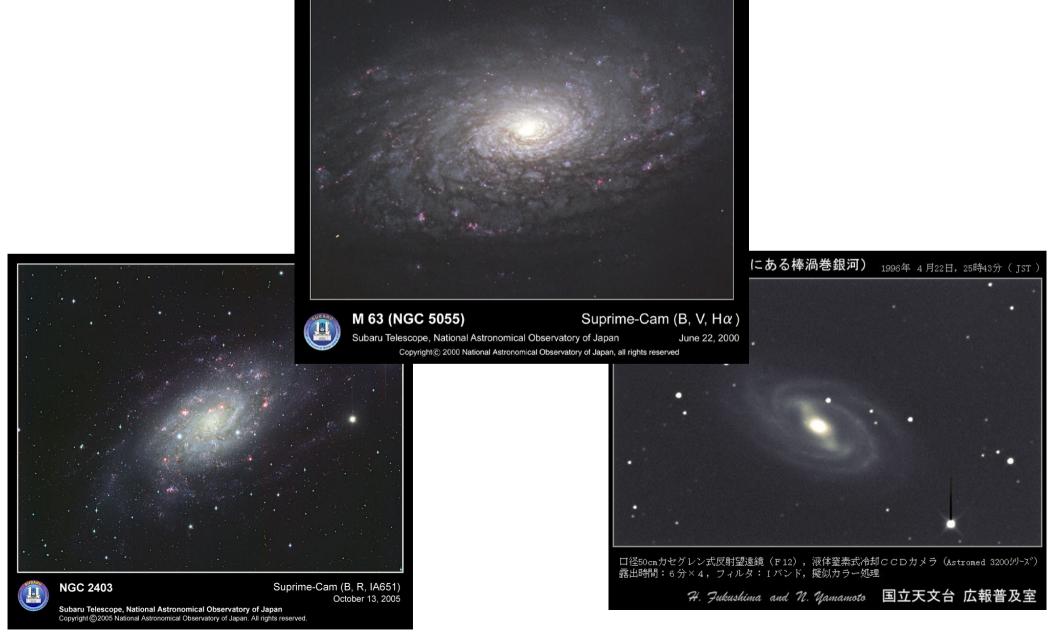
およそ10万光年



「銀河」とは

- 銀河(galaxies)
- 星の集団
 - およそ1千万~1兆個程度の星(連続的に分布)
 - ▶ 質量 M ~ 10⁷⁻¹²M_{sun}
 - ▶ 矮小銀河~巨大銀河
- 色々なサイズ・質量
 - ► 0.1-10kpc (300-3万光年)
- 密度
 - ト およそ10¹²M_{sun}/(10kpc)³~M_{sun}/pc³
 - ► 1pc(約3光年)立方に星一つ

渦巻銀河、棒渦巻銀河



横から見た渦巻銀河



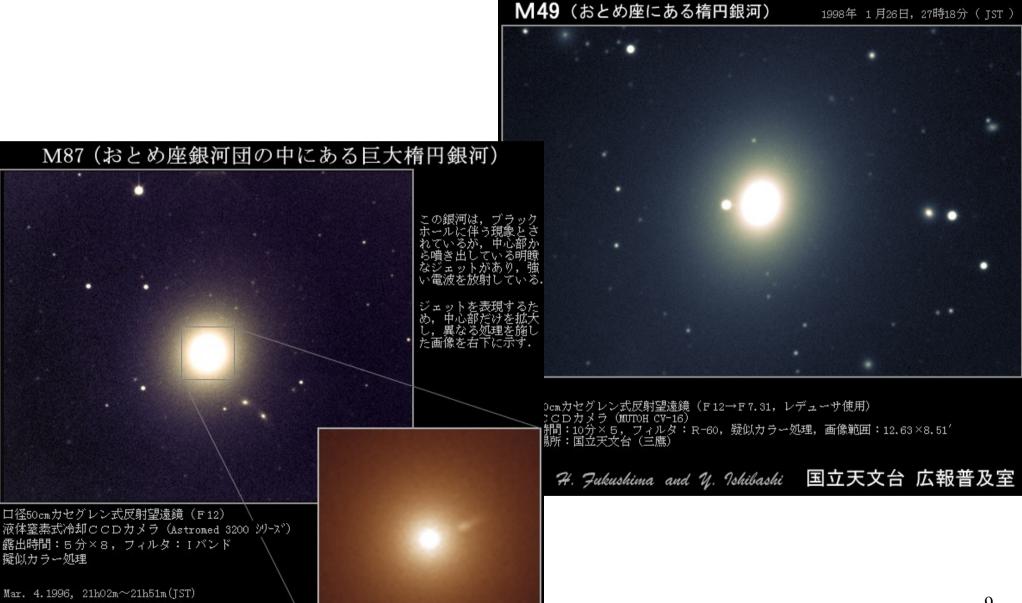
多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
 - 渦を巻く腕がある
 - ガスを持ち、新たに星が作られ続けている
- レンズ状銀河(Lenticular)
 - ► SとEの中間(S0)
 - ディスクがあるが、ガスはほとんどない
- 楕円銀河(Elliptical)
 - ▶ 楕円~円
 - ガスがほとんどなく、古い星がほとんど
- 不規則銀河(Irregular)
 - ▶ 決まった形を持たない。矮小銀河に多い

楕円銀河

74. Fukushima

国立天文台 広報普及室



多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
 - 渦を巻く腕がある
 - ガスを持ち、新たに星が作られ続けている
- レンズ状銀河(Lenticular)
 - ► SとEの中間(S0)
 - ディスクがあるが、ガスはほとんどない
- 楕円銀河(Elliptical)
 - ▶ 楕円~円
 - ガスがほとんどなく、古い星がほとんど
- 不規則銀河(Irregular)
 - ▶ 決まった形を持たない。矮小銀河に多い

S0銀河(レンズ状銀河)

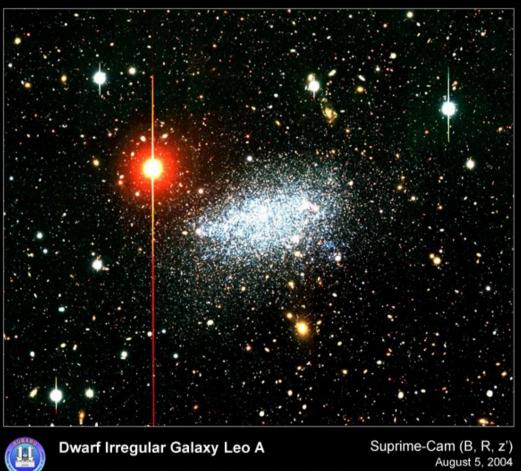


多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
 - 渦を巻く腕がある
 - ガスを持ち、新たに星が作られ続けている
- レンズ状銀河(Lenticular)
 - ► SとEの中間(S0)
 - ディスクがあるが、ガスはほとんどない
- 楕円銀河(Elliptical)
 - ▶ 楕円~円
 - ガスがほとんどなく、古い星がほとんど
- 不規則銀河(Irregular)
 - 決まった形を持たない。矮小銀河に多い

不規則銀河





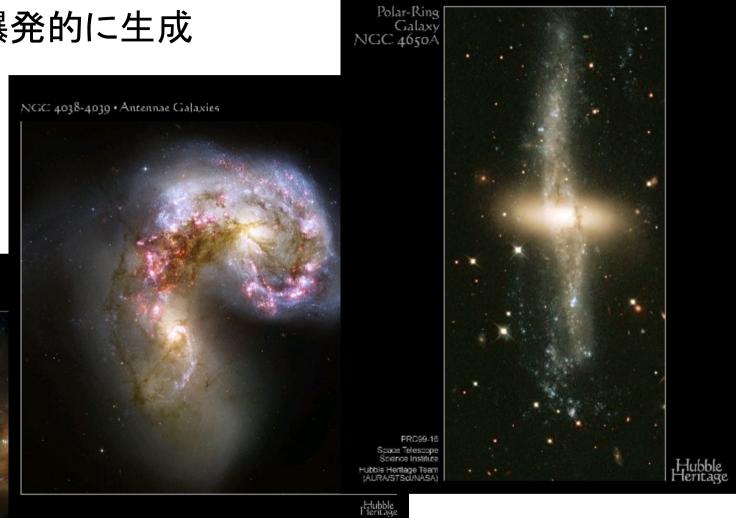
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
 - 渦を巻く腕がある
 - ガスを持ち、新たに星が作られ続けている
- レンズ状銀河(Lenticular)
 - ► SとEの中間(S0)
 - ディスクがあるが、ガスはほとんどない
- 楕円銀河(Elliptical)
 - ▶ 楕円~円
 - ガスがほとんどなく、古い星がほとんど
- 不規則銀河(Irregular)
 - ▶ 決まった形を持たない。矮小銀河に多い

合体する銀河

・ 新しい星が爆発的に生成





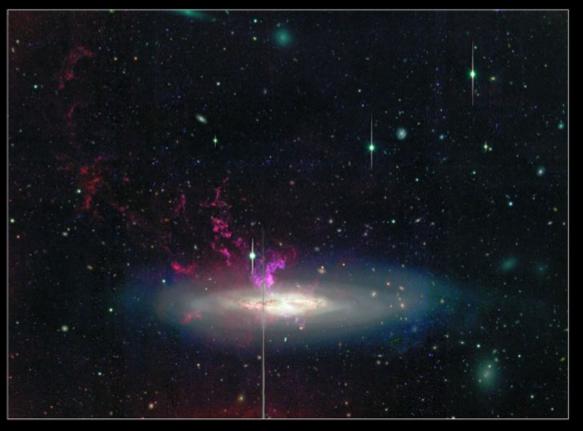
Galaxies NGC 2207 and IC 2163

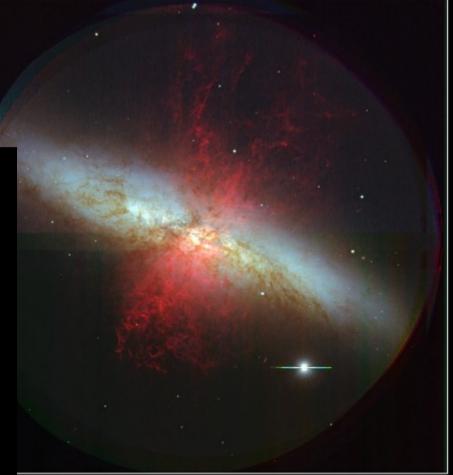
NASA, LSA, and The Hubble Hentage (STSc(MURA) LSAH tubble Collaboration - HST/ACS - STSc) PRC06 46

Heritage

活動的な銀河

- ・銀河が合体した?
- 水素のガスが放出 されている





M 82 (NGC 3034)

FOCAS (B, V, Ha)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan March 24, 2000

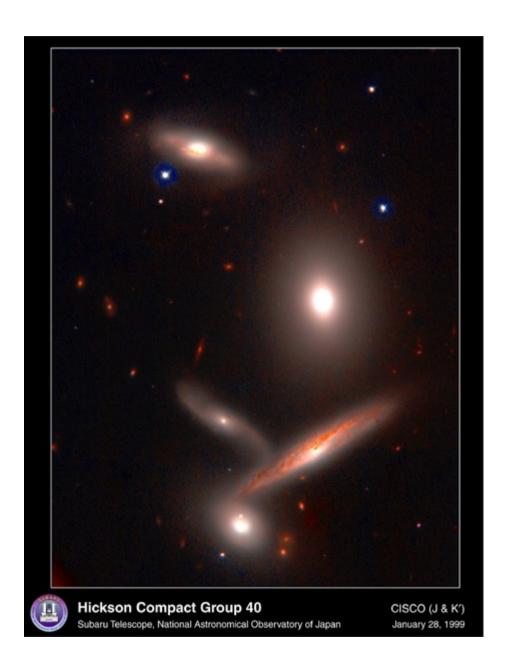
Copyright 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



Active Galaxy NGC 4388

Suprime-Cam (OIII, V, H α)

銀河群、銀河団



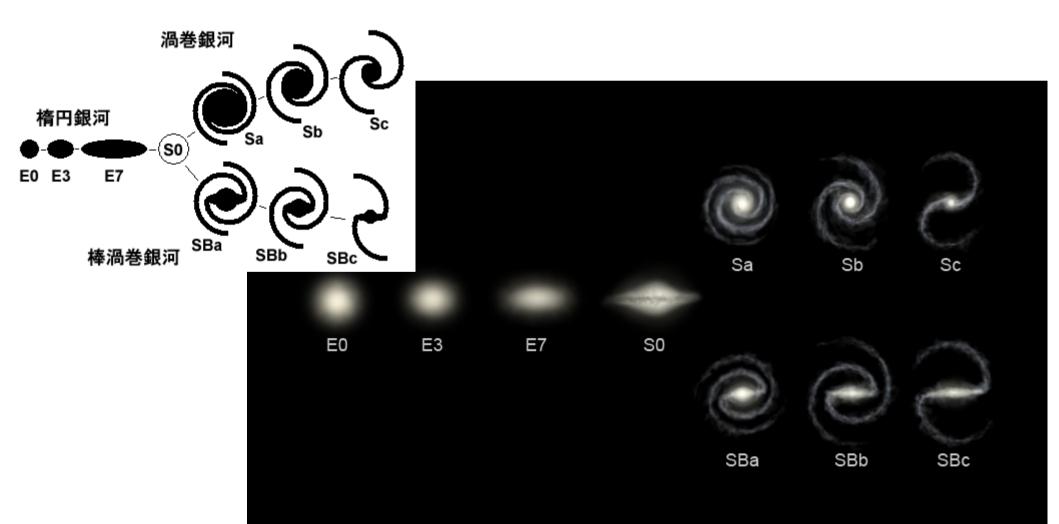


多様な形態(morphology)

- 渦巻き銀河(Spiral)
- レンズ状銀河(Lenticular)
- 楕円銀河(Elliptical)
- これらは何を意味しているのか?
- とりあえず分類することから始まった

ハッブル系列(ハッブルの音叉図)

- •「進化経路」ではない!
- ハッブルが形態を分類、当初は楕円→渦巻と進化するとも 考えられていた

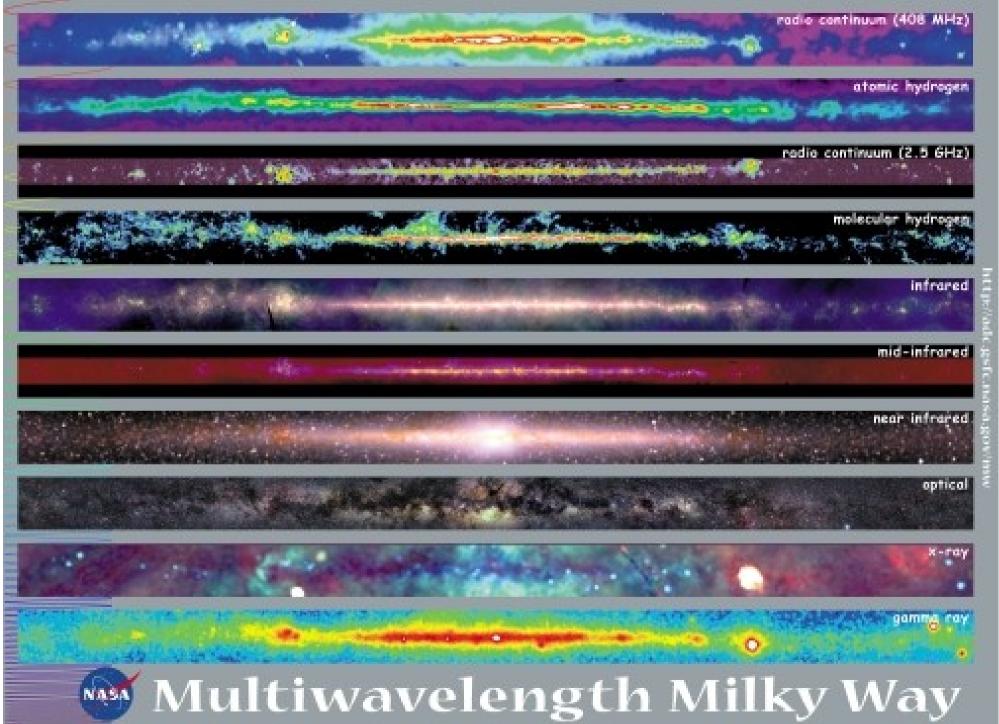


ここまでのまとめ

- 銀河は多様である
 - ▶ 姿、質量、大きさ、…
- しかし、規則性ももつ
 - 渦巻銀河は渦を巻いている
 - 楕円銀河は楕円型(あまりに平べったいのはない)
 - ・銀河が密集しているところは楕円銀河が多い
 - などなど
- 多様性の起源はなにか?



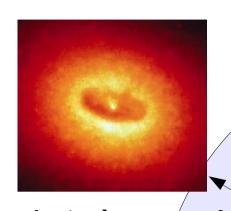
- 多様な物理過程を反映しているのか?
- ▶ しかし、単純な法則が多様性を生むことも多い
- 銀河を支配する法則を見つけよう
- まずは、最も身近で詳細に調べられる「銀河系」を見よう



見る波長が違うと、違って見える

- 電波…主にガス
 - ► e.g. 21cm線…中性水素原子(陽子と電子のスピンの向き)
- 赤外線…ダスト(ちり)からの(熱)放射
- 可視光線…星からの光
- 紫外線…大質量星からの光(大質量の星は寿命が短いので、若い星団である)
- X線…超新星爆発などにより加熱されたガス(数十万〜数 千万度)
- γ線…粒子加速や大質量星の超新星爆発?
 - ▶ まだ謎が多い

銀河系の模式図



銀河の回転速度~220km/s 一周するのに約2億年

ハロー(100kpc程度)

中心部に巨大 ブラックホール M~10⁶M

バルジ

ディスク

ガスを持ち、星形成が行われている

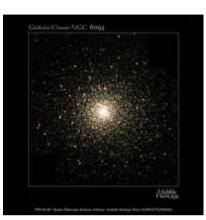
球状星団 M~10⁴⁻⁶M

VI _ sun

古く重元素の少ない星 (太陽の1/100程度) 種族IIの星

> 若い星が多い 重元素が多い 種族Iの星

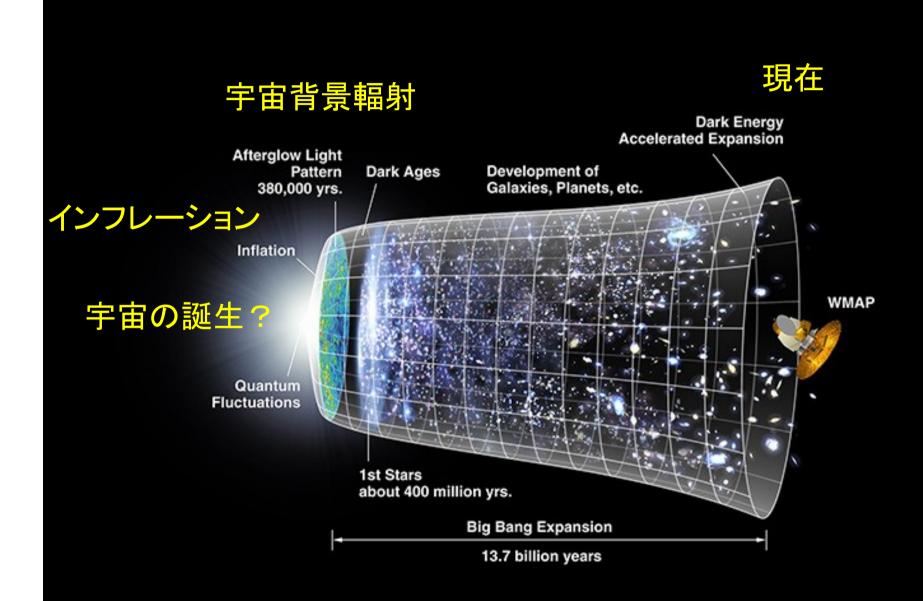
ダークマターが主



銀河の形成過程の理解に向けて…

- 銀河は多様だけれども、このように単純化してみると、共 通することも多い
- では、一体どのようにして、このような銀河が生まれてきた のだろうか?
- それを理解するためには、宇宙論的な時間スケールでの 銀河の進化を見る必要がある
- まずは、宇宙がどのように進化しているかの概略を見てみよう

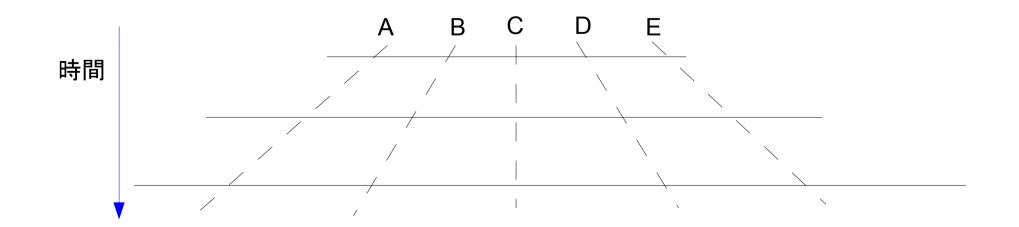
宇宙の歴史



http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html

宇宙の膨張

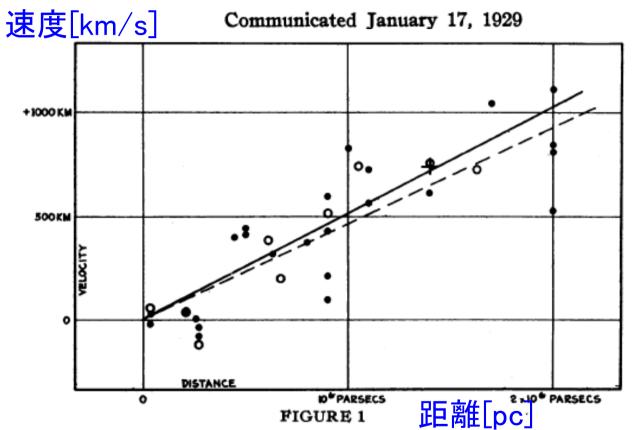
- A~Eの人々は、自分は静止していると思っている。
- 空間の膨張によって、彼らの物理的な間隔が、時間と 共に増大する
- 遠いところにいる人ほど、速く遠ざかる
- ハッブルの法則: 後退速度 \sim 距離 $v=H_0r$



A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

By Edwin Hubble

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

ハッブルの法則 遠ざかる速度は距離に比 例する

ハッブルの時代は、距離測定の誤差が大きく、一桁距離を小さく見積っていた

Hubble, E. 1929, in the Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 15, pp.168-173

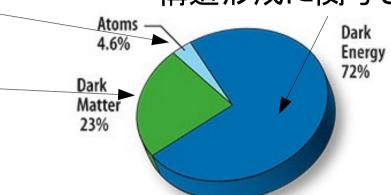
過去にさかのぼると…

- ・ 宇宙年齢は約137億年
- 過去には宇宙はもっと小さかった
- 宇宙の物質は圧縮されていた
 - すべてのものは光速を超えて伝われない
 - 熱のやりとりがない
 - 従って、「断熱」的に圧縮
 - 従って、宇宙初期は高温
 - ・ビッグバン
- 高温なので音速がほぼ光速であり、宇宙全体がほぼ一様であった
- ごくわずかの密度ゆらぎが進化し、構造を形成してきた
- どのように宇宙がはじまったのかは未だ明らかではない

宇宙史における登場人(?)物

- 星…光り輝く主人公
- ガス…明日の星(?)
- ダークマター…闇の支配者





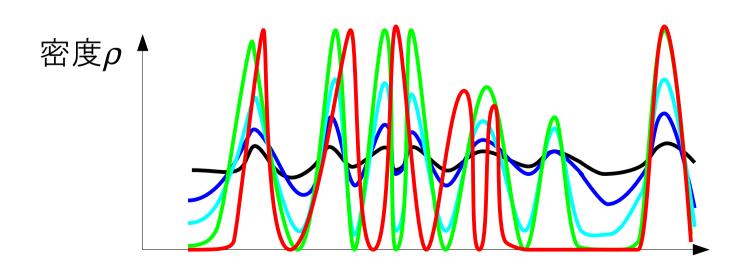
• 宇宙では重力が重要

http://map.gsfc.nasa.gov/media/080998/index.html

- ・ 正負の符号がない→遠方まで働く
- ▶ 力としては弱くても、長距離では重力しか働かない
- 宇宙初期には物質分布はほぼ一様
 - ▶ 重力で構造が成長
 - ▶ ダークマターが質量の大半を占める→構造形成の主役
- 現在はとても非一様
 - 星のあるところ、ないところ…

構造の「種」

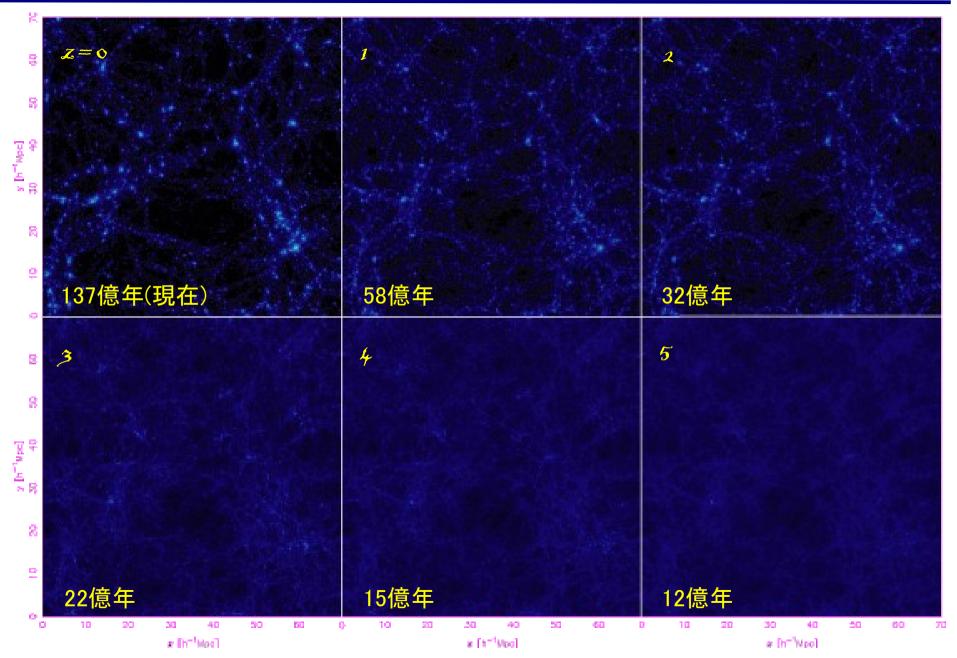
- 宇宙誕生時(?)に仕込まれた、ごくごく微小な密度の 揺らぎ(むらむら)があった
 - ▶ おそらく、量子力学の不確定性原理に基づく
- 濃いところは、周囲よりもほんのわずか、周囲を引き付ける重力(万有引力)が強い
- ほんのわずかでも、長い時間かけて、少しづつ成長していく→重力成長



空間 x

空間分布(dark matter)

宇宙の大きさ: 1/(1+z)

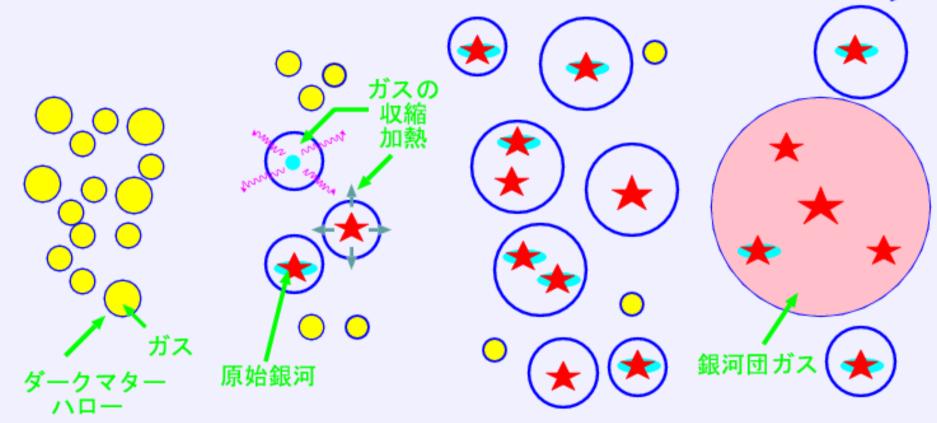


ダークマター分布のシミュレーション:一辺が約3億光年

銀河はどこでどのようにできるか

- ・ 密度揺らぎの成長→重力
 - ダークマター天体(ダークハロー)ができる
 - バリオンはダークマターの重力に従う
- バリオンは輻射を出す
 - エネルギーが抜ける
 - ダークハローの中心部に沈殿していく
 - 高密度になり、やがて星ができる
- ダークマターの密集したところで銀河が形成される(と 考えられる)

階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ

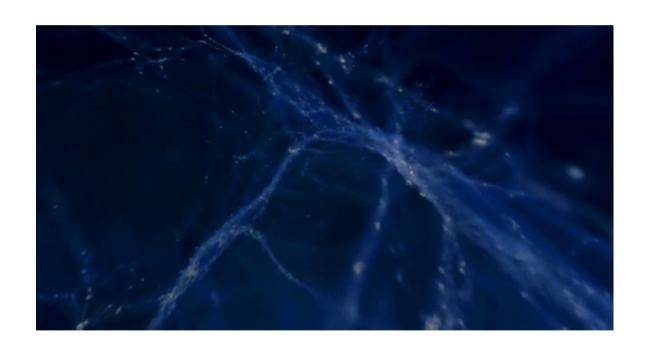


自己重力による 初期天体の形成 ガスの冷却による収縮, 星形成, 超新星爆発による ガスの加熱 銀河同士の合体

-現在の宇宙-銀河団の形成 我々の銀河の形成

単体の銀河形成シミュレーション

- まずはシミュレーション(渦巻き銀河)の様子を見てみよう
 - ▶ 白い点:星
 - もやもや:ガス



http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/index.php?id=spiral2

星はどうやって、どれくらいできるのだろうか?

星の進化:恒星の寿命から銀河を見る

- 大質量星は数千万年(ほぼ「一瞬」)で爆発→重元素汚染
- ・ 小質量星は寿命が長い

100

10

 0.1_{10^6}

100万年

 10^7

 10^8

1億年

圖

量[太陽質

質

6

Щ

回

大半はガスに戻る 一部はブラックホール・中性子星・ 白色矮星に固定 册 删 年 超新星爆発 齡(137億年) 重元素の放出) 色矮星

 10^{10}

100億年

 10^{11}

恒星の寿命[年]

35

 10^{9}

赤い⇔青い

「色」

色の定義:

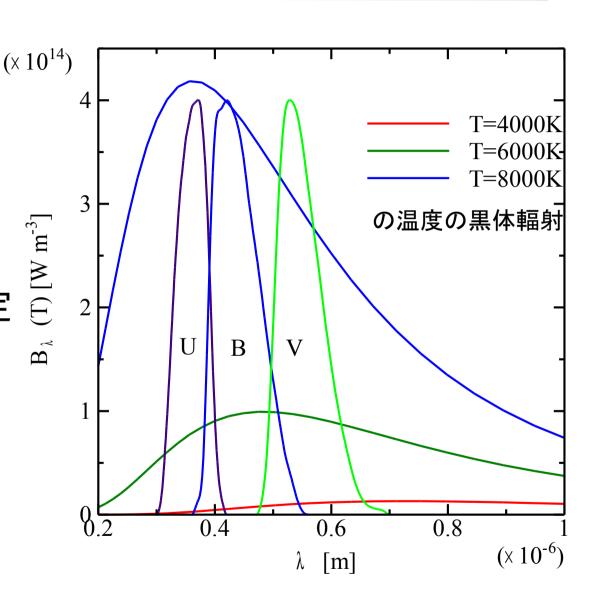
異なる波長での光の強度比

通常の天文観測:

フィルターをかけて、特定の波長の光だけを撮影

大質量星:高温→青い

小質量星:低温→赤い



同時に誕生した星の集団の進化

- 新たに星が作られなければ、星団は青→赤に変化していく
 - ▶ 球状星団はこれそのもの。楕円銀河も?



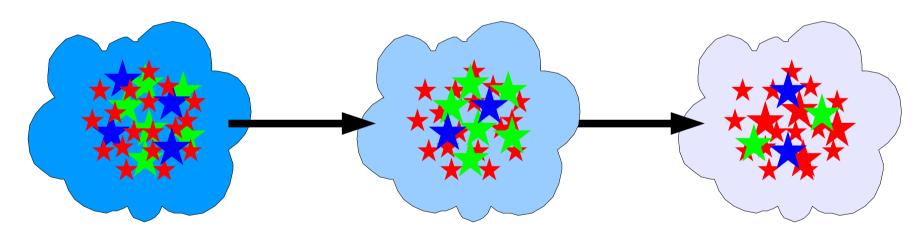
- ○明るいが少ない、 青い大質量星
- ○暗いが多い、赤い小質量星

- ○大質量星が死ぬ ○徐々に赤くなる
- ○赤い小質量星ばかり○一部は赤色巨星に

- 銀河進化を理解する上での大問題:
 - 大質量星と小質量星、どっちがどれくらい多いのか?
 - 「初期質量関数(IMF)」…質量と個数の関係
- 理論的にはほぼまったくわかっていない
- ・ 仕方ないので、太陽近傍から推測する
- というわけで、この問題は<u>とりあえず</u>放置!

ガスがある場合

- ガスから絶えず星が作られる。
- 新たにできる星の集団には、明るく青い大質量の星が含まれるので、全体も青く見える。
 - 渦巻銀河がこれに相当する
- ガスは外部から供給されなければ、徐々に減っていく



銀河系のガス量は太陽質量の100億倍、星形成率は約6-10Msun/年→約1-2Gyr(10-20億年)で使い果たす→供給

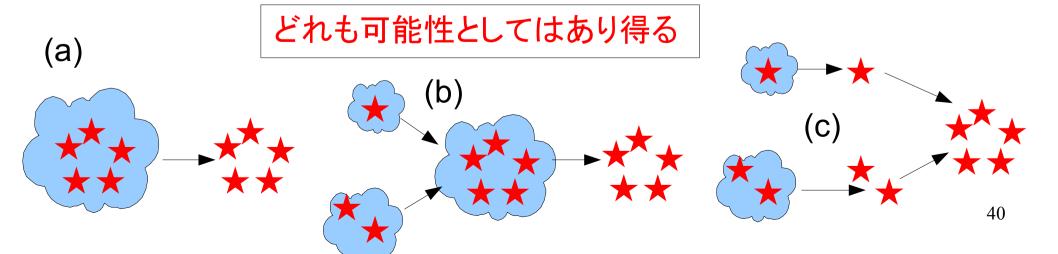
が必要

ここまでで言えること

- 観測事実: 楕円銀河は赤く、渦巻銀河は青い
- 観測事実: 楕円銀河はガスがなく、渦巻銀河は大量にある
- 楕円銀河ではずっと以前に星形成が止まった
 - 古い星が多い
- 渦巻銀河ではいまも星を作り続けている
 - ► (II型)超新星爆発の有無などからも言える
 - ⇒星がどのように生まれてきたか(星形成史)が重要
 - ⇒渦巻銀河のガスはどのように供給されているのか?
 - ⇒楕円銀河にはなぜガスがないのか?
 - ⇒ガスのある/なしと、「かたち」に関係があるのはなぜ?

楕円銀河

- 古い星が多い⇔新しい星がない
- ・ガスがない
 - ⇒早い段階で、ガスを使い果たし、新たなガスの供給がなかった、と考えられる
- 宇宙の初期に、爆発的に星を作ったフェイズがあった?
 - ▶ 爆発的星生成/スターバースト
- はじめから一つの楕円だったのか?それとも、複数の銀河が合体して現在の姿になったのか?



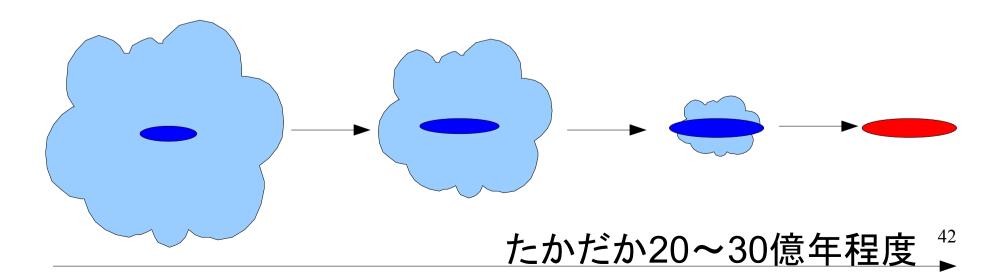
楕円銀河

- 始めから、いまと同じガス雲からできたとしたら:
 - なぜ「そのような」雲ができていたのか?
 - なぜ楕円になったのか?
- 合体で大きくなってきたとしたら?
 - 合体のときには簡単に楕円になれる(シミュレーションより)
 - 本当に、そんなに合体できるのか?
- 「冷たい暗黒物質」(CDM)宇宙では、合体が自然に起こる ことがわかっている[前頁(b),(c)]
- 合体しつつある銀河も大量に発見されている

楕円銀河は合体でできたようである

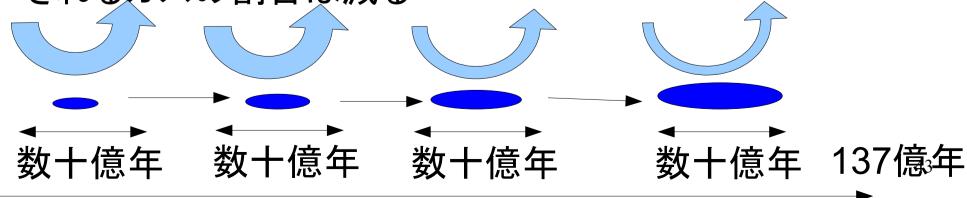
渦巻銀河

- 星を作り続けている
- ガスがあるので、星は作れる
- しかし、外部からの供給がないと、ガスがなくなる
- ハローから降ってくれば良い?
- しかし、せいぜい10億年程度で落ちきってしまう
 - 星形成で使い果たすタイムスケールと同じ程度
- 137億年の間に渦巻き銀河はなくなってしまう?



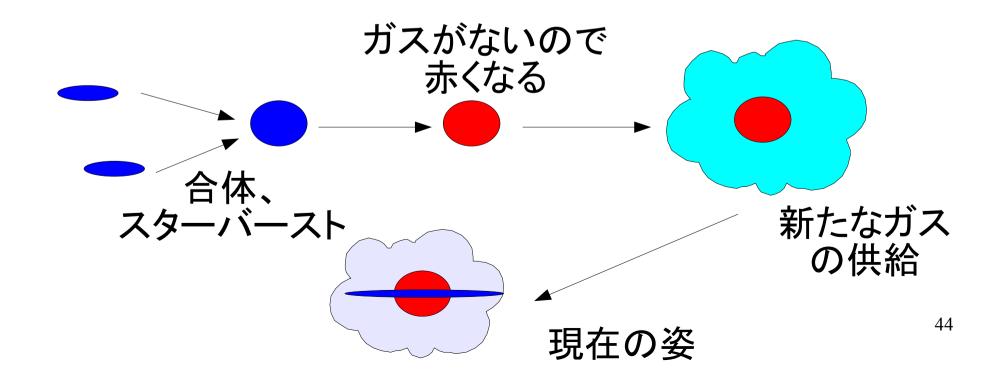
超新星爆発と超新星フィードバック

- 星は、ただ静かに死ぬのではない
- 太陽の8倍より質量の大きい星は、超新星爆発を起こす
 - 1発当たり、約10⁵¹[erg]=10⁴⁴[J]
 - ▶ 1つの銀河で100年に1発程度
- 銀河に降ってきたガスを加熱し、外に追いやる
- 追い出され、加熱されたガスは、時間をかけて再び冷え、 降ってくる → これを繰り返し、ゆっくりと成長する
- ただし、銀河が成長してくると、重力が強くなるため追い出されるガスの割合は減る



バルジの形成

- バルジ(渦巻銀河中心の膨らみ)はどうやってできた?
 - 全然わかっていない
- おそらく、宇宙初期に銀河同士が合体し、小さい楕円銀河 を作り、その後、ガスが降ってディスクを作った?
 - ガスが降着する際に、遠心力のため円盤状になる

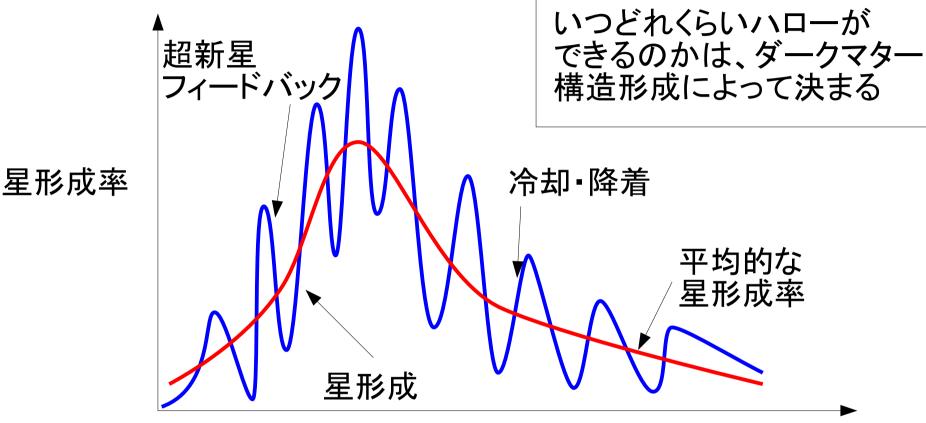


ガスの供給

- ハローが形成されるとき、その質量(と形成時期)に応じて、内部のガスの温度が決まる
 - 大質量ハロー内のガスほど高温になる
 - 銀河団サイズになると、1千万度を越える
- 熱いままだと、重力と圧力勾配の力(→気圧傾度力)が釣り合って、落ちてこない
- しかし、熱いと放射によってエネルギーを放出し、冷却し、 圧力が小さくなることで、銀河に降ってくる
- 冷却のタイムスケールは、現在付近でせいぜい10億年程度(1Gyr)
 - ▶ 銀河団は熱すぎて宇宙年齢かかっても冷えられない
- ダークマター構造形成と、銀河からの超新星フィードバックで、ガスがハローに供給される

渦巻銀河の歴史のイメージ図

どこかでバルジができるような合体?



時間

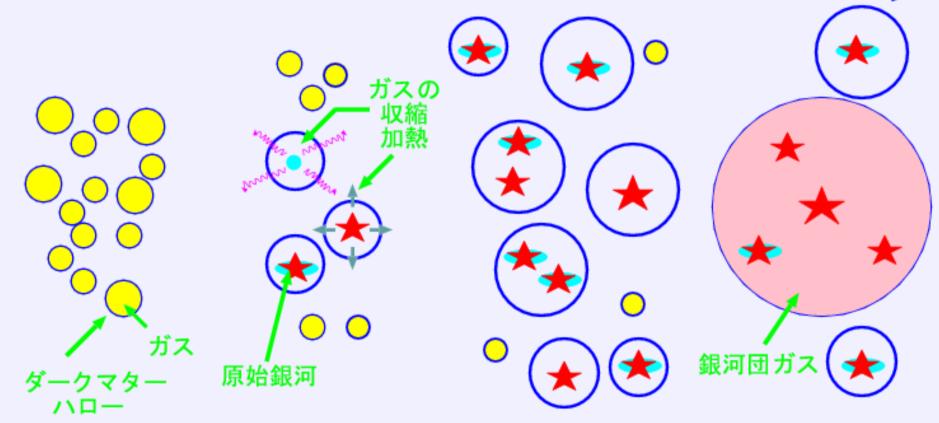
フィードバックが弱いと、宇宙初期にほとんどのガスが星になってしまう強すぎると、星がほとんどできない

※実際は、複数の銀河が途中で 合体するし、また一つの銀河でも 場所ごとに違うので、こんな単純 には見えない

ここまでのまとめ

- 考えなければならないプロセス
 - ハローの形成…ガス(バリオン)そのものをもたらす
 - 銀河へのガスの供給…ハローでのガスの冷却
 - 銀河での星形成
 - 超新星フィードバック…冷えたガスをハローに戻す
 - 銀河同士の合体…楕円銀河/バルジを作るきっかけ
 - 質量が違いすぎると大きい方には影響しない
- 以上をまとめると、次の図のように考えれば、統一的に多様な銀河の存在を理解できそう

階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ



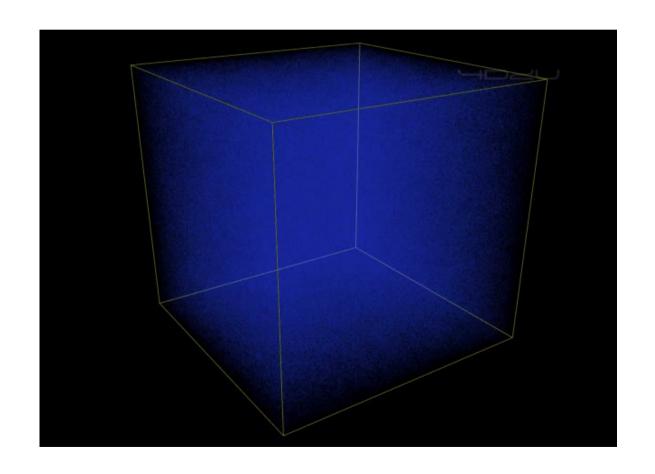
自己重力による 初期天体の形成

ガスの冷却による収縮, 星形成, 超新星爆発による ガスの加熱 銀河同士の合体

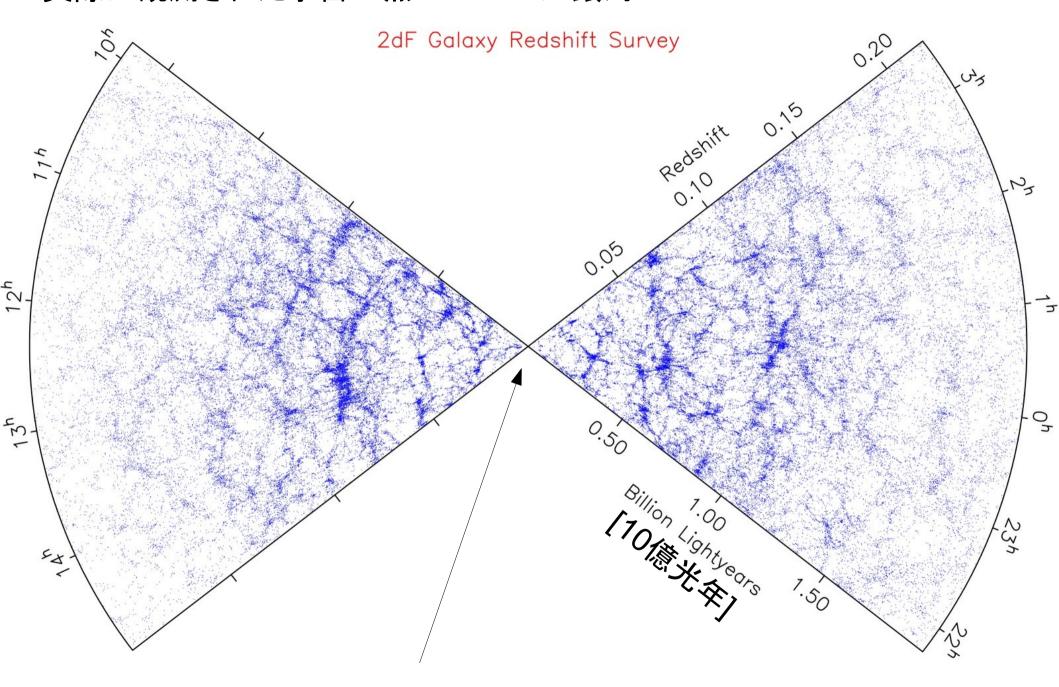
-現在の宇宙-銀河団の形成 我々の銀河の形成

宇宙の大構造と銀河の形成

- 一辺が約3億光年の領域
 - ▶ 青…ダークマター
 - ▶ 白…銀河

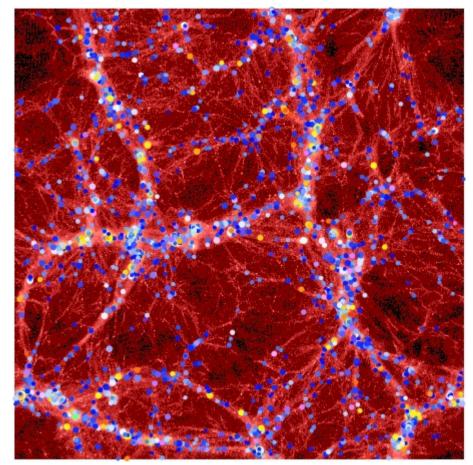


実際に観測された宇宙…点一つ一つが銀河



ここに我々がいる

理論モデルを作り、観測結果と比較する



理論モデルにより得られた分布

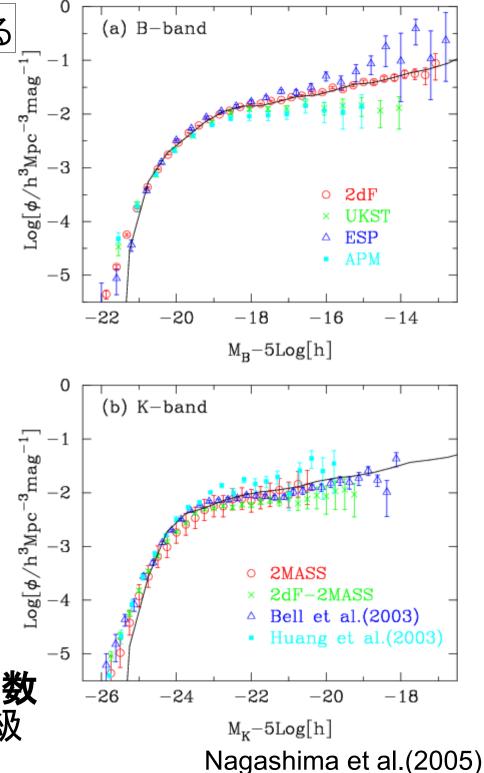
赤の濃淡:ダークマター密度

色つき丸:銀河

光度関数

横軸:銀河の等級

縦軸:個数密度



過去にさかのぼって チェックする

すばるディープフィールド での銀河の光度関数 (ヒストグラム)

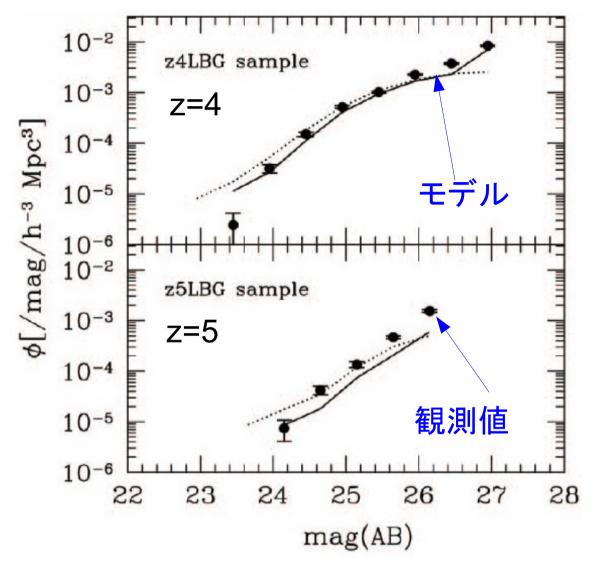
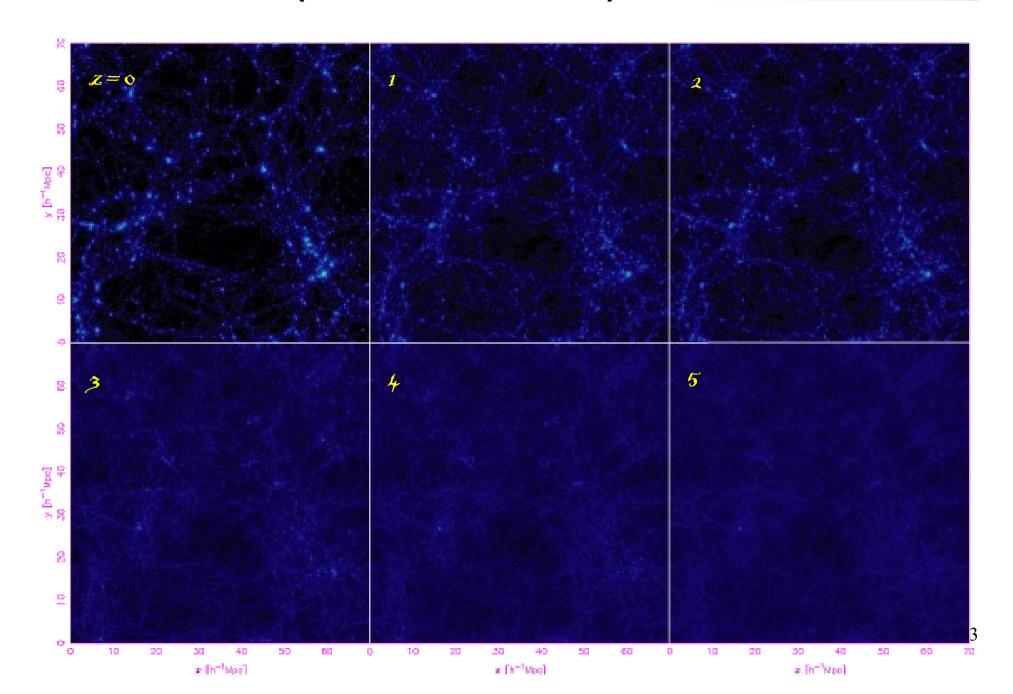


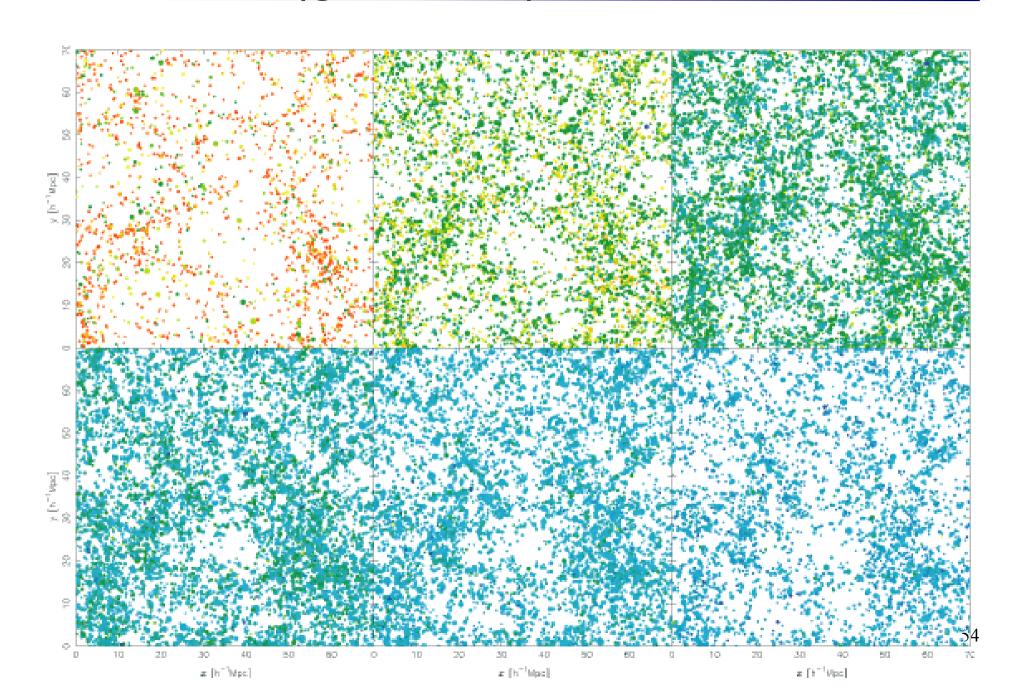
Fig. 3.—Comparison of the luminosity functions for LBGs at $z \sim 4$ (top) and $z \sim 5$ (bottom) between SDF observations by Yoshida et al. (2005; circles with error bars) and the predictions of the ν GC (lines). The solid lines denote the luminosity functions of COL-selected ν GC LBG samples, while the dotted lines are those of SF-selected ν GC LBG samples. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

この理論モデルは、 4D2Uの「宇宙の大規模構造」 で使われているものです。

Kashikawa et al.(2006)

空間分布(dark matter) 宇宙の大きさ: 1/(1+z)





まとめ

- タイムスケールの違いに注目しよう
 - ▶ 宇宙年齢 ~100億年
 - ハローでの冷却・降着 ~10億年 (サイズにもよるが)
 - 銀河の回転 ~1億年
 - 超新星爆発(大質量星の寿命)~100-4000万年
 - ▶ ガス・分子雲 ……?
- 星の集団としての銀河
 - 大質量星は青く短寿命→超新星フィードバック
 - 小質量星は赤く長寿命→長く生き残る⇒星の集団は、ガスが供給され星ができなければ、だんだん赤くなる
- 合体
 - ダークマターハローは合体をくりかえす
 - ▶ その内部の銀河も、合体をくりかえす
- 冷却・星形成・超新星爆発・加熱(フィードバック)というサイクルを繰り返し、合体成長していく
- 次の課題:銀河内部で何が起きているのか…?

ダークマター存在の証拠のひとつ

ダークマター存在の証拠(の一つ)

銀河の回転曲線(中心からの距離によって、回転速度がどう変化するか)

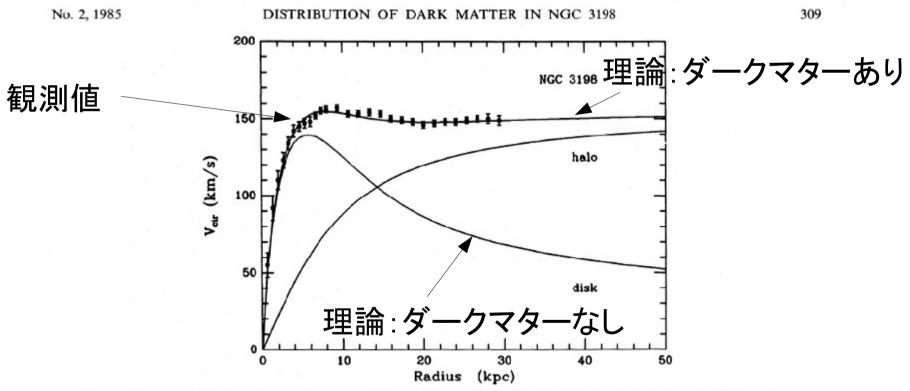


Fig. 4.—Fit of exponential disk with maximum mass and halo to observed rotation curve (dots with error bars). The scale length of the disk has been taken equal to that of the light distribution (60°, corresponding to 2.68 kpc). The halo curve is based on eq. (1), a = 8.5 kpc, $\gamma = 2.1$, $\rho(R_0) = 0.0040 M_{\odot}$ pc⁻³.

ダークマターと銀河系の回転

- 我々の銀河系は、約2億年で一周する
- 重力と遠心力の釣り合い

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$
$$M \simeq \rho \, r^3$$

• 質量=密度x体積より、

・ これより、
$$ho \simeq \frac{v^2}{Gv^2} \propto \frac{v^2}{v^2}$$

- 実際の観測では、回転速度vは半径によらずほぼ一定 (「平坦な回転曲線」)
- ところが、光っている星の分布は、半径が増えるにつれ、 指数関数的に減少
- つまり、「見えない物質」=ダークマターの存在を示唆
 - もしダークマターがなければ、回転速度は外に行くほど遅くなる はず

銀河内部の話

銀河内部では何が起きているのか?

- よくわからないこと
 - ト 星形成(ガス→星)
 - 超新星フィードバック
- 星がどうやってできるか、 がよくわかっていない
 - 小質量の単体の星が、「分子雲コア」からどうできるかが、ある程度わかってきた、という段階
- 現実には星はできている ので、少し考察してみよう

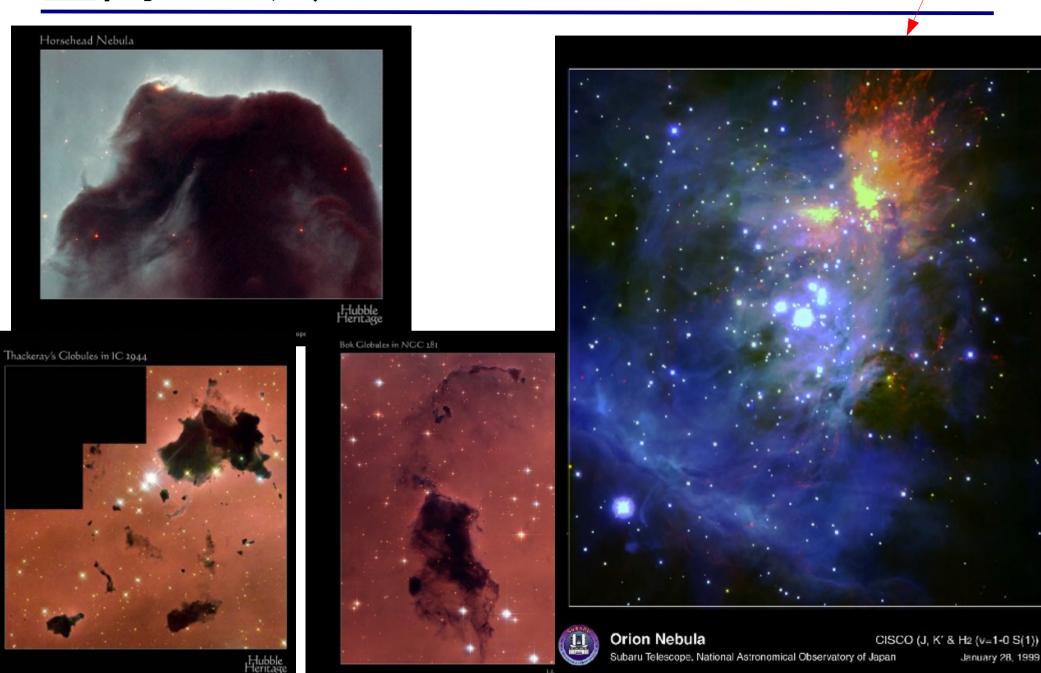




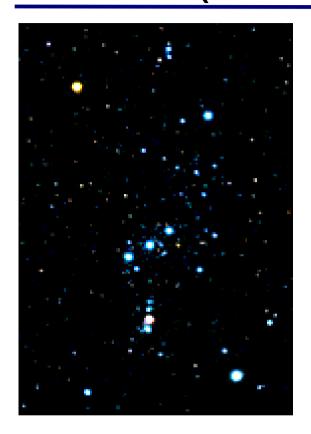
ガスの行く末

- 銀河内のガスは、一様に分布しているわけではない
 - 濃淡がある
- 濃いところ(ガス雲)では、自らの重力で収縮をはじめる(自 己重力)→恒星は、自己重力と圧力勾配が釣り合った状態
- 濃いと原子同士が衝突しやすいので、分子ができる
 - 「分子雲」→暗黒星雲
- 分子雲内の特に濃いところ(分子雲コア)で星ができる
- しかし、この一連の流れはまだよくわかっていない

NASA and The Hubble Heritage Team (STScVAURA) + Hubble Space Telescope WFPC2 + STScI-PRC02-01

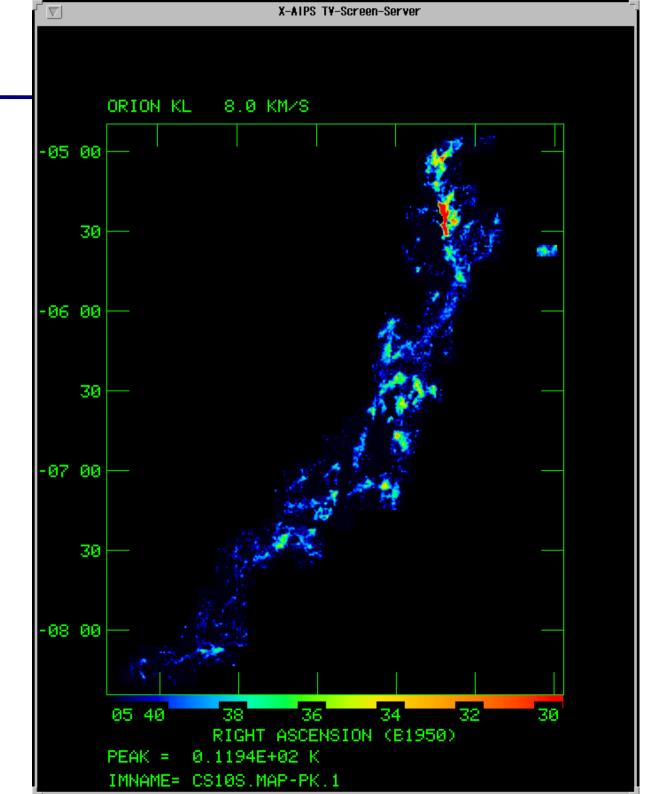


NASA, ESA, and The Hubble Herbage Team (RTScIALRIA) Hubble Space Telescope ACS • STScI.PRC86-13



(野辺山のwebより)

野辺山45m (立松さんのwebより)



様々な星間ガス雲

HII領域 大質量星からのUV輻射により イオン化された領域

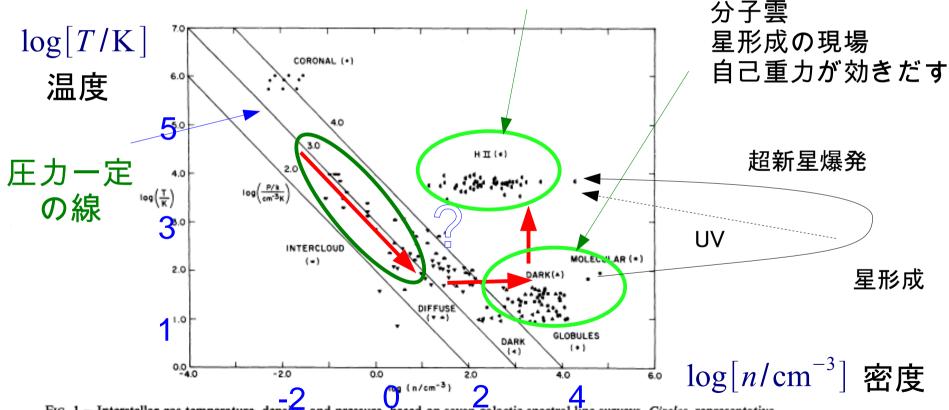


Fig. 1.—Interstellar gas temperature, density, and pressure, based on seven galactic spectral line surveys. Circles, representative points for coronal gas observed in 1032 Å O vI line, based on filling factor $f_c = 0.1$, 0.2, and 0.4, and on n(T) power-law exponent $\eta = 0.0$, 0.5, and 1.0; semicircles pointing down, intercloud gas observed in 21 cm H I line; semicircles pointing up and triangles pointing down, diffuse clouds observed in 21 cm H I line; triangles pointing left, dark clouds observed in 2.6 mm CO lines; diamonds, Bok globules observed in 2.6 mm CO lines; squares, molecular clouds associated with nebulosity, observed in 2.6 mm CO lines; semicircles pointing left, H II regions observed in 6 cm H109 α line and 6 cm continuum.

Myers (1978)

分子雲の性質?

- 分子雲ができれば、星はなんとかできそう
- 分子雲は銀河のあちこちにある
- どうやってできる?圧縮してやればよい?
 - 水素ガスと分子ガスの濃いところは大体一致している
- どこで?→渦巻きの「腕」?超新星爆発でかき集める?
- ・ 銀河系一周はだいたい2億年

$$\tau_{ff} \simeq 10^8 \left| \frac{n}{1 \, \text{cm}^{-3}} \right|^{1/2}$$

- ところが、分子雲は「ほっておけば」100万年程度で重力で つぶれてしまう
 - ガスの1%程度だけが星になる?→分子雲を超新星爆発で壊さず、1億年維持?
 - 磁場などで1億年支える?
- 混沌としている。これからの課題。

初期宇宙論

宇宙誕生

 \log (**密度**) [kg/m³]⁹⁰

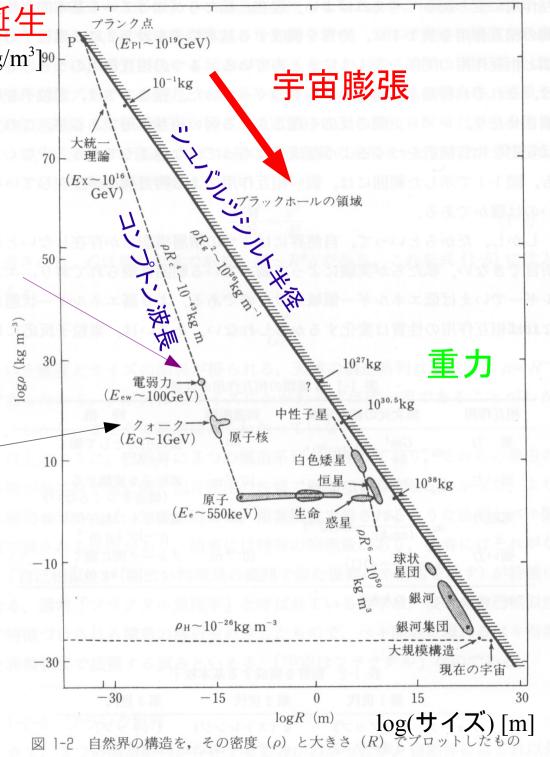
宇宙における「物質」

ワインバーグ・サラム理論 (1979年ノーベル賞) 南部による 「対称性の自発的破れ」 の理論に基づく

クォークは6種類 小林・益川理論 (2008年ノーベル賞)

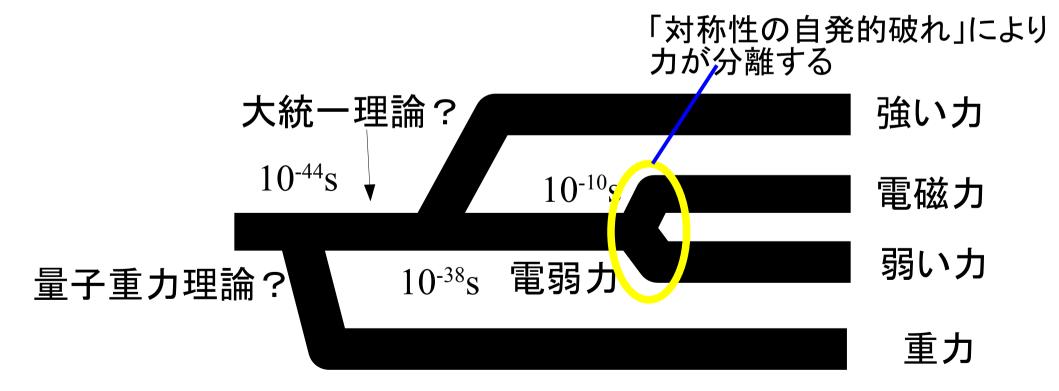
密度-サイズ図上で 局在している

「観測的宇宙論」池内了



自然界の4つの力:誕生直後~10-10秒後

- 原子もまだ出来ていない
- 時間とともに(エネルギーが下がるとともに)力が次々と 分岐し、現在のようになった
- 電弱力:グラショウ、ワインバーグ、サラムがノーベル賞



核図表(理研のウェブページより)

現在までに発見・合成されている原子核 宇宙誕生後約3分で、 水素・ヘリウム・リチウム が合成される (Pb) ウランの核分裂と破砕 ビッグバンで作られるのは、水素・ヘリウム・リチウムのみ (Ni) 2 82 (Ca) 2 重い元素は星の内部・ 超新星爆発で合成される 中性子数 -留新星爆発でつくられた不安定核(ウランまでの元素が合成)の道筋 (同位元素の種類)

