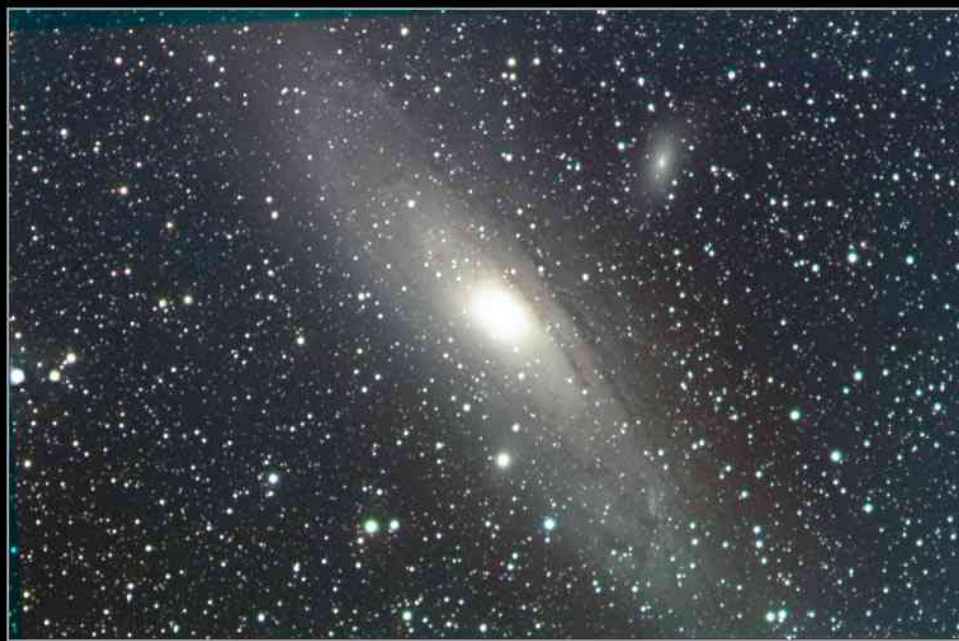


銀河とはどのようなものか

M31, M32, M110 (アンドロメダ大銀河と伴銀河)



1997年 9月10日, 21時26分 (JST)

焦点距離300mm望遠レンズ (タムロン300mm F2.8 LD/絞り開放), 冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露出時間: 赤2分×4, 緑4分×4, 青2分×4, フィルタ: R-60, G-533, B-460, 3色分解撮像カラー合成画像
画像範囲: 2.58 × 1.70°, 観測場所: 兼毅コロナ観測所

H. Fukushima 国立天文台 広報普及室

アンドロメダ銀河

天の川 と 夏の大三角

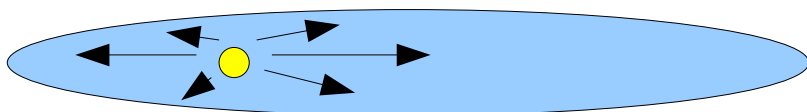
1997年 9月10日, 21時18分 (JST)



35mm判一眼レフ用魚眼レンズ (Nikon f=8mm, F2.8/絞り開放), 冷却CCDカメラ (MUTOH CV-16)
露出時間: 赤2分×3, 緑4分×4, 青2分×4, フィルタ: R-60, G-533, B-460, 3色分解撮像カラー合成画像
画像範囲: 対角64°, 観測場所: 兼毅コロナ観測所

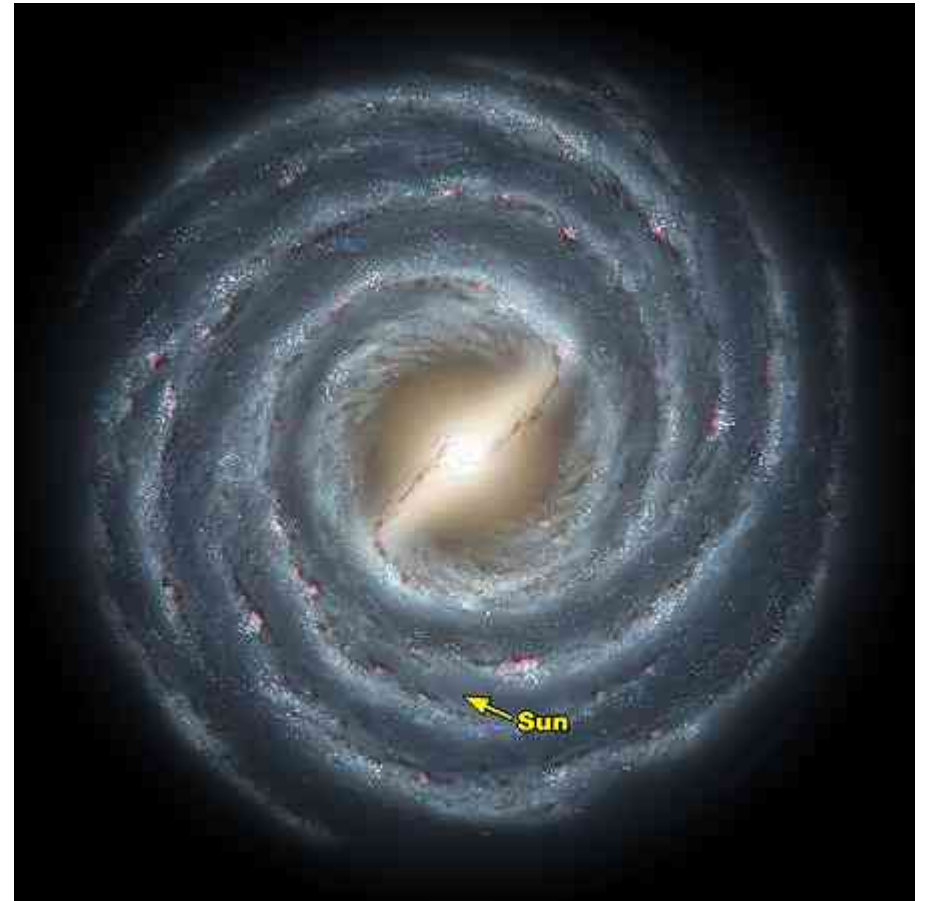
H. Fukushima, M. Ishiguro and J. James 国立天文台 広報普及室

我々の銀河系 (内側から見ている)



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」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 $M \sim 10^{7-12} M_{\text{sun}}$
 - 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
 - およそ $10^{12} M_{\text{sun}} / (10\text{kpc})^3 \sim M_{\text{sun}} / \text{pc}^3$
 - 1pc(約3光年)立方に星一つ

渦巻銀河、棒渦巻銀河



M 63 (NGC 5055)

Suprime-Cam (B, V, H α)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

June 22, 2000

Copyright © 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

にある棒渦巻銀河) 1996年 4月22日, 25時43分 (JST)



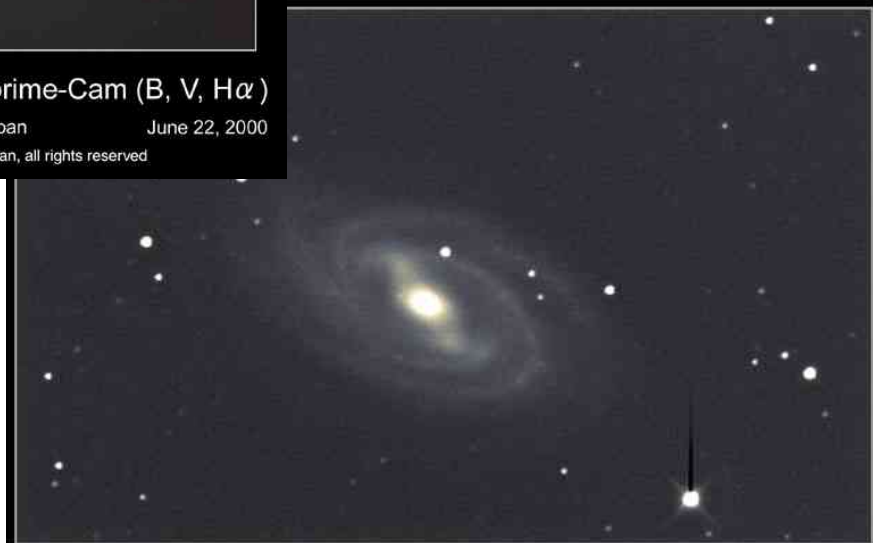
NGC 2403

Suprime-Cam (B, R, IA651)

October 13, 2005

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright © 2005 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.



口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200/スズ)
露出時間: 6分×4, フィルタ: Iバンド, 疑似カラー処理

H. Fukushima and N. Yamamoto 国立天文台 広報普及室

横から見た渦巻銀河

NGC4565 (かみのけ座にあるエッジオン銀河)



1998年 5月21日, 23時20分 (JST)

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12), 液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200シリーズ)
露出時間: 6分×10, フィルタ: Iバンド, 疑似カラー処理, 画像範囲: 14.01×9.53'
観測場所: 国立天文台 (三鷹)

H. Fukushima

国立天文台 天文情報公開センター 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

M49（おとめ座にある楕円銀河）

1998年 1月26日, 27時18分 (JST)



M87（おとめ座銀河団の中にある巨大楕円銀河）

この銀河は、ブラックホールに伴う現象とされているが、中心部から噴き出している明瞭なジェットがあり、強い電波を放射している。

ジェットを表現するため、中心部だけを拡大し、異なる処理を施した画像を右下に示す。

30cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12→F7.31, レデューサ使用)

CCDカメラ (MUTOH CV-16)

観測時間: 10分×5, フィルタ: R-60, 疑似カラー処理, 画像範囲: 12.63×8.51'

観測所: 国立天文台 (三鷹)

H. Fukushima and Y. Ichibashi 国立天文台 広報普及室

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12)
液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200 シーメス)
露出時間: 5分×8, フィルタ: Iバンド
疑似カラー処理

Mar. 4. 1996, 21h02m~21h51m (JST)

H. 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



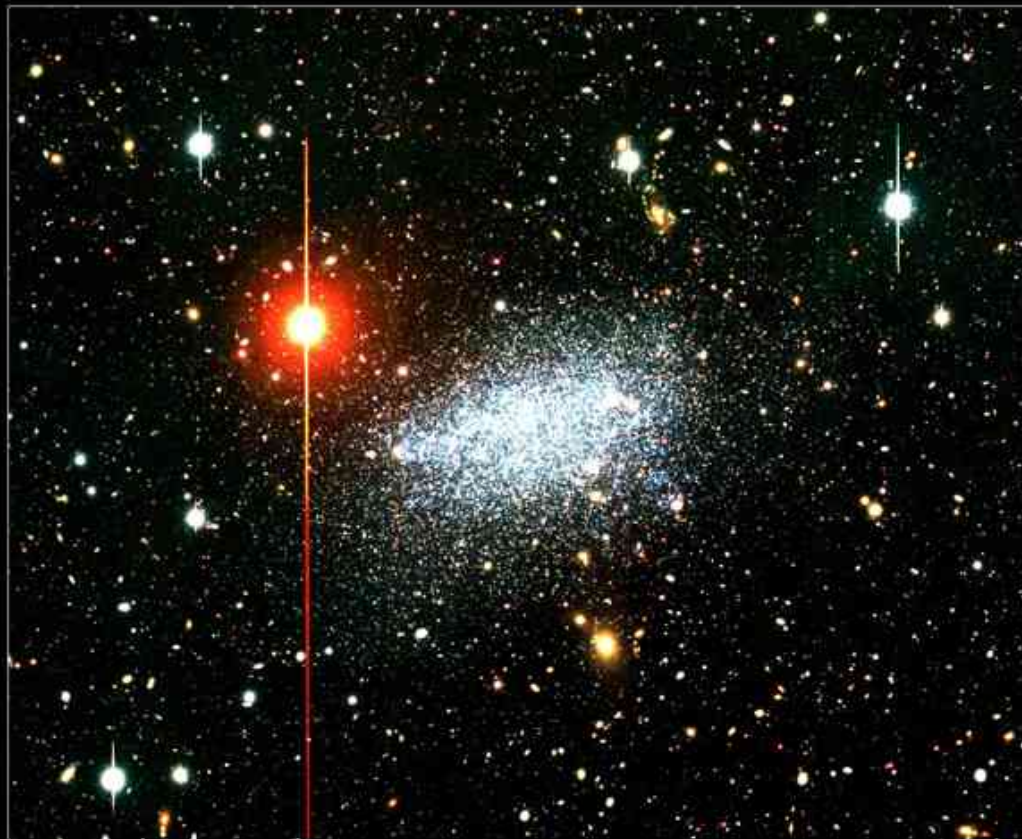
Sextans A (UA 205)

Suprime-Cam (V, R, I)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

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

February 23, 2004



Dwarf Irregular Galaxy Leo A

Suprime-Cam (B, R, z')

August 5, 2004

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

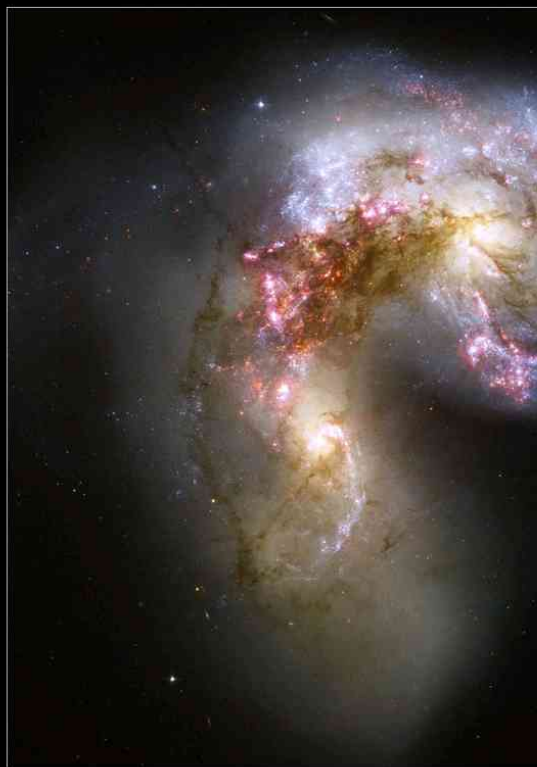
合体する銀河

- 新しい星が爆発的に生成

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



NGC 4038-4039 • Antennae Galaxies



Polar-Ring
Galaxy
NGC 4650A



PRC99-16
Space Telescope
Science Institute
Hubble Heritage Team
(AURA/STScI/NASA)

Hubble
Heritage

Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration • HST/ACS • STScI-PRC06-46

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



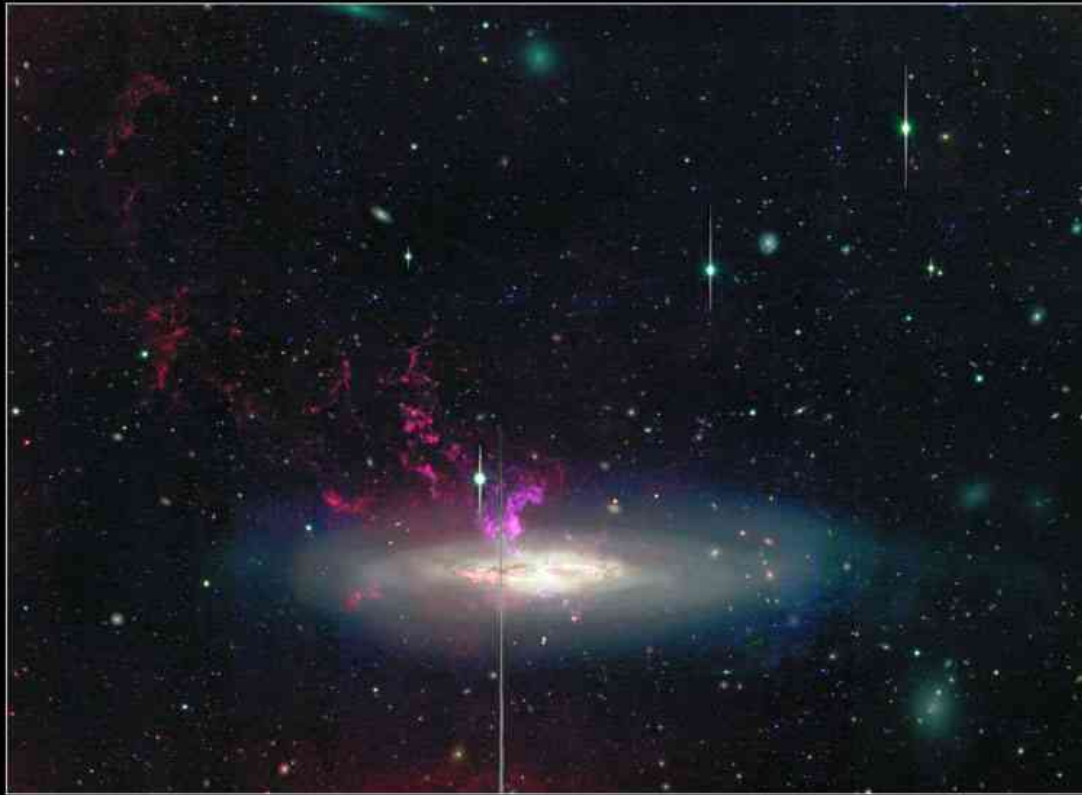
182 (NGC 3034)

FOCAS (B, V, H α)

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)

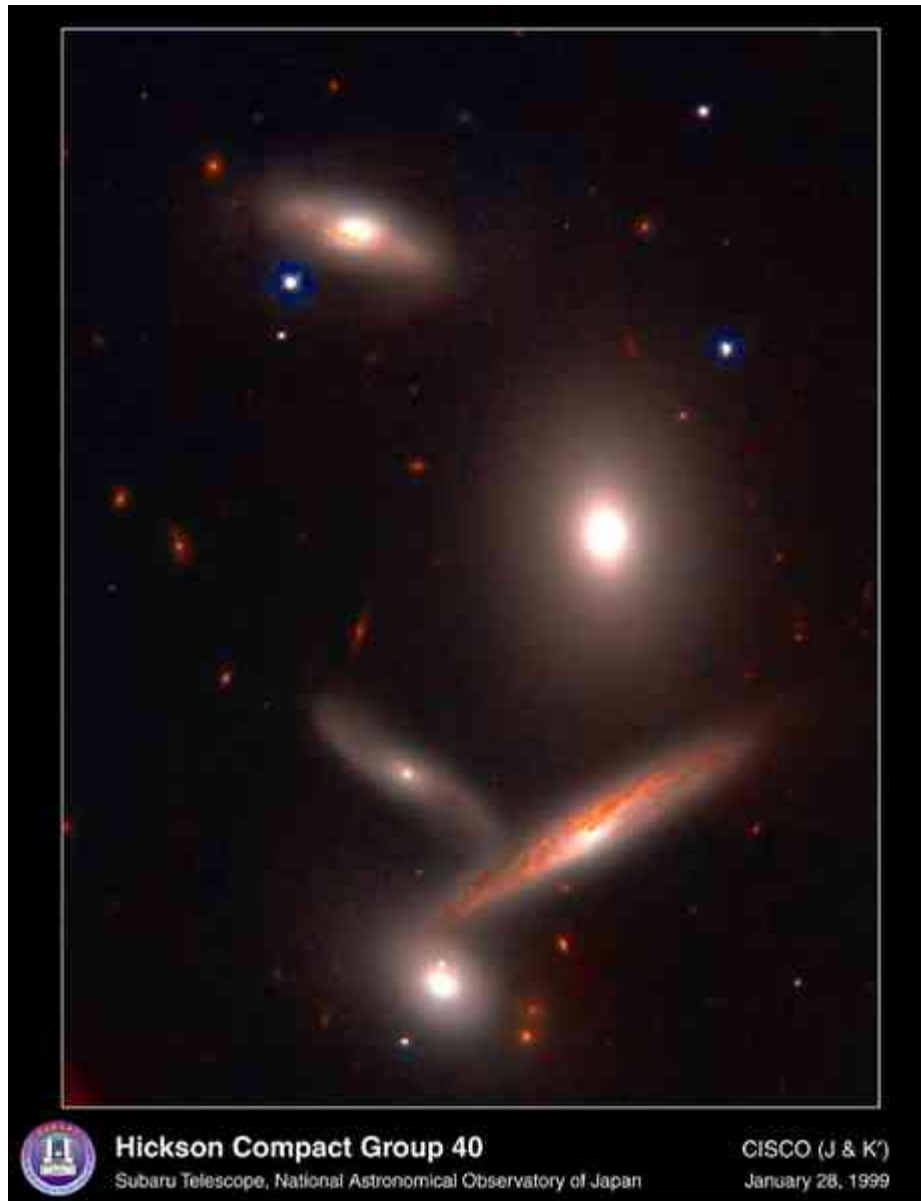
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

April 15, 2002

Copyright © 2002 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



銀河群、銀河団

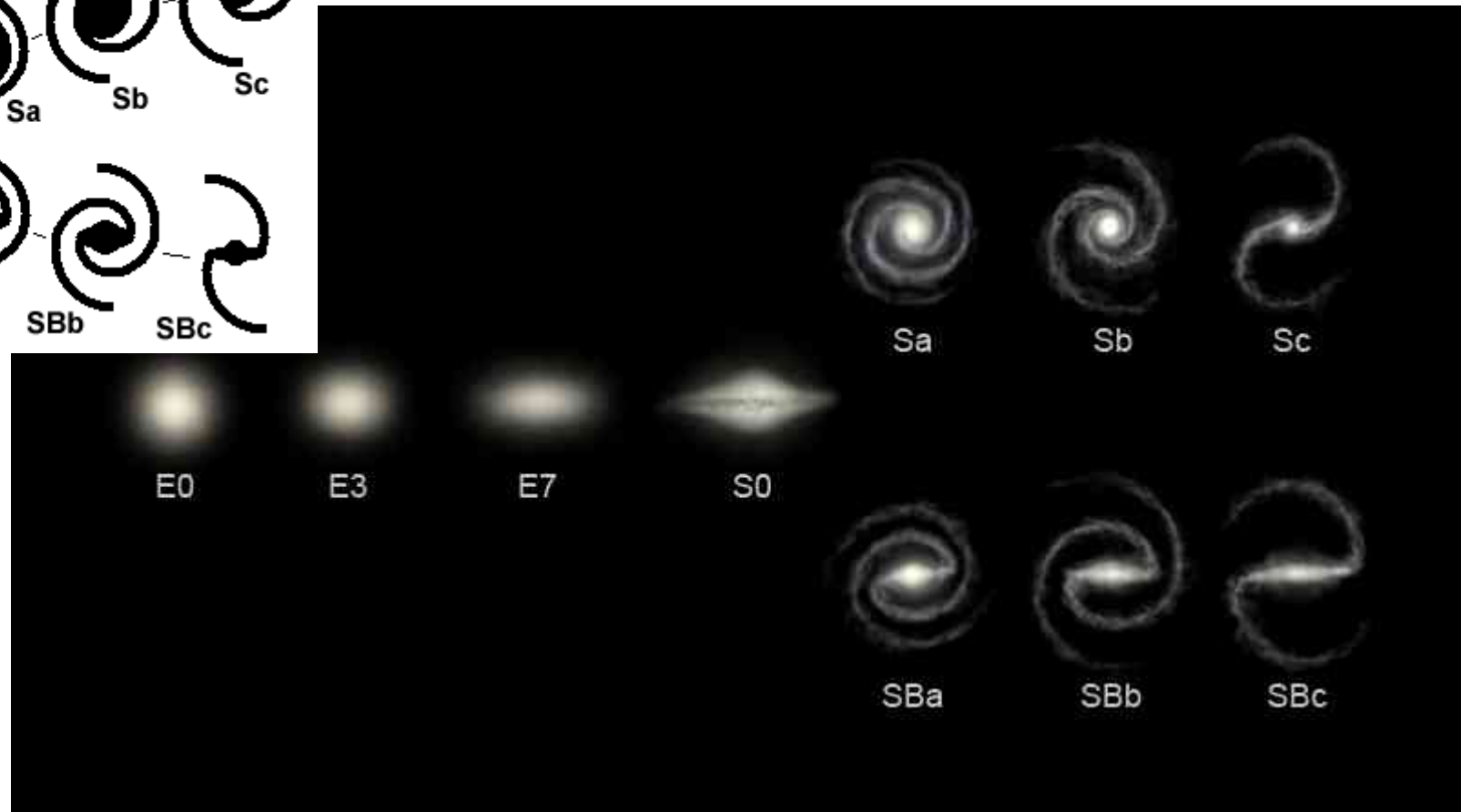
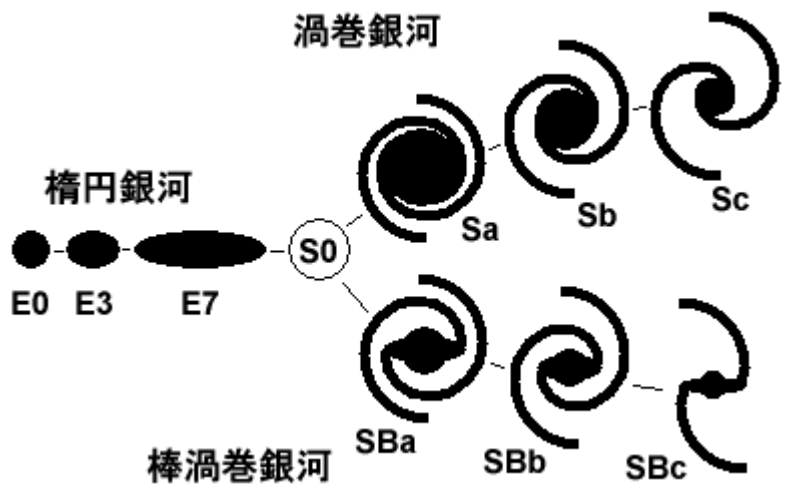


多様な形態(morphology)

- 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



銀河の形態と密度：形態の起源？

- 渦巻銀河は銀河があまり密集していないところに多い
- 楕円銀河は銀河が密集しているところに多い
- 銀河が合体すると、簡単に楕円銀河のようになることが数値シミュレーションにより知られている
- 銀河が密集→銀河同士の衝突が多い→楕円銀河が多い？
- まだよくわかっていない
- 銀河の形成過程はまさに現在進行中のホットなトピック

我々の銀河系

- 天の川銀河、The Galaxy, The Milky Way
- 質量 $M \sim 10^{12} M_{\text{sun}}$ 程度の立派な銀河
- 渦巻銀河(棒渦巻かもしれない)
- $R \sim 10 \text{kpc}$, 厚みは 1kpc 程度
- 銀河中心から太陽までの距離約 8.5kpc
 - 太陽は銀河系のはずれにいる
- バルジ(bulge)のサイズ $\sim 3 \text{kpc}$



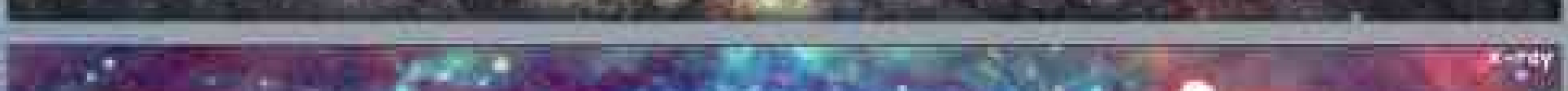
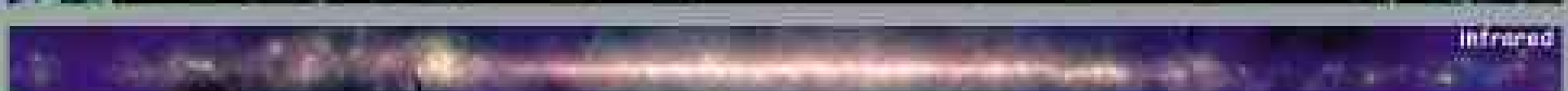


Image credit: NASA/JPL-Caltech/SPOC/IRAC/Spitzer

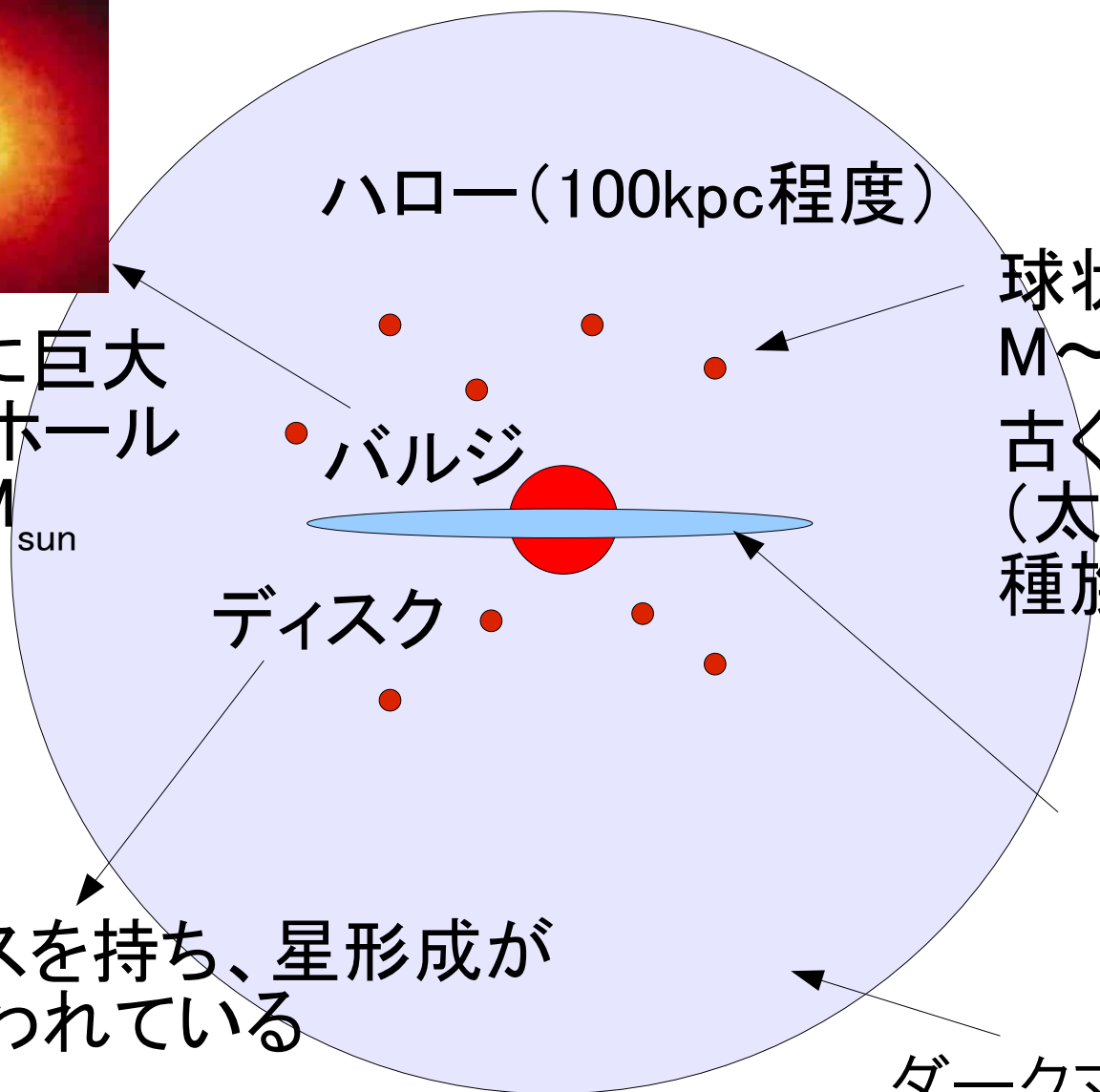


Multiwavelength Milky Way

銀河系の模式図



中心部に巨大
ブラックホール
 $M \sim 10^6 M_{\text{sun}}$



球状星団

$M \sim 10^4 - 10^6 M_{\text{sun}}$

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

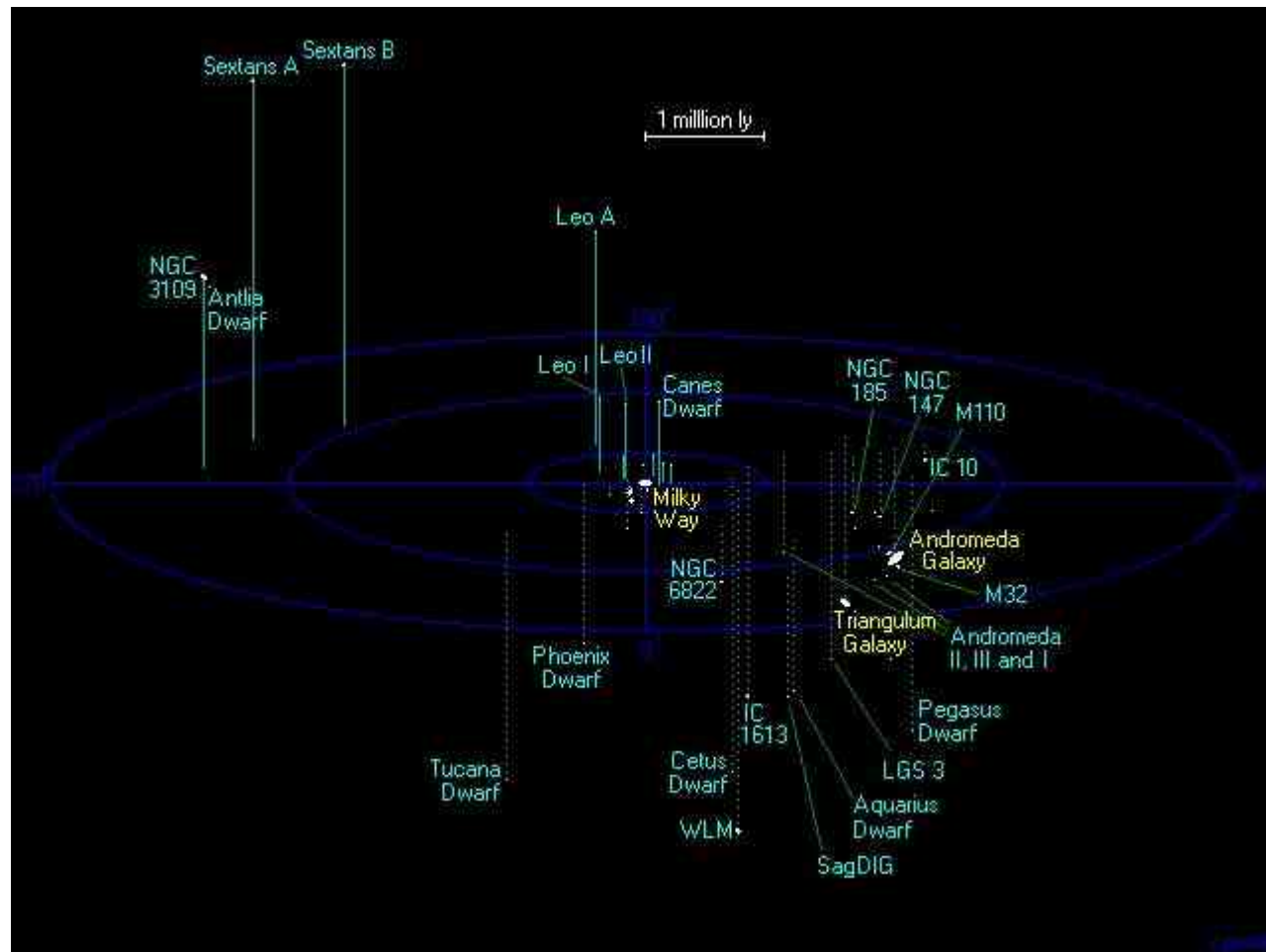
ダークマターが主



ガスを持ち、星形成が
行われている

局所銀河群 (Local Group)

- 銀河系、アンドロメダ銀河を二大銀河とする小規模な銀河集団の中にある
- 現在でも、銀河系のすぐ近くに矮小銀河が発見されている

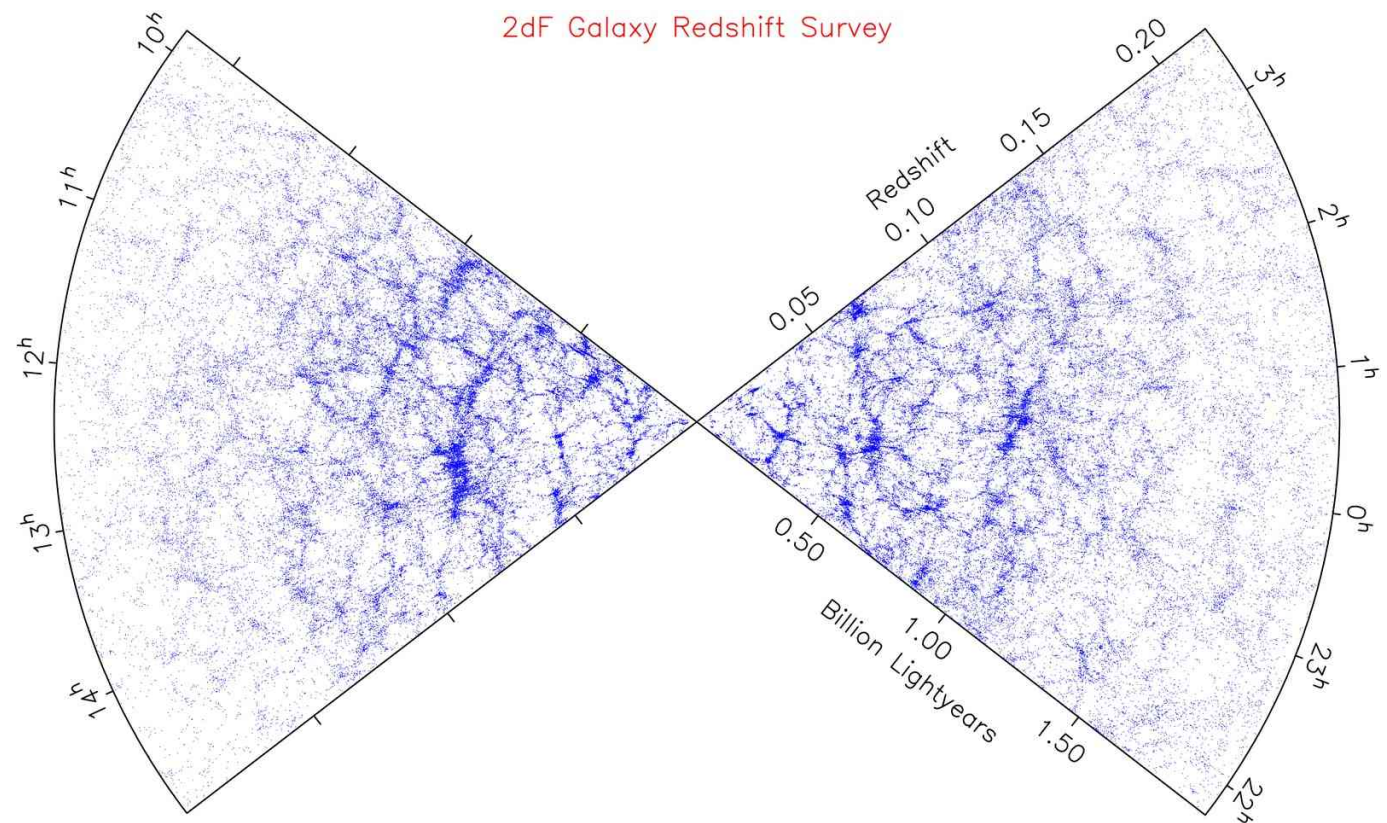


銀河における星形成率：銀河の歴史

- 銀河の中ではどれくらいの率で星が生まれているのか？
- 単位時間あたりに生まれる星の質量：星形成率、通常
の単位 [M_{sun}/yr]
- 我々の銀河系で、 $6-10M_{\text{sun}}/\text{yr}$ 程度
- 楕円銀河にはガスがないのでほぼゼロ。
- 銀河同士が合体すると、爆発的に星を生成するよう
に見える（爆発的星形成銀河、スターバースト銀河）
- 過去にさかのぼると、全体的に星形成が活発であつた
兆候がある→銀河形成史解明の手がかり

銀河の大域的な分布

- ハッブルの法則を用いて銀河の距離を測定し、宇宙の「地図」を作成した
- 銀河は網目状の構造をしている
- 宇宙の大構造



銀河系の未来

- いずれ、マゼラン雲は銀河系に合体する
 - すでに何周も銀河系のまわりをまわっている
 - マゼラン雲から引き出されたガスが銀河系とマゼラン雲をつないでいる
 - マゼラニック・ストリーム
- 他の矮小銀河も同様だろう
- アンドロメダ銀河ともやがて合体
- 局所銀河群自体も、おとめ座銀河団(巨大な銀河集団)に落ち込みつつある

銀河はどうやってできてきたか

- 宇宙をあやつるダークマター
- 宇宙そのものはどう進化してきたか：宇宙の膨張
- 大域的な構造はどうなっているか

これらに加え、

- ガスの進化、星の形成、超新星爆発が銀河全体に与える影響、銀河同士の合体、…

など色々考えないと銀河の形成はわからない

まだまだ謎が多い(大雑把なシナリオは分かってきたけれども…)

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

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$

- 質量 = 密度 × 体積より、

$$M \simeq \rho r^3$$

- これより、

$$\rho \simeq \frac{v^2}{Gr^2} \propto \frac{v^2}{r^2}$$

- 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

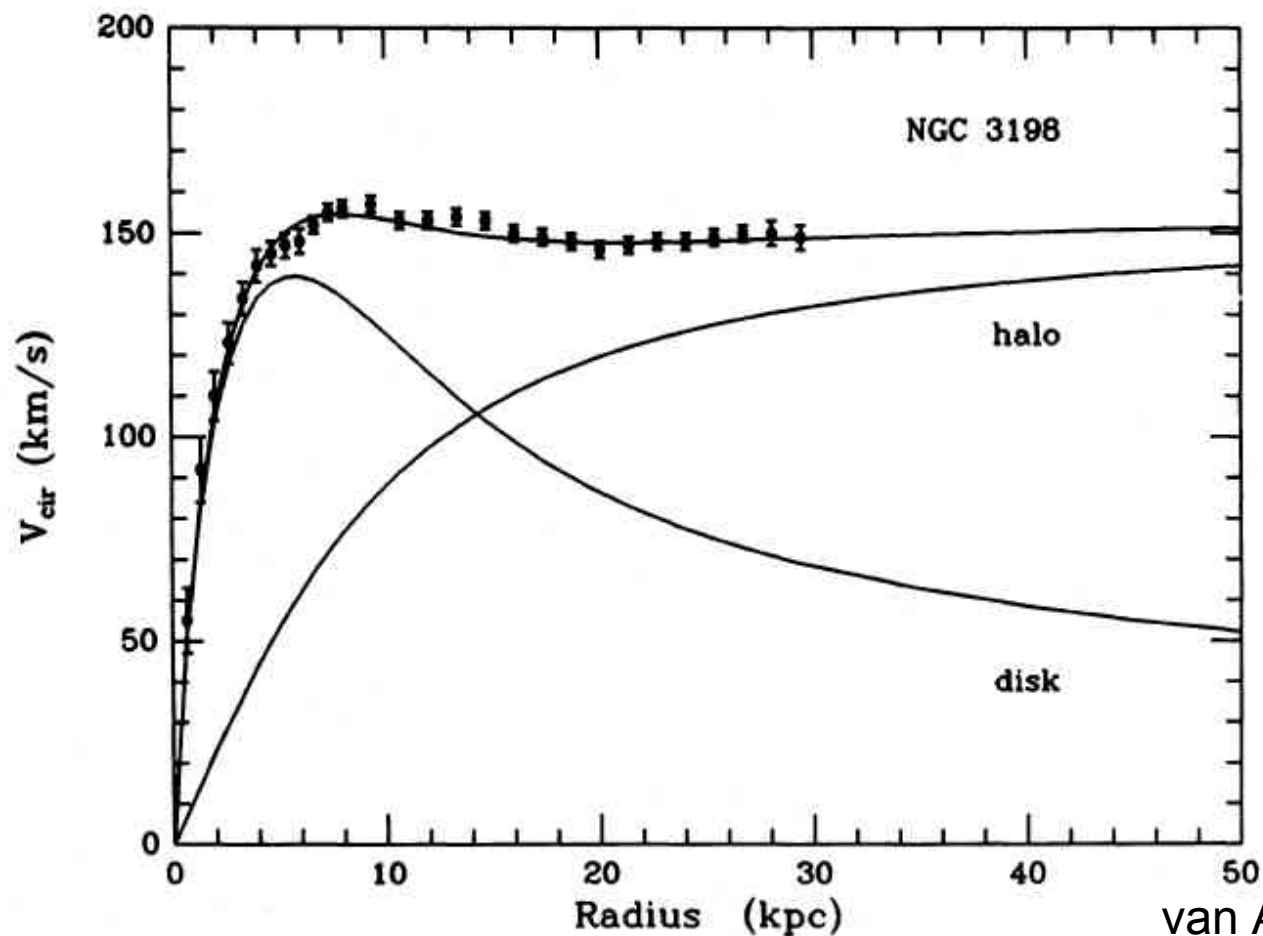
回転曲線とダークマター

- 単純な原理(重力=遠心力)からダークマターの存在を導くことができる

No. 2, 1985

DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198

309



van Albada et al. (1985)

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, $\gamma = 2.1$, $\rho(R_0) = 0.0040 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

宇宙の膨張

- 宇宙はビッグバン以来、137億年の間、膨張を続けている
- 宇宙の総質量 M ,半径 r ,膨張速度を v とする
- 重力により、膨張速度は遅くなる
 - 投げ上げたボールは、位置エネルギーを獲得し、速度を落とす
- 宇宙の質量により、膨張し続けるか、収縮に転ずるか(=落ちてくる)が決まる
 - 宇宙の進化を表す式(ただし最も簡単な場合)

$$\frac{GM}{r} = \frac{1}{2} v^2$$

- 実際には「真空のエネルギー(ダークエネルギー)」なども絡む

宇宙の大構造のシミュレーション

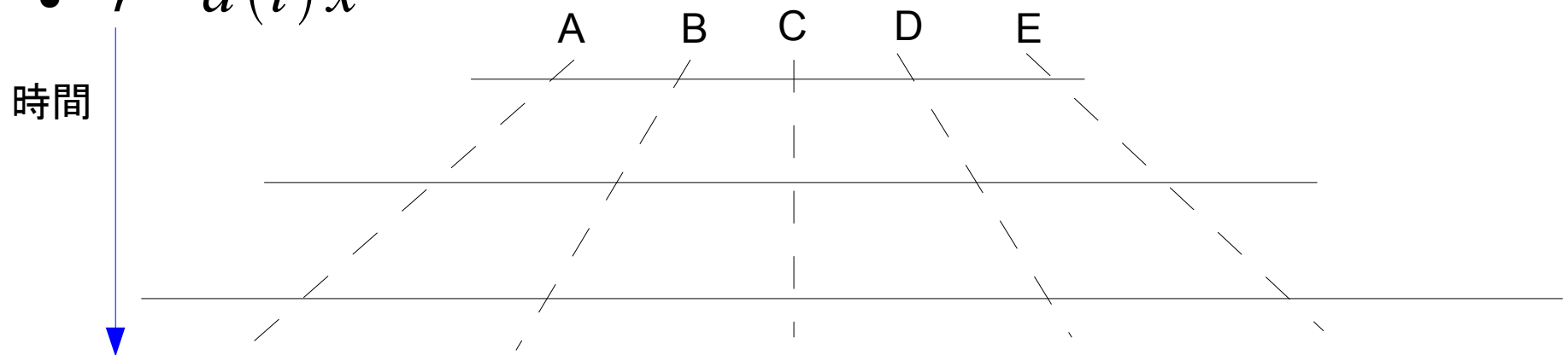
1辺が100Mpc
の箱を宇宙から
切り出し、計算する



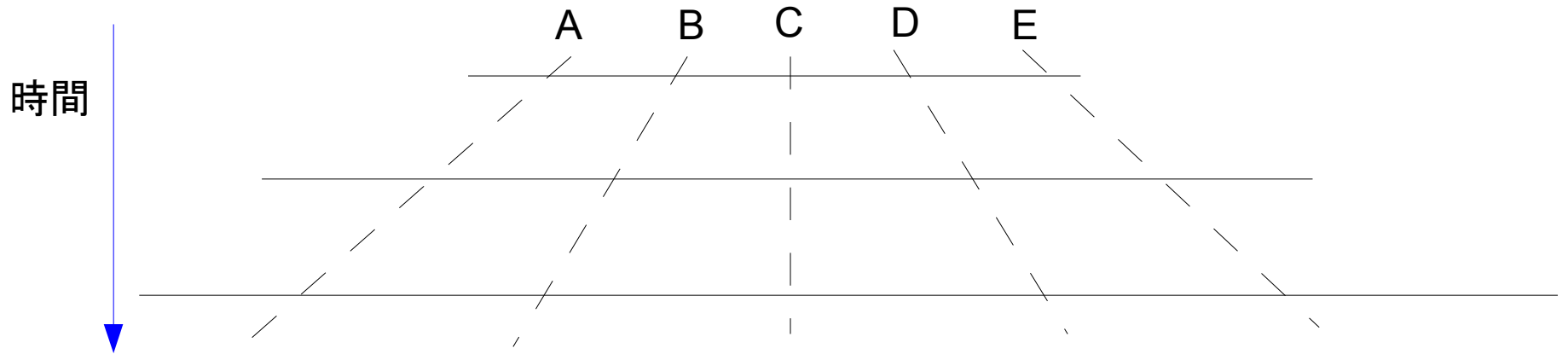
青いもやもや :ダークマター、白い点々 :銀河
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト
<http://4d2u.nao.ac.jp/>
シミュレーション :矢作日出樹氏、長島雅裕
<http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/index.php?id=lss>

宇宙の膨張

- 本当の距離（位置） r と、宇宙膨張の影響を取り除いた距離（位置） x を考える
 - r : 物理的な座標
 - x : 共動座標（ものさしの目盛り）
- 静止した人々A~Eの物理的な間隔が、時間と共に $a(t)$ 倍になるとする
 - a : scale factor（ものさしの長さ）
- $r = a(t)x$



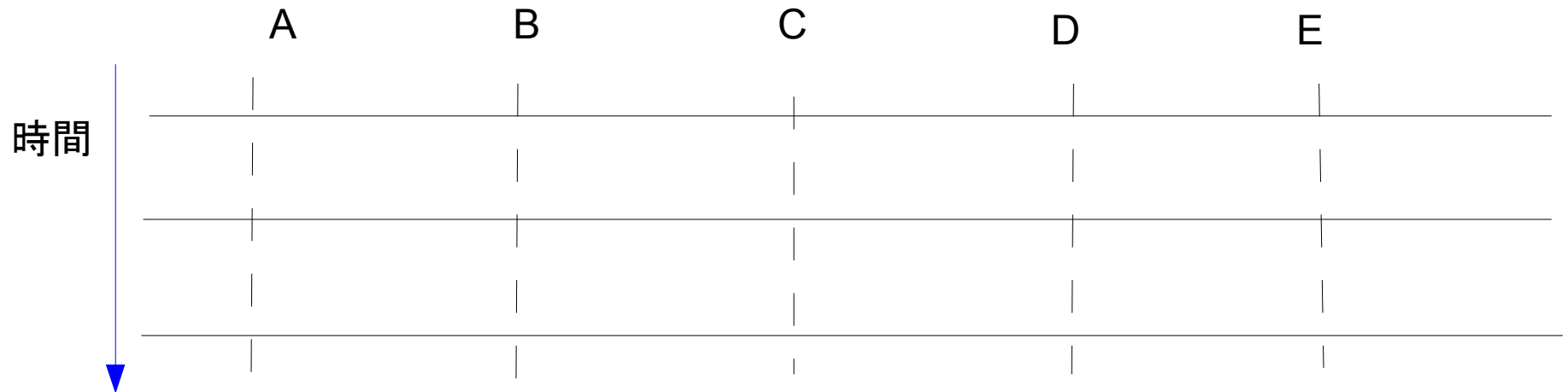
宇宙膨張の見方



$a(t)$ を除き、 x で見ると
わかりやすい

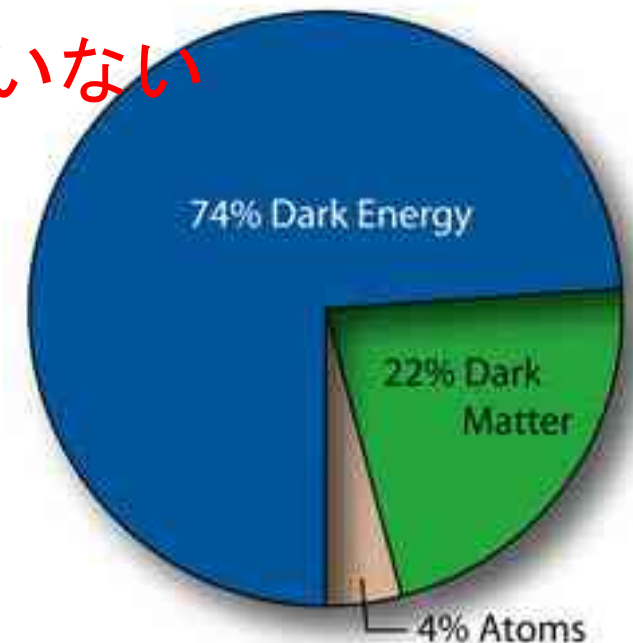


x : 共動座標



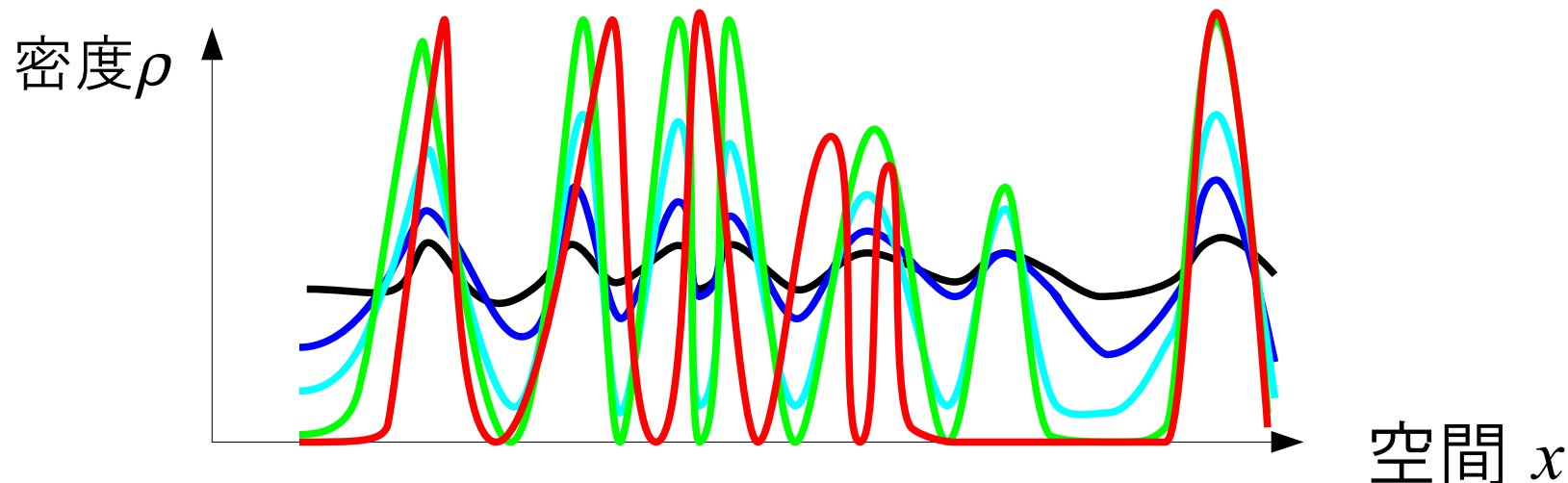
宇宙の構成要素

- 最新の観測結果によると、
 - エネルギー密度で表す。E=mc²より質量密度はエネルギー密度に等価
- **ダークエネルギー（宇宙定数） 74%**
 - 真空のエネルギー？ **よく（全然）わかっていない**
- **ダークマター 22%**
 - 未知の素粒子？ **よくわかっていない**
 - 振る舞いは通常の物質と同じ
- **バリオン 4%**
 - 陽子や中性子などの**既知の物質**
- 光子など（ほんの少し）



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、少しずつ成長していく → **重力成長**



銀河のシミュレーション

- さきほどのシミュレーションの白い点を拡大すると、このようになっているはず



もやもや : ガス、白い点々 : 星
国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト
<http://4d2u.nao.ac.jp/>
シミュレーション : 齊藤貴之氏

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

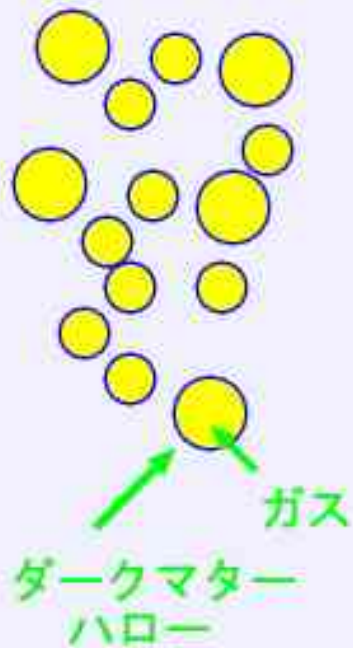
銀河はどこでどのようにできるか

- 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）

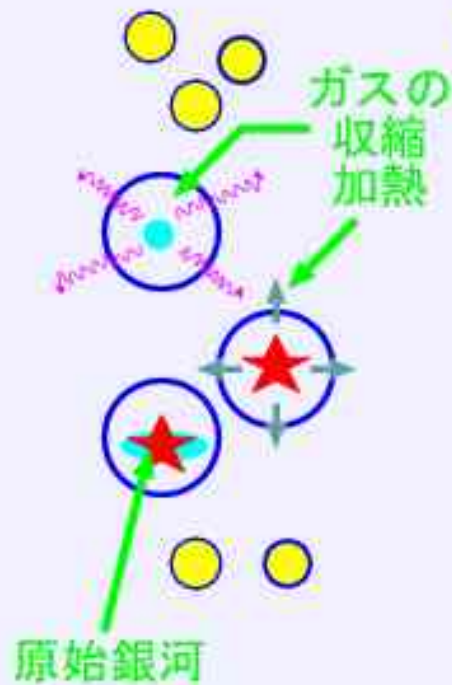
階層的構造形成説に基づく銀河形成シナリオ

宇宙初期

現在



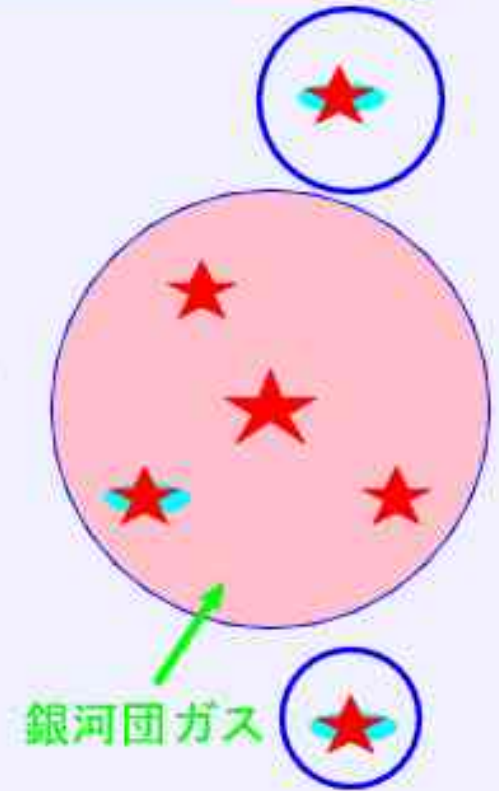
自己重力による
初期天体の形成



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

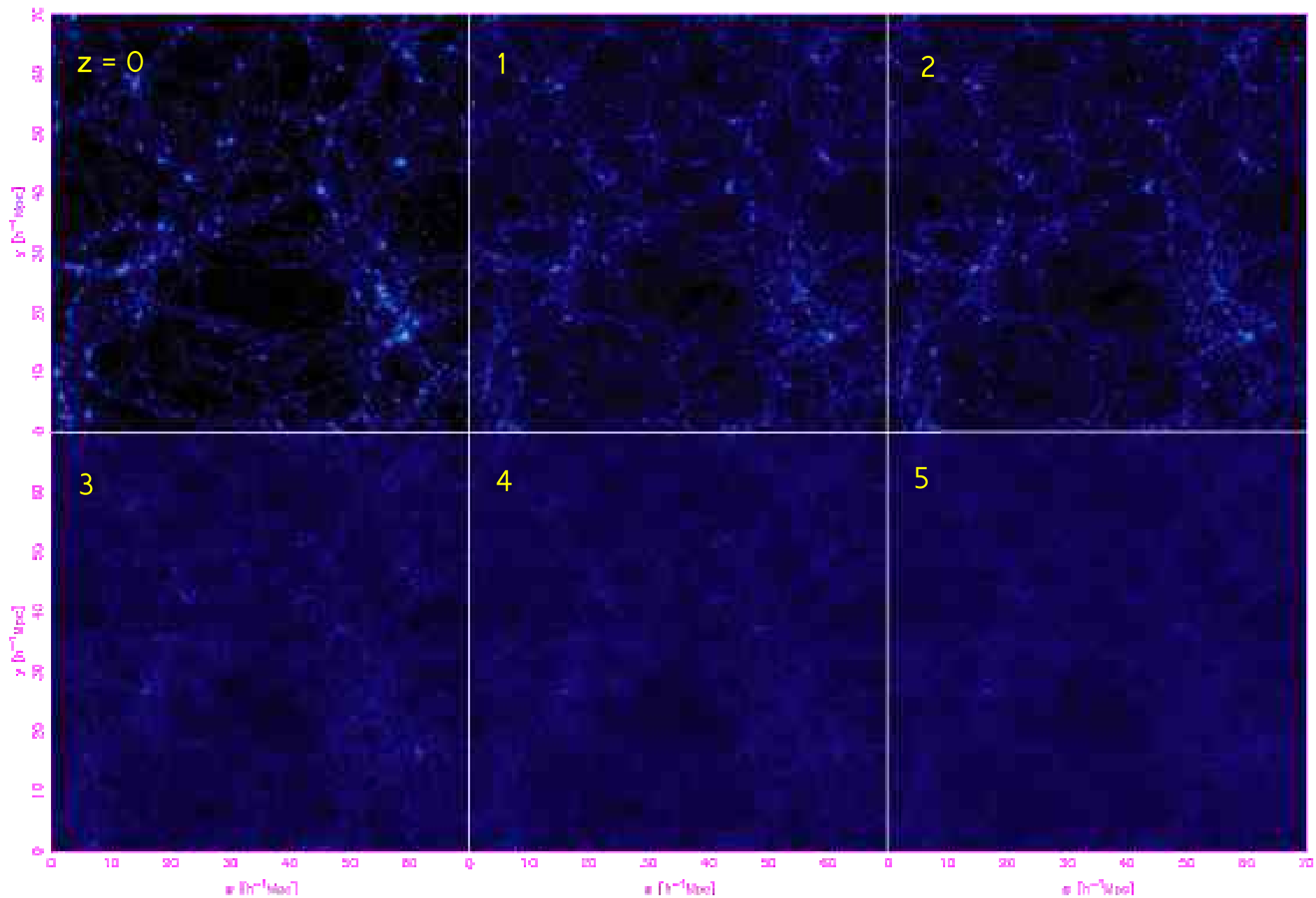


銀河団ガス

-現在の宇宙-
銀河団の形成
我々の銀河の形成

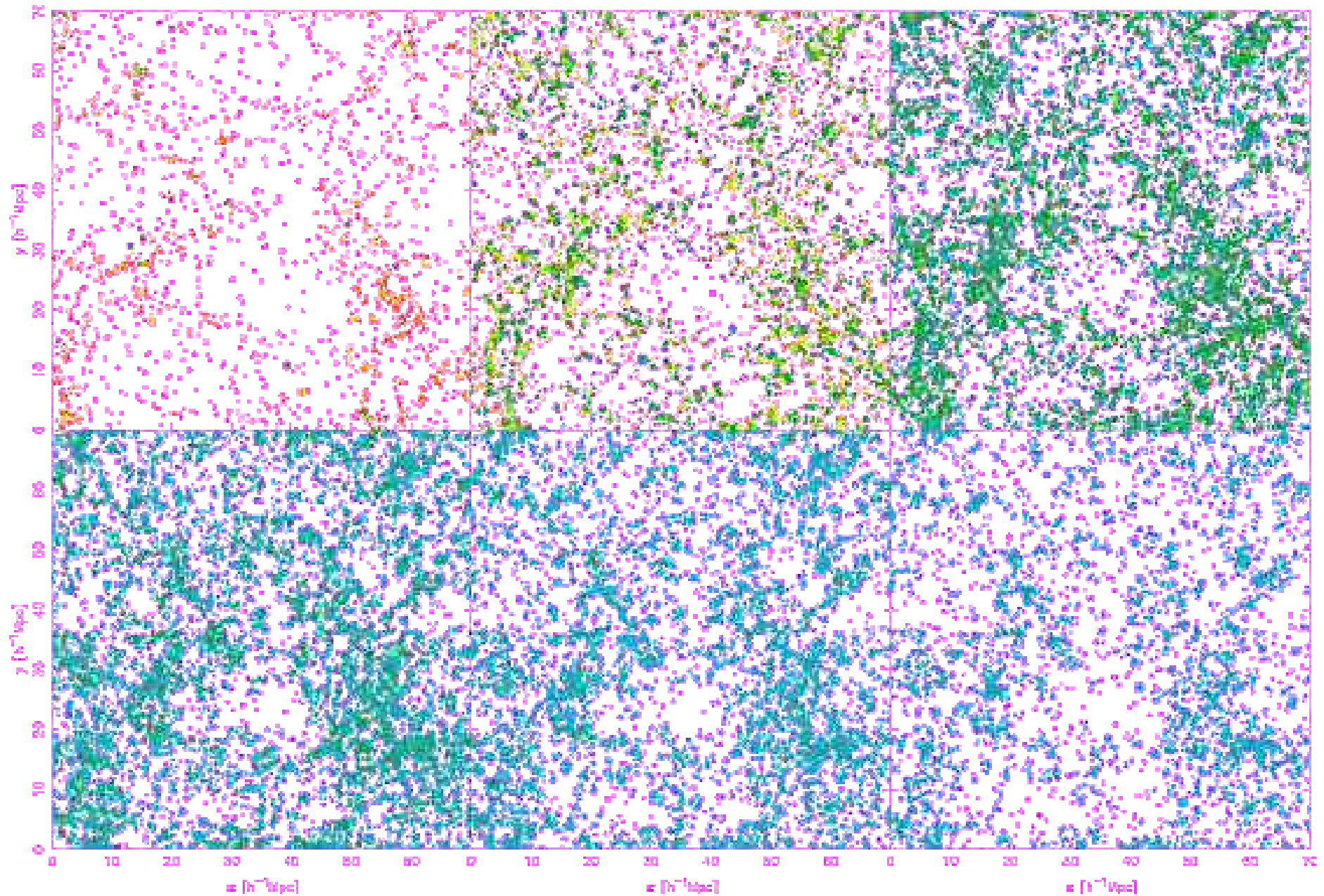
空間分布(dark matter)

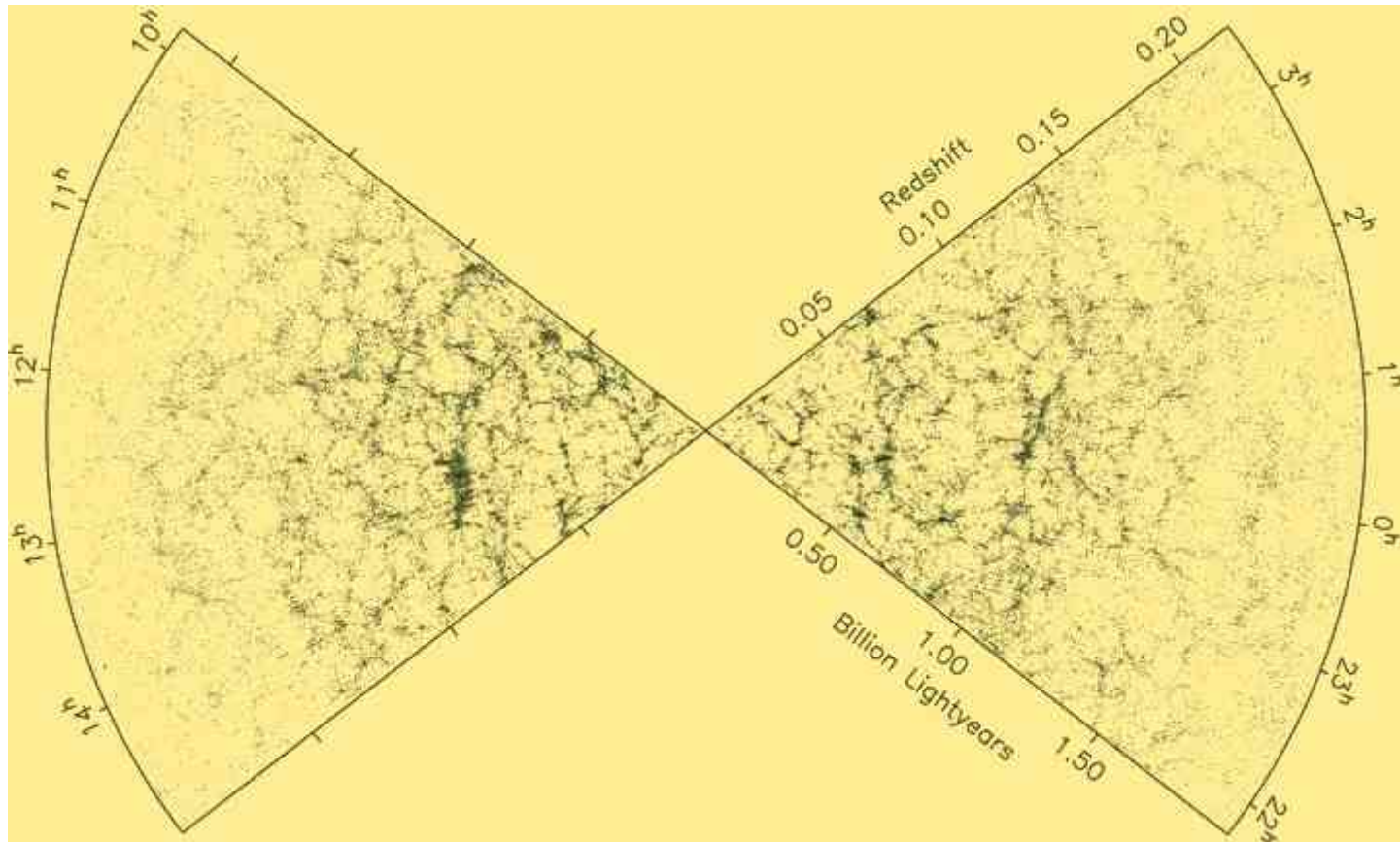
宇宙の大きさ: $1/(1+z)$



空間分布(galaxies)

宇宙の大きさ: $1/(1+z)$





実際の観測データ(2dF survey)

そして、惑星、生命の誕生へ

- 銀河の形成により、星が形成され、重元素が蓄積されていく→超新星爆発による合成
- 重元素が多いと、惑星ができやすくなる
 - 惑星は重元素のかたまり（炭素や酸素など）
- 惑星ができ、重元素が増えると、生命も誕生しやすくなると考えられる
 - 惑星が暑すぎず冷たすぎず、の場合
- 銀河の形成・進化を理解することは、宇宙から生命まで多くの学問分野の理解に重要
- 理論・観測両面で研究が日々続けられている

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

RIBF による原子核ワールドの拡張

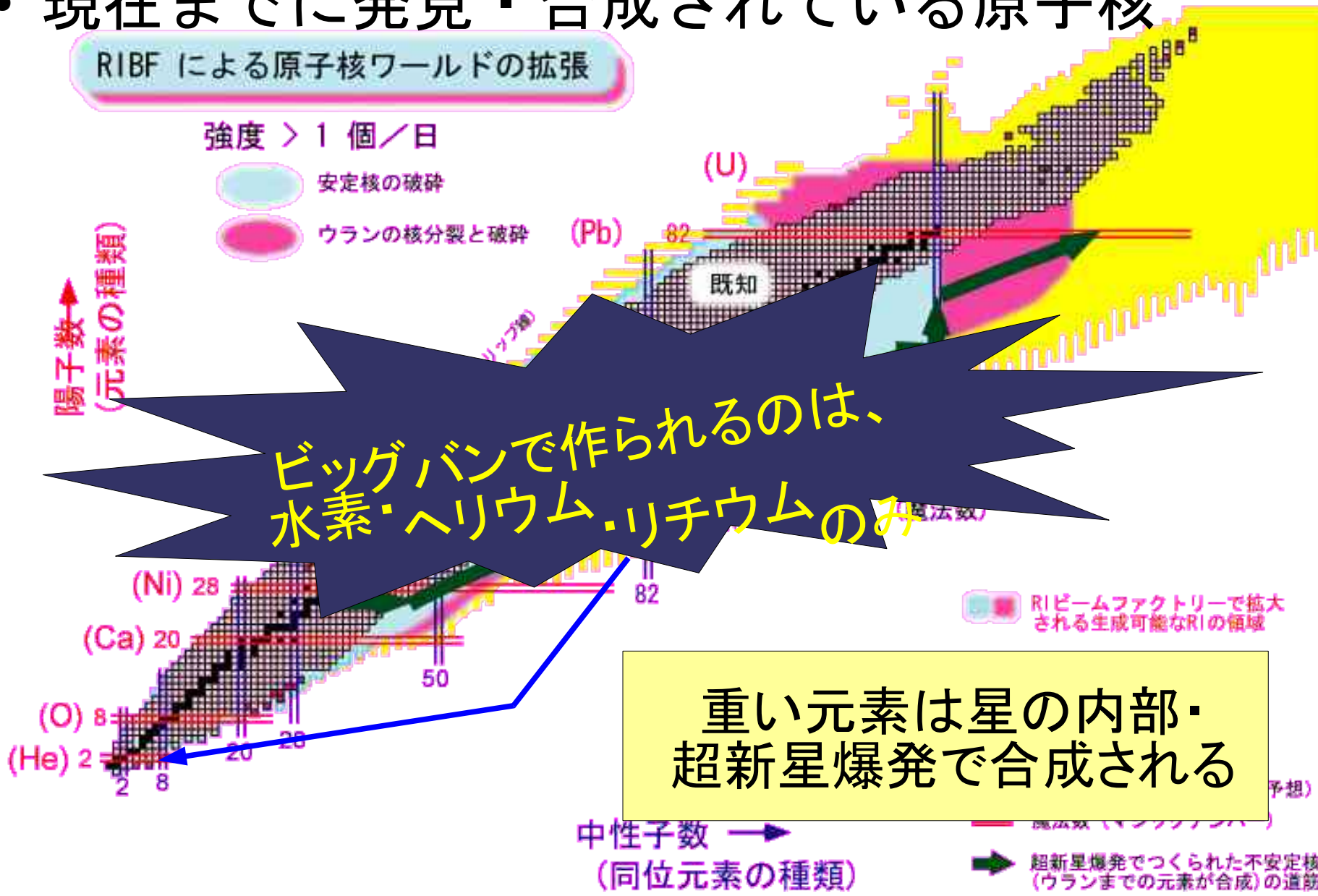
強度 > 1 個/日

安定核の破砕

ウランの核分裂と破砕

陽子数
(元素の種類)

ビッグバンで作られるのは、
水素・ヘリウム・リチウムのみ



重い元素は星の内部・
超新星爆発で合成される

中性子数 →
(同位元素の種類)

RIBFで拡大される生成可能なRIの領域

超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

ニセ科学について少し

- 最近（に限りませんが）、教育にニセ科学が侵入する例をチラホラ見かけます。
- 「理科離れ対策」「科学リテラシー教育」が叫ばれていますが、科学への希望を語るだけでなく、間違ったものへの適切な批判も（教育界の内部で）必要ではないでしょうか。
- 少し実例を見てみます。

例：血液型性格判断

- 血液型（ABO式）と「性格」には強い相関がある、という主張
- 戦前に学界で一度批判されたが、戦後、1971年にある放送作家がとりあげ、ブームに。
 - 戦前は優生学との関係もあった
- 心理学者らによる粘り強い批判活動
- 1990年ごろから大規模な調査が行われ、統計的に「相関があるとは言えない」という結論
- よくよく調べたら相関があるかもしれないが、その程度では「あなたはO型でしょ？」と言えるようなものにはならない
- 間違っていることがわかっているのに…

例：マイナスイオン

- 「マイナスイオンは体にいい」
- 90年代に大手メーカーがこぞって参入
- しかし、「マイナスイオン」の定義もなく、体にいいという証明もない
- 未検証のまま、「効果がある」という主張だけが独り歩き
- 無責任な大手メーカー

例:『水からの伝言』

- 水に「ありがとう」「感謝」などの文字を見せたり、「良い」音楽を聞かせると、その水は美しい結晶を作る、というもの。
- 人体の7割程度は水なので、「だからいい言葉を使いましょう」と道徳の授業で教材に使われる例が全国で見られる
- 変形バージョンとして、ご飯が腐らない、とか、腐ってもいいにおい、とかがある
- しかし、水の結晶（つまり雪や霜）の形については実験的に解明済み
- 水ごときに道徳を教わる人間でいいのか？

例:EM菌

- 有用微生物群 (Effective Microorgasm)
- 万能をうたう
- しかし、その効能については未検証（否定的な調査結果もある）
- 「環境に良い」として、川に投入するなどの活動が環境教育の一環として行われている（「EM団子」）
- 効果があるかどうかわからないが（富栄養化のおそれもある）、「EMだけやっていればOK」となりがちなのが一番の問題
- EM推進者の主張は科学的にはトンデモの類

例：七田式幼児教育

- 全国に幼児教室を開く（数万人が通っているとされる）
- ESPカードなどを使った「超能力教育」を実践している
- 「右脳を開発する」としているが、俗的な「右脳・左脳」の役割分担については実際はそう明確ではない

天文学で論理を鍛えよう

- これらは、正しいか正しくないかの境界線上にあるのに「すでに正しいとされている」と主張するか、あるいは「明らかにおかしい」もの。
- たいていは、常識的な論理を働かせればおかしいことに気づく
- しかし、なかなかそれは難しいもの（訓練が必要）
- 天文学は物理法則の論理がストレートに現れるので、論理的思考を鍛えるのに良いと思われる
- 科学の素晴らしさを伝えると同時に、批判も必要ではないか。

資料

- 私のホームページにいくつか資料があります
 - <http://astro.edu.nagasaki-u.ac.jp/~masa/>
- ニセ科学については、
<http://astro.edu.nagasaki-u.ac.jp/~masa/lecture/2007/#pseudo-science>
 - 教育→2007年度→情報社会と科学
- 今回使用したスライドも、後日載せる予定です。