宇宙を支配する「暗黒面」

東京経済大学

TOKYO KEIZAI UNIVERSITY

榎 基宏

はじめに

自己紹介

榎　基宏（えのき　もとひろ）

専門は、天文学です。

現在は、主に銀河がどのように形成されたのかについて理論的に研究しています。

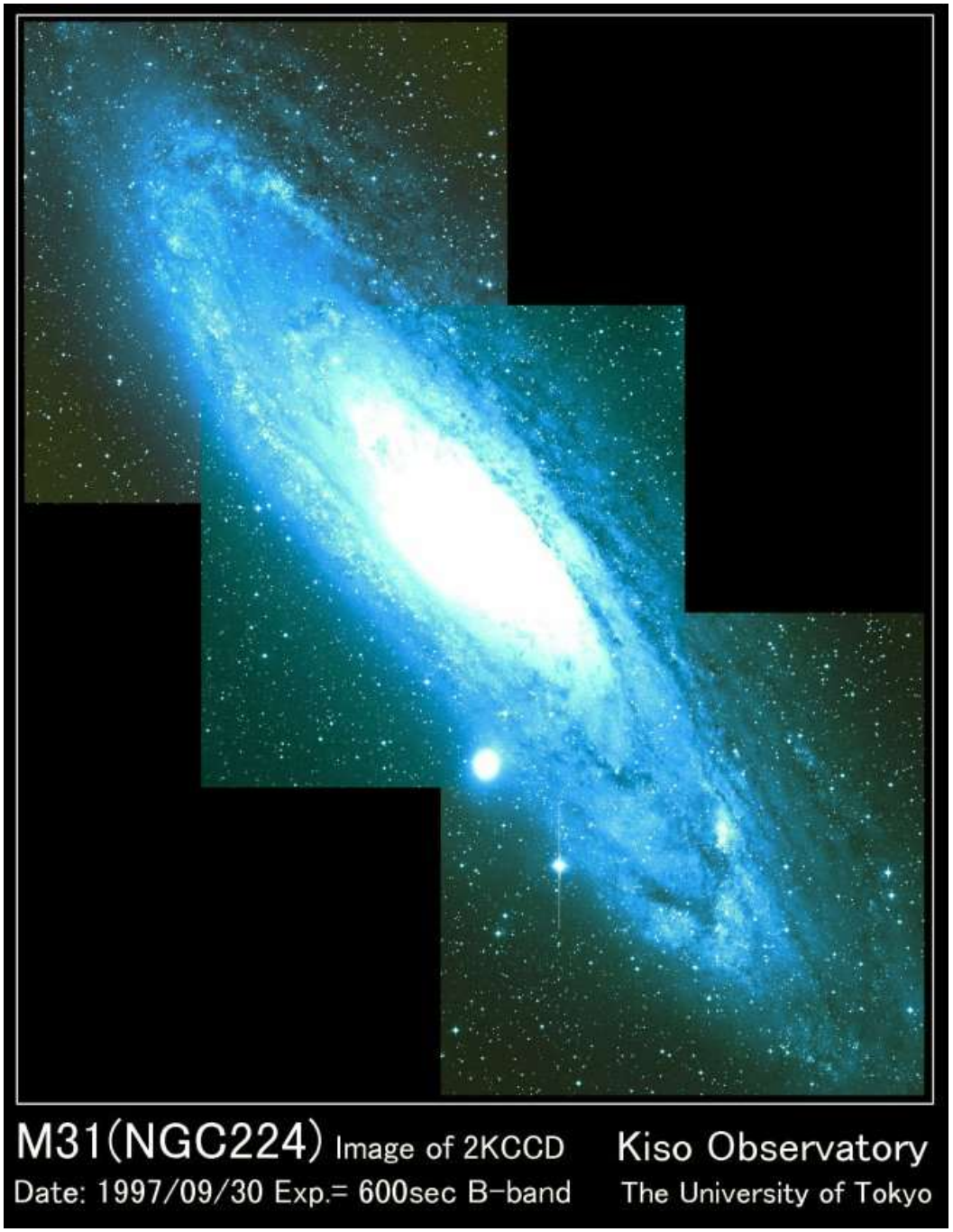
東京経済大学では、一般教養の物理学や天文学などの講義・ゼミを担当しています。

銀河とは？

・およそ1000億個の恒星が集まった天体。
・恒星だけでなく、星間ガスを含んでいる。

私たちのいる太陽系は、天の川銀河という恒星の大集団の中にあります。

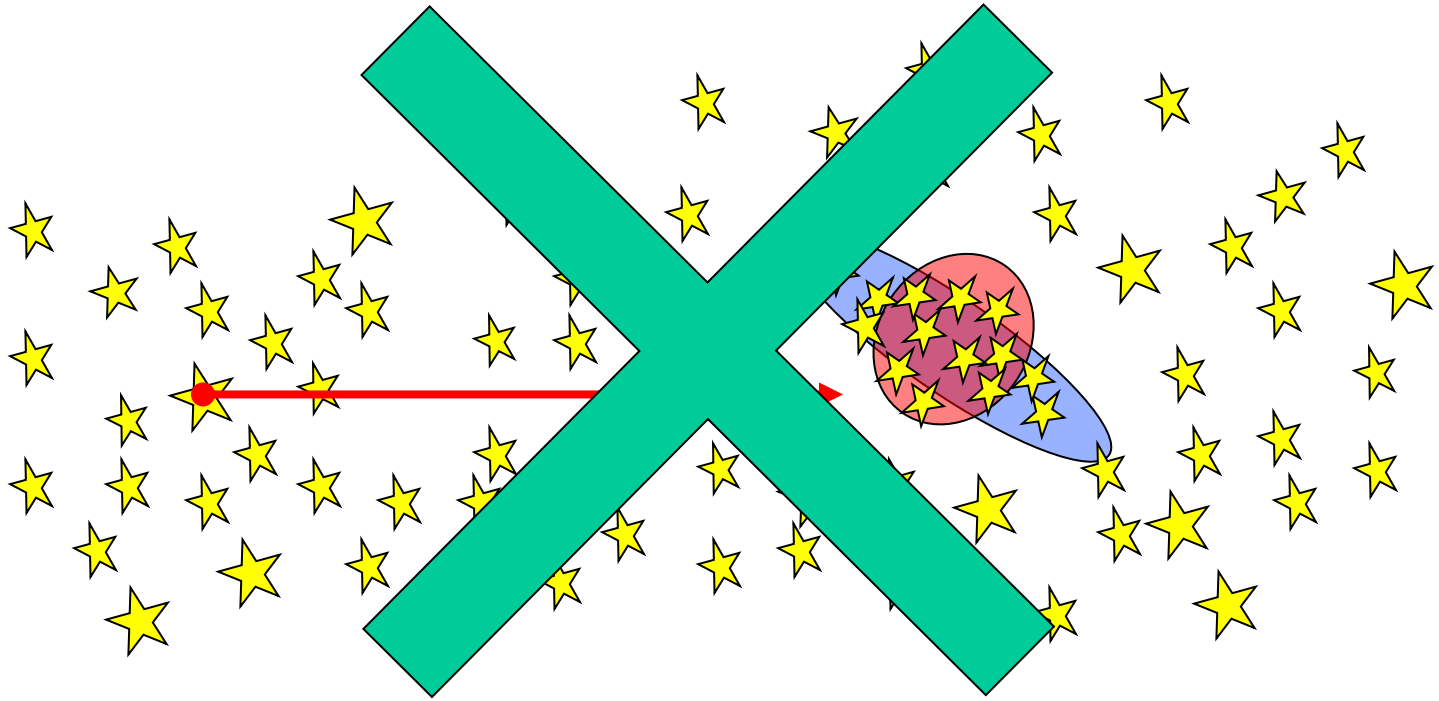
アンドロメダ銀河（M31）

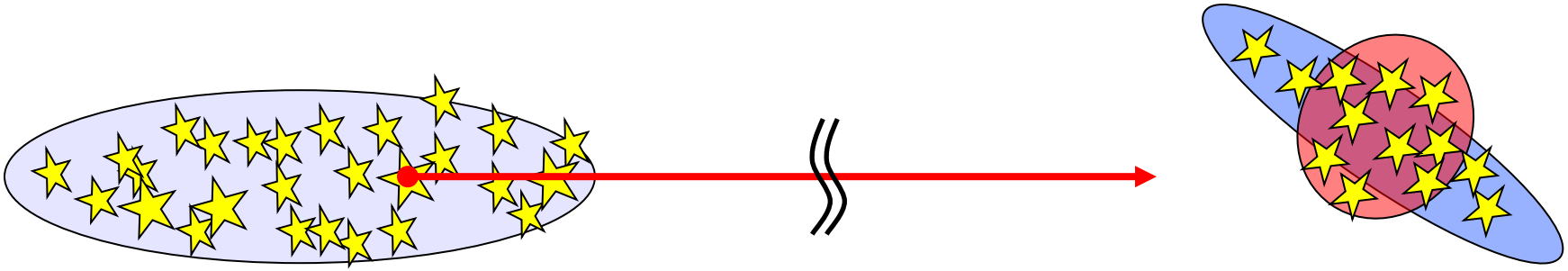


東京大学木曽観測所で撮影された画像

・銀河はどこにある？

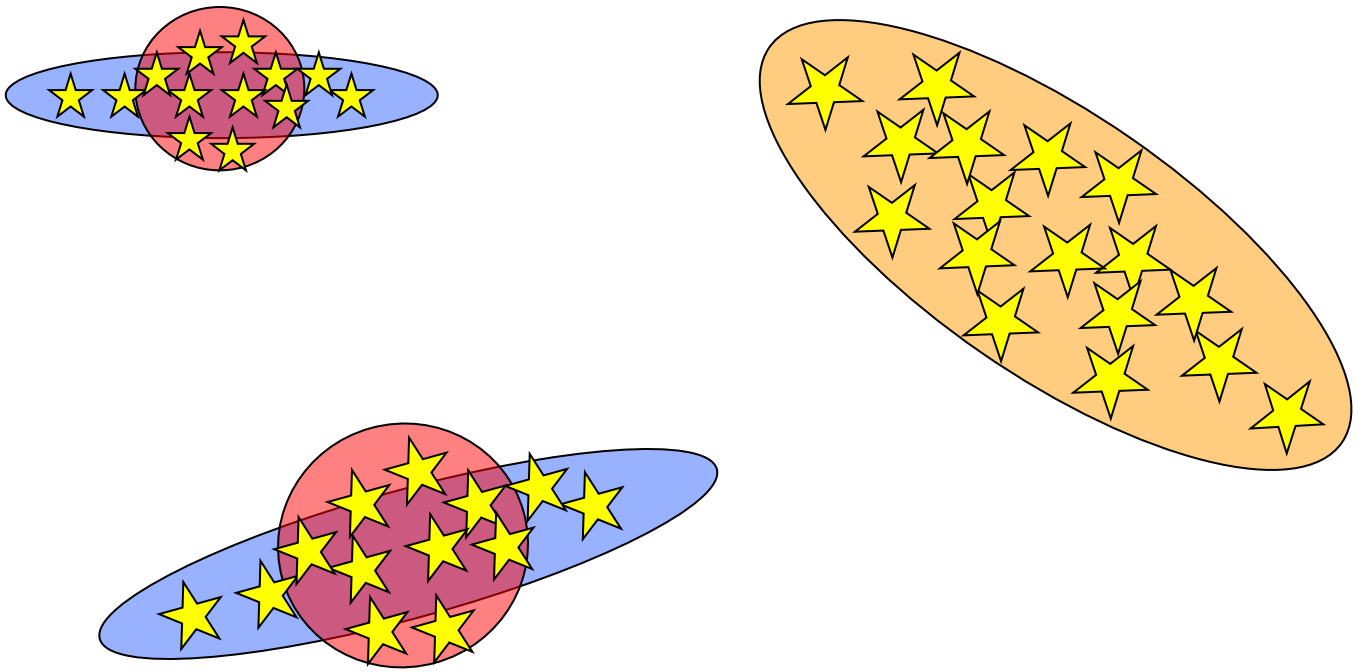
銀河は天の川銀河の外にあります





・銀河の世界

　星の大集団である銀河が、宇宙の中に散らばって分布しています



自然界の階層構造

大

超銀河団	10兆×1億×1000m
銀河団	10兆×1億×100m
銀河	10兆×1億m
太陽系	10兆m
地球	1000万m
人間	1m
原子・分子	100億分の1m
原子核	100兆分の1m
陽子・中性子	1000兆分の1m
クォーク	＜1000兆×1万分の1m
？	

小

20世紀初めまでに人類が認識した範囲

１．「見える」というのはどういうことか？

「自分の目で見るまで信じられませんでした」とか「百聞は一見にしかず」などとよく言われます。

しかし、一方で、「目に見えることだけが全てではない」ということも言われます。

さて、そもそも、物が「目に見える」とはどういうことなのでしょうか？

物が見えるのは、
「その物から光が来て、それが目に入るから」です。

物から来る光？

・光をあてないと、物は見えない。

→　あてた光を物が反射するから、
見ることができます。

・自ら光を出している物もある。

ポイントは「光」

そもそも、光とは何でしょうか？

光とは、電磁波の一種です。

人間の目に見える電磁波のことを「光」（可視光）と言います。

光以外にも、電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線などなど、人間の目には見えない色々な種類の電磁波があります。

人間の目に見える光でも、様々な色の光があります。つまり、光にも色々な種類があります。

光とは「人間の目に見える電磁波」のことです。

では、電磁波とは何でしょうか？

→　電場と磁場の変化が、空間中を波として伝わっていく現象のことです。

電場　･･･　電気力を伝えるもの
磁場　･･･　磁気力を伝えるもの

E:電場
B:磁場

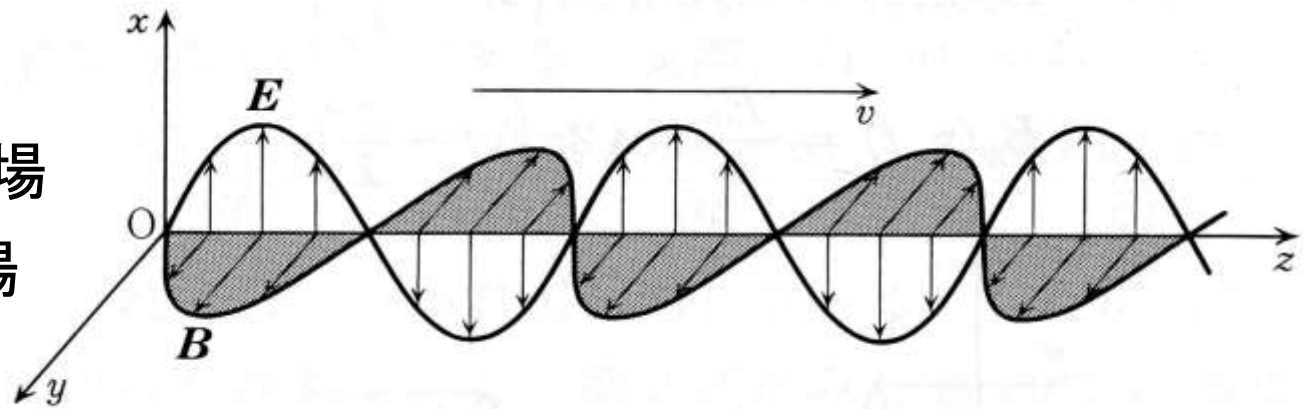


図 7.3　1 次元の電磁波の伝播.

砂川重信著「電磁気学」(岩波書店)より

・電磁波と物質の相互作用

物質　→　原子が電気力と磁気力で結合してできています

原子　→　原子核と電子が電気力と磁気力で結合
してできています

電磁波　→　電気力と磁気力の変化を伝えます

⇒　物質に、電磁波があたると、原子同士や原子内部にはたらく電気力や磁気力が変化し、物質に影響を与えます。

→　その結果、物質は電磁波を吸収したり反射したりします。

・光（電磁波）の速さ

真空中を進む光（電磁波）の速さ

≒ 秒速30万 km ＝ 秒速3億 m

・光年

光が1年（約3000万秒）に進む距離を、
1光年といいます。

1光年 ≒ 秒速3億 m × 3000万秒

≒ 1億×1億 m = 1京 m

cf) 気温15℃、1気圧の空気中の音波の速さは、約340 m/s

地球1周 ≒ 4000万m

地球と太陽の距離 ≒ 1億5000万km

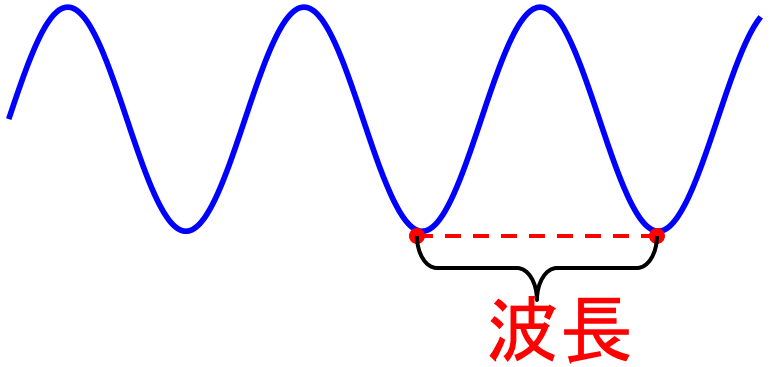
・様々な種類の電磁波

＊人間の目に見える電磁波を「光（可視光）」と言います。

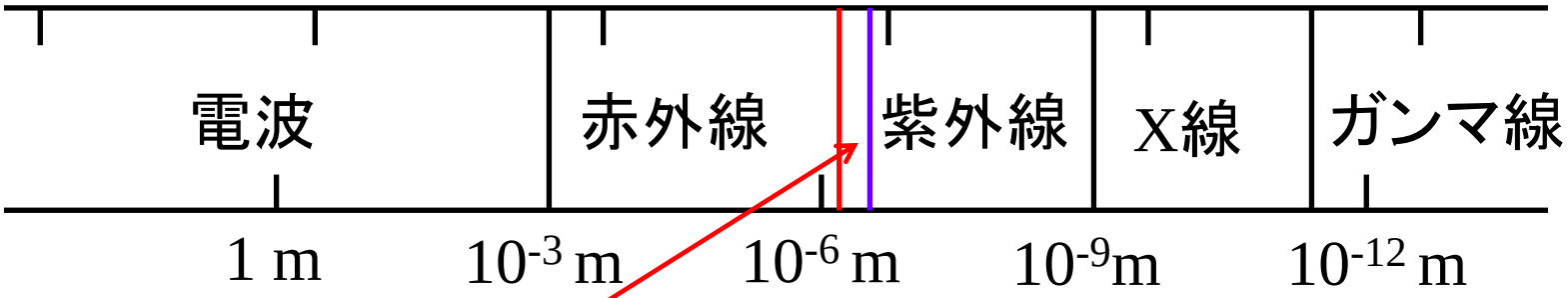
＊人間の目に見えない電磁波もあります

→　電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線、、、

→　種類の違いは、
波長の違い。



長い　←　　波長　→　短い



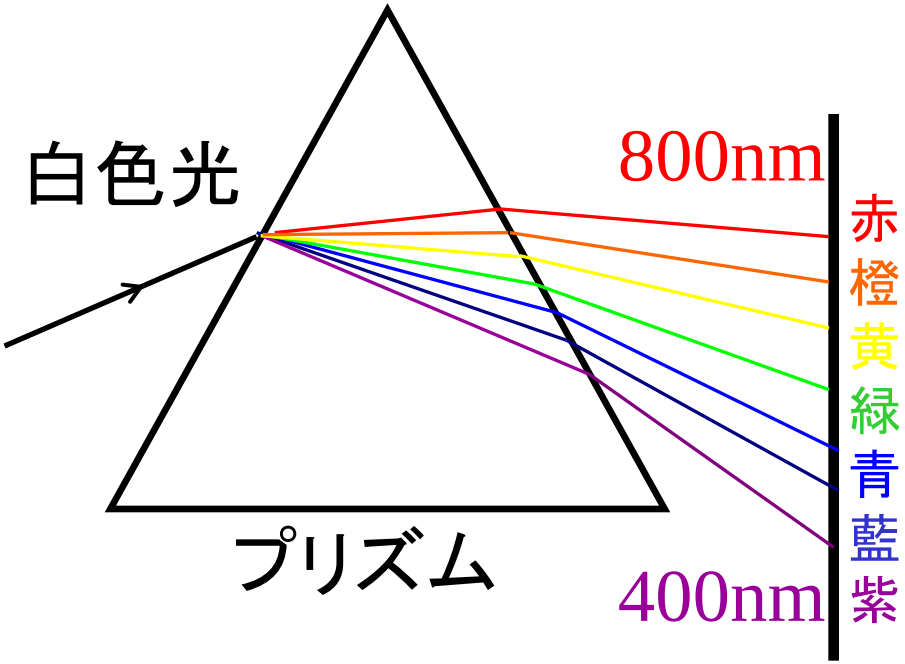
可視光　波長・・・ 0.4×10^{-6} m ~ 0.8×10^{-6} m

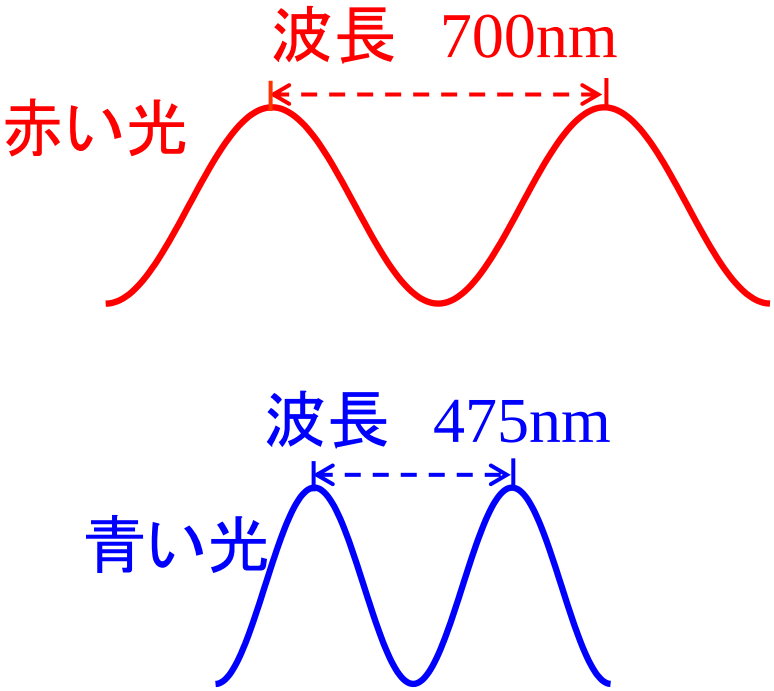
・光は、波長が　0.4～0.8　μm　の電磁波

光には様々な色の光があります。

→　色の違う光は何が違う？

→　波長が違う。





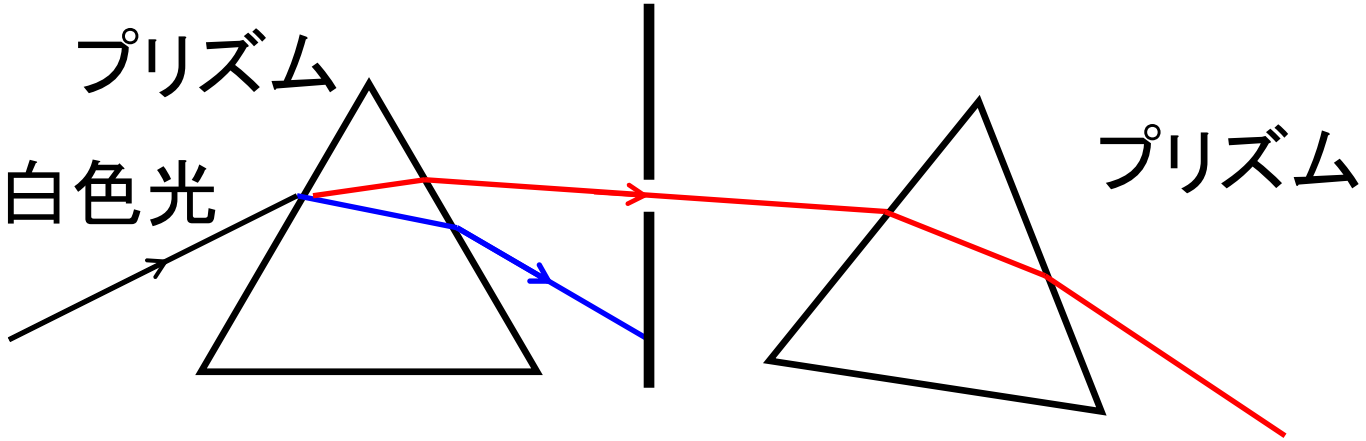
1nm = 10^{-9}m=10億分の1 m

1000nm = 1μm =10^{-6}m=100万分の1 m

・白色の光の波長は？

太陽からの光（白色光）をプリズムに通すと、様々な色の光に分解されます。

→　白色光は様々な色の光が合成されたもの



プリズムで分解された光の一つ（ある特定の色の光）を取り出して、もう一度プリズムに通しても、それ以上分解されません。

・反射、透過と物の色

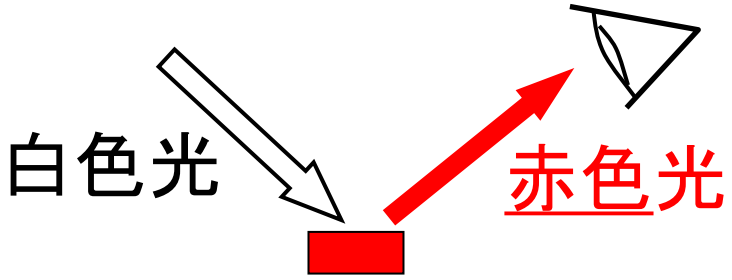
白色光　→　無数の色の光が合成されたもの

例）白色光をあてると、赤色に見える物体

→　白色光の無数の色のうち、赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射（または透過）する物質で作られています。

→　その物体から目に届く光は、赤い光だけ。

→　赤色に見える。



電磁波には様々な種類があります。

・人間の目で見える電磁波の波長の範囲は非常に狭い。
（$0.4 \sim 0.7\mu m = 0.4 \times 10^{-6}\,m \sim 0.7 \times 10^{-6}\,m$）

・人間の目で見えない電磁波の波長の範囲の方が
圧倒的に広い。（$\sim 10^{4}\,m \sim 10^{-15}\,m \sim$）

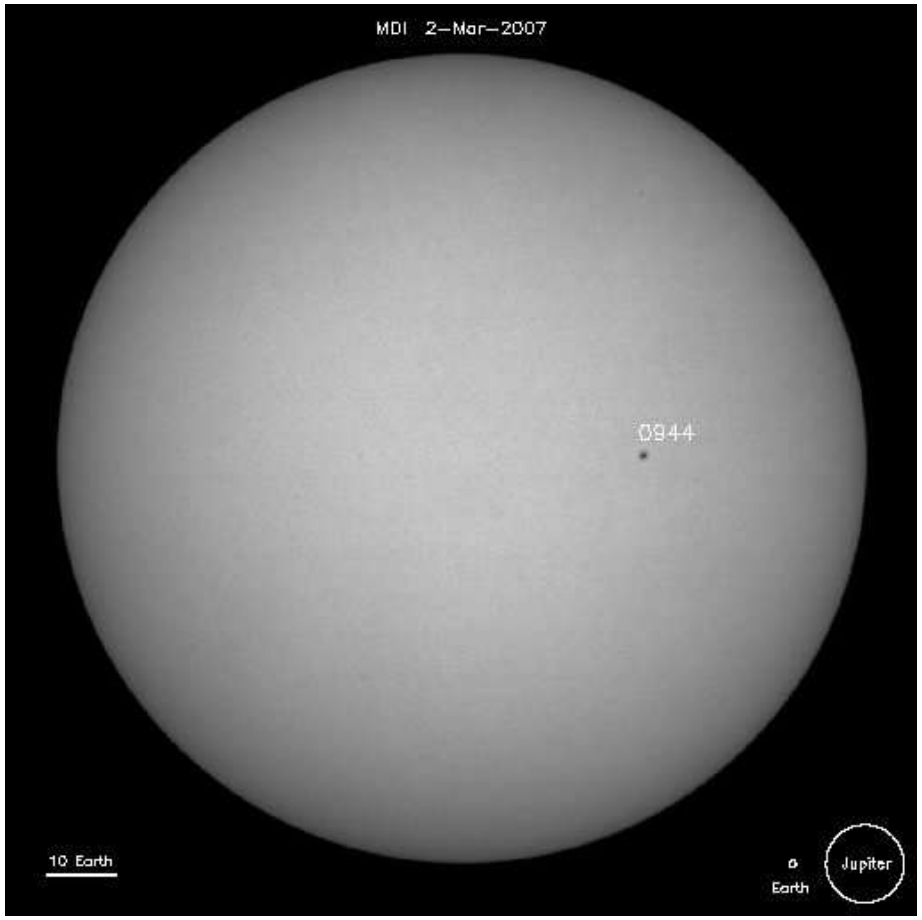
・目で見えている物体は、ほんの一部

・物体の、ほんの一面しか、目には見えていません。

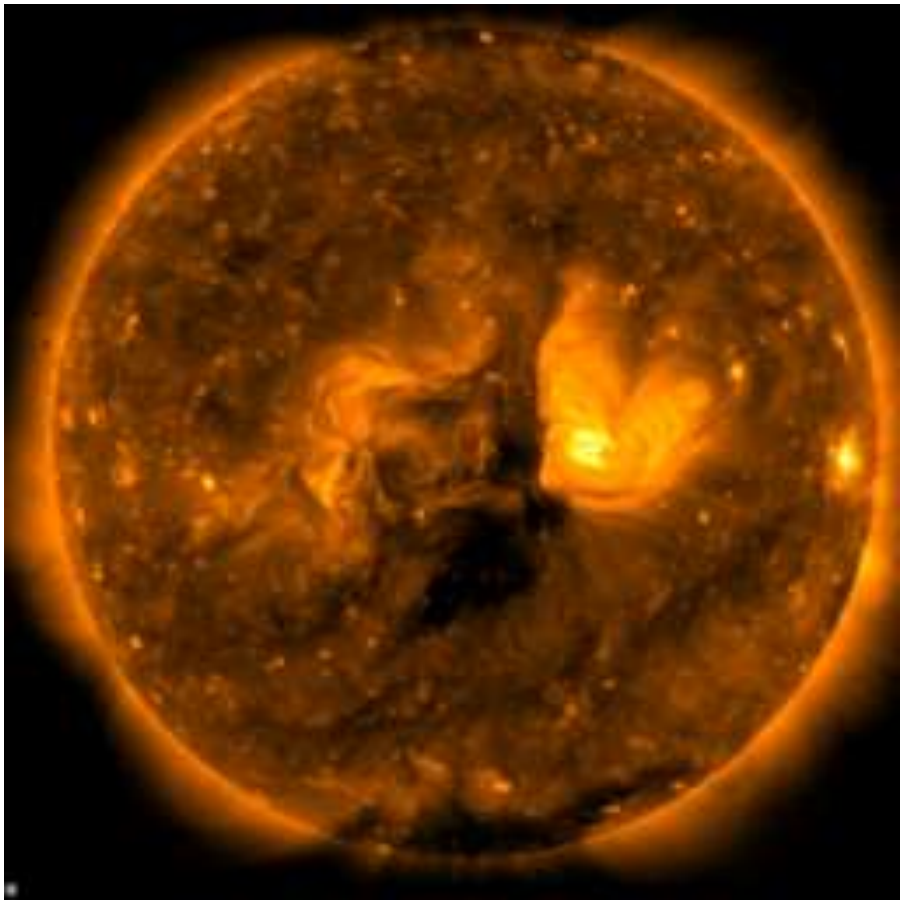
→ 様々な波長で「見る」と、
色々なものが「見え」てきます。

光とX線で見た太陽

・可視光



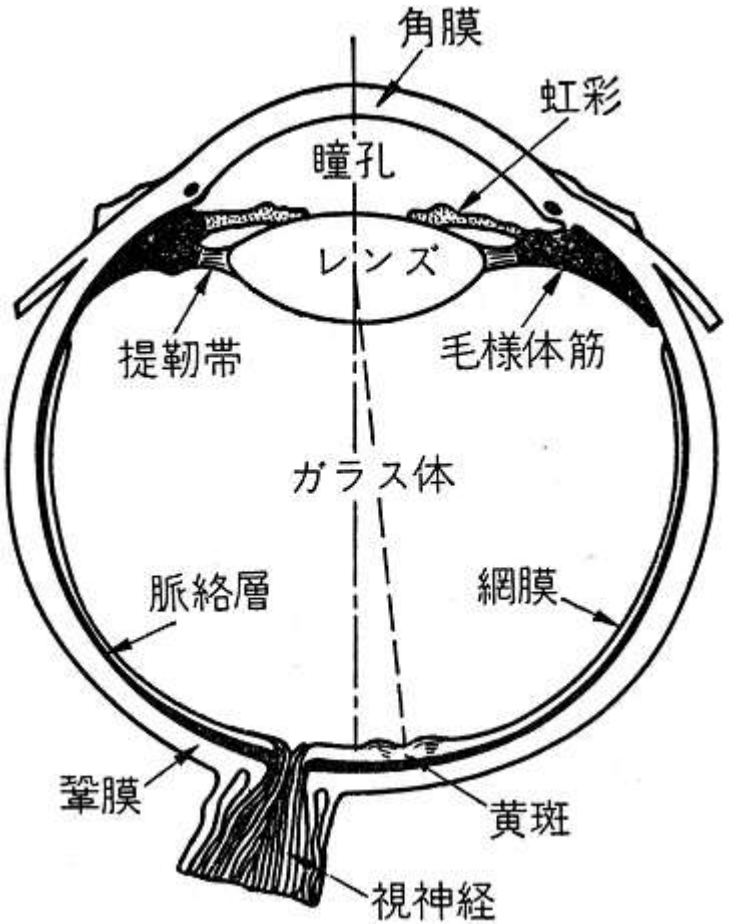
・X線



国立天文台　ひので科学プロジェクトのページより
http://hinode.nao.ac.jp/news/070527DataOpen_XRT/

人間の目と光

目に光が入ると、物が見えます。
→　目で光を感じています。



外から来た光は、角膜・レンズ（水晶体）で屈折して集められ、網膜で受け取られます。

網膜の中の視細胞は
主に明暗を感じ取る
「杆体（かんたい）」と、
主に色を感じ取る
「錐体（すいたい）」
から成っています。

「ファインマン物理学II」岩波書店より

・色の感知

視細胞：光を受け取る視物質を持っています。

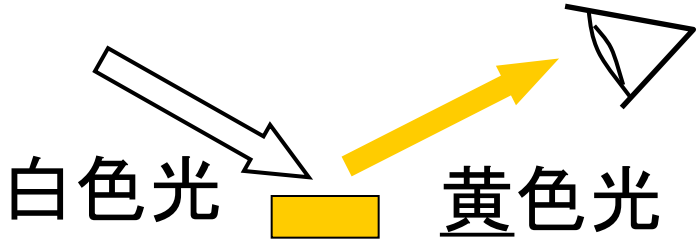
明暗を感じる杆体の視物質は1種類

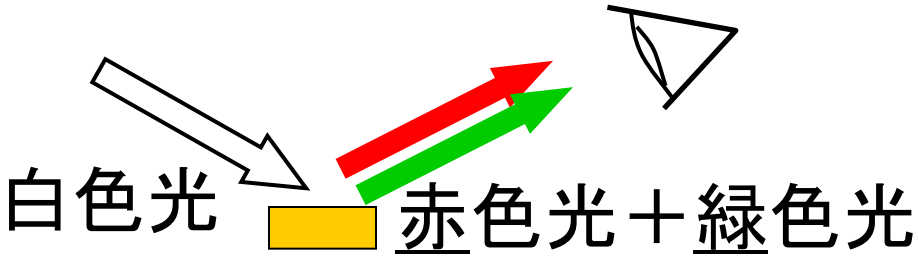
色を感じる錐体の視物質は3種類

→　それぞれ主に「赤」、「緑」、「青」の
波長の光に反応します。

・光の区別と色の区別

例）黄色の光





・黄色光だけ反射

・赤色光と緑色光を反射

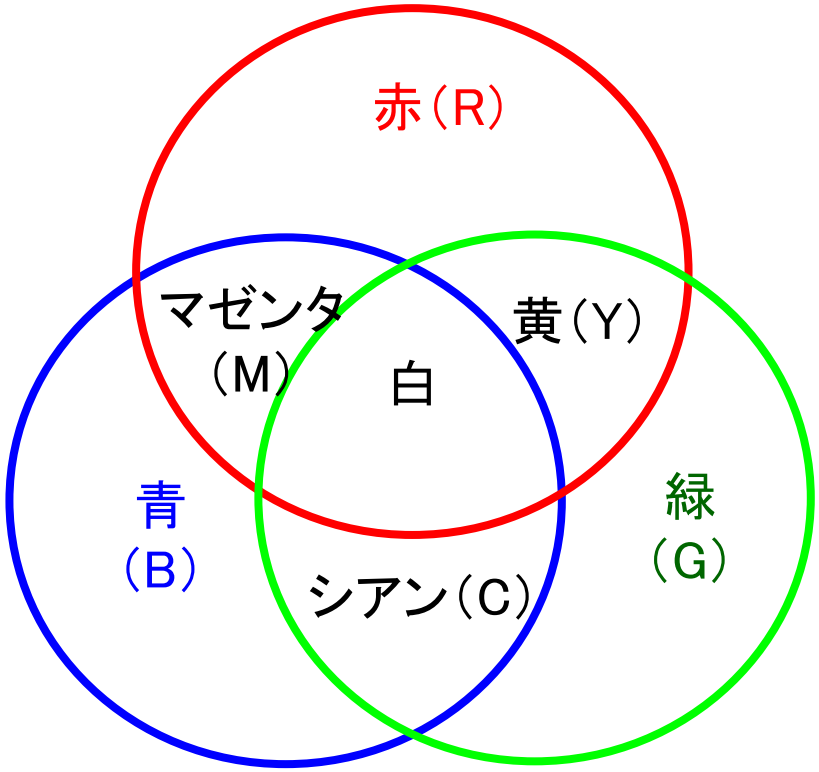
＊波長が約0.6μmの電磁波（黄色光）

＊波長約0.7μmの電磁波（赤色光）と、波長約0.55μmの電磁波（緑色光）を同じ強さで合成した電磁波

→　それぞれ別の種類の電磁波ですが、人間は、どちらも同じ「黄色の光」と知覚し、見分けられません。

・光の三原色

「赤」、「緑」、「青」の3色の光を、明るさを様々に変えて重ね合わせると、人間が知覚できる全ての色の光を作り出すことができます。



「赤 (Red)」、「緑 (Green)」、「青 (Blue)」の3色を「光の三原色」と言います。

色と視覚と心理

「光に色はない。光にはそれぞれの色の感覚を引き起こすある種の力と性質があるに過ぎない」（ニュートン）

私達が感じている物の色とは、視覚系（目＋視神経+脳）が、視細胞が受け取った波長別の光の強度情報と、他の感覚器の情報や過去に得た経験をもとに調整して決定したものです。

色は物理的な量というよりも、人間の視覚が作り出す心理的な量です。

→「光は色の感覚を引き起こす性質を持つ」

・「写真に写っているもの」＝「目で見たもの」？

写真に写っているのは、目で見た光景そのものではありません。

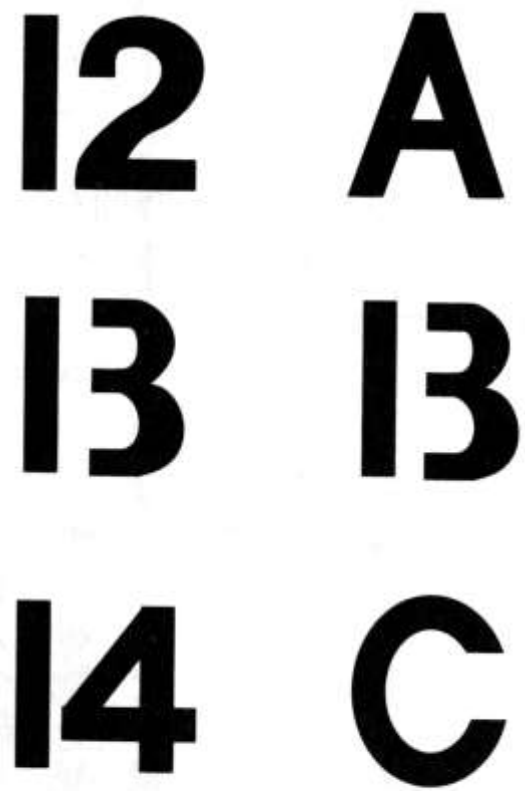
物理的な点から言うと、フィルムやCCDと、目（視細胞）とでは、電磁波の感度が違うので、目で見えるものと写真に写っているものは異なることがあります。

「自分の目で見たこと」は「本当の現実」？

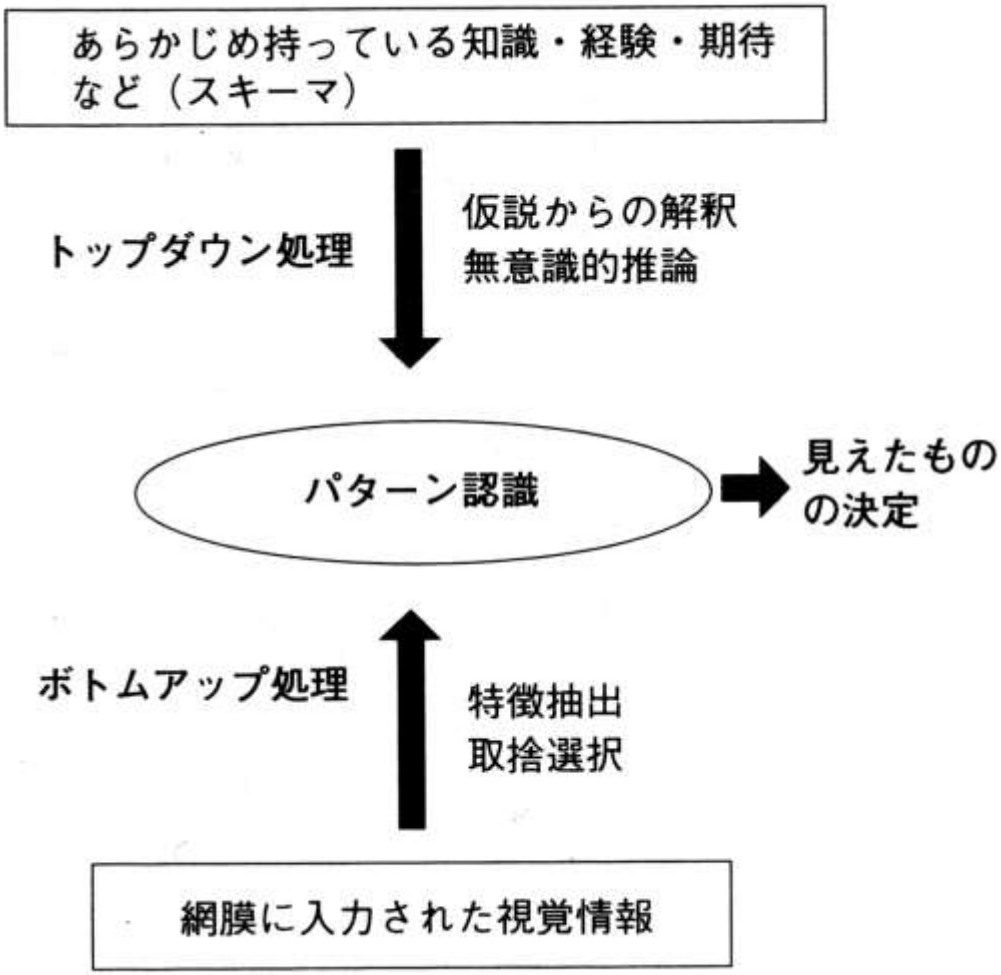
視覚系（目＋視神経＋脳）は、目に入ってきた外界の物理的情報（明るさ、色、形、動きなど）を脳の中に忠実に映し出すシステムではありません。

私達が「見た」と認識するものとは、目が受け取った物理的情報と、他の感覚器の情報や過去に得た経験をもとに、視覚系で様々な処理を施されて決定されたものです。

私達が「見ている」ものは、いわば脳が再構成した「仮想現実」。



2-5　文字認知の文脈効果



2-1　認知情報処理の２方向

菊池聡著「超常現象をなぜ信じるのか」（講談社ブルーバックス）より

２．電磁波を出さない物の存在を知るには？

目に見えないものでも、光以外の波長の電磁波で調べれば、色々なことが分かります。

それは、その物が、電磁波を放射したり、他から来た電磁波を反射したり、吸収したりするからです。

では、光っていない（電磁波を出していない）ものを知るにはどうしたら良いでしょうか？

そもそも電磁波と相互作用しない（放射しない、反射しない、吸収しない）ものはどうしたら、その存在を知ることができるでしょうか？

・光っていない天体の存在を知るには？

→　重力（万有引力）の法則を使えばよいです。

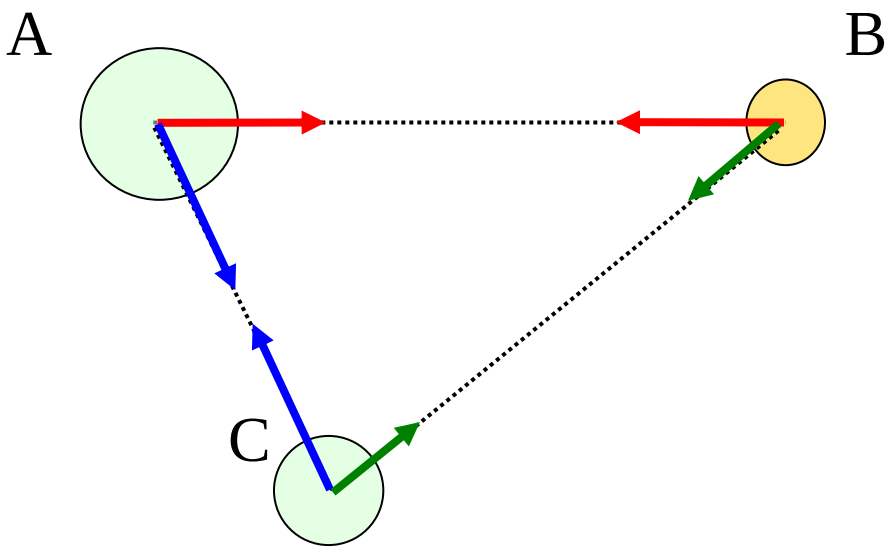
重力（万有引力）とは？

　質量を持つもの間にはたらく、お互いに引っ張り合う力（引力）のことです。

→　見えない（電磁波と相互作用しない）物質でも、重力で質量を「感じる」ことはできます。

ニュートンの万有引力（重力）の法則

「全ての物体の間には、お互いに引き合う力（引力）がはたらく」



「二つの物体の間に働く万有引力の大きさは、大きさが距離の２乗に反比例し、２つの物体の質量の積に比例する」

物体が重さを持つ原因になる力なので、万有引力を重力と呼ぶこともあります。

どうやって質量を量るのでしょうか？

・質量が大きい物体は、強い重力を生み出します。

→　近くを通る天体

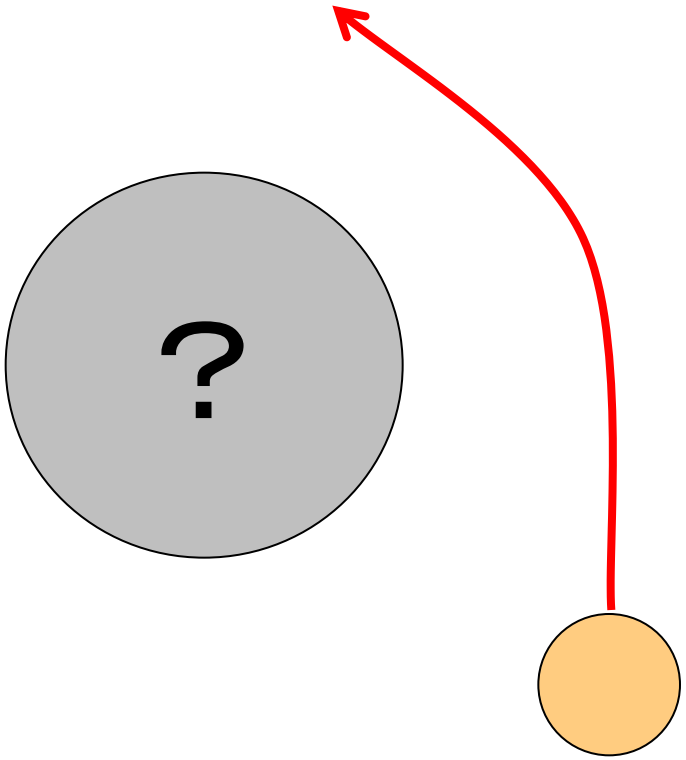
・進む向きが大きく変わる

・速さが大きく変化する

→　光っていて見える天体の運動から、重力の法則を利用して、見えない天体の質量を計算することができます。

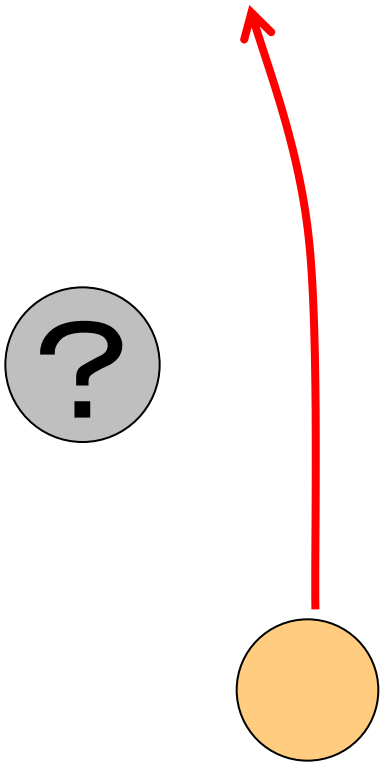
重力と運動

・質量が大きい
と重力が強い



近くを通る天体の運動
は大きく変わる

・質量が小さい
と重力が弱い



近くを通る天体の運動
はあまり変わらない

重力の法則を使えば、光っていない物質の存在を知ることができます。

この、光っていない物質を
「暗黒物質（dark matter）」と言います。

銀河中の星やガス雲の動き、銀河団中の銀河の運動や高温ガスの観測などから、暗黒物質の量が測定されています。

宇宙全体で平均すると、この暗黒物質は、光っている物質の5～6倍程度も存在していることが現在では分かっています。

・宇宙の平均密度

暗黒物質が普通の物質の5～6倍？

→ ただし、宇宙全体で平均した場合

宇宙全体の平均密度 ～ $3\times10^{-30}\mathrm{g/cm^3}$

→ $1\mathrm{m^3}$に水素原子1個程度の密度

⇔ $1\mathrm{m^3}$の空気中には、およそ3×10^{25}個の空気の分子が含まれています。

暗黒物質の正体は？

単に光ってない（電磁波を放射していない）だけの普通の物質？

→ 大半は、私たちの身の回りにある普通の物質とは異なる、正体不明の物質

→ 電磁波と相互作用しないある種の素粒子？

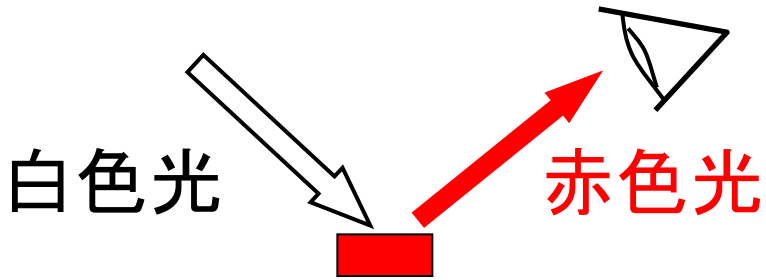
この宇宙にある物質の大半は、正体不明の暗黒物質です。

・暗黒物質は何色？

＊白色光をあてると、赤色に見えるもの

→　白色光の無数の色のうち、
赤色以外の光を吸収し、
赤色の光だけを反射する。

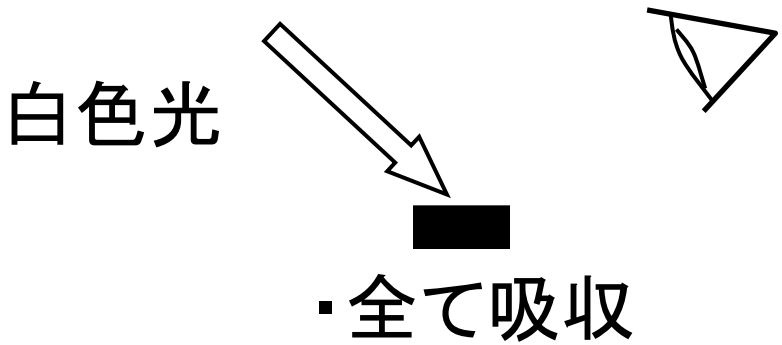
→　その物体から目に届く光は、赤色光だけ。
→　赤色に見える。



・赤色光以外は全て吸収
・赤色光だけ反射

＊黒色に見えるもの

→　全ての色の光を吸収するもの。



＊暗黒物質

→　電磁波（光）と相互作用（吸収・反射）しない。

→　光をあてても、素通りする。

→　暗黒物質は、「黒色」ではなく、「透明」。

３.「暗黒面」に支配される宇宙

この宇宙に存在する物質の大半は、
正体不明の暗黒物質です。

我々を形作っており、我々の身の回りにある
普通の物質の約５～６倍も存在しています。

宇宙の主役は「暗黒面」で、これに宇宙全体
のダイナミクス（動力学）が支配されています。

膨張する宇宙

アメリカのハッブルの1929年の発見。

・ほとんどの銀河は、天の川銀河から遠ざかっている。

・その銀河が遠ざかる速さは、銀河までの距離に比例する。

これは後に「ハッブルの法則」と呼ばれるようになりました。

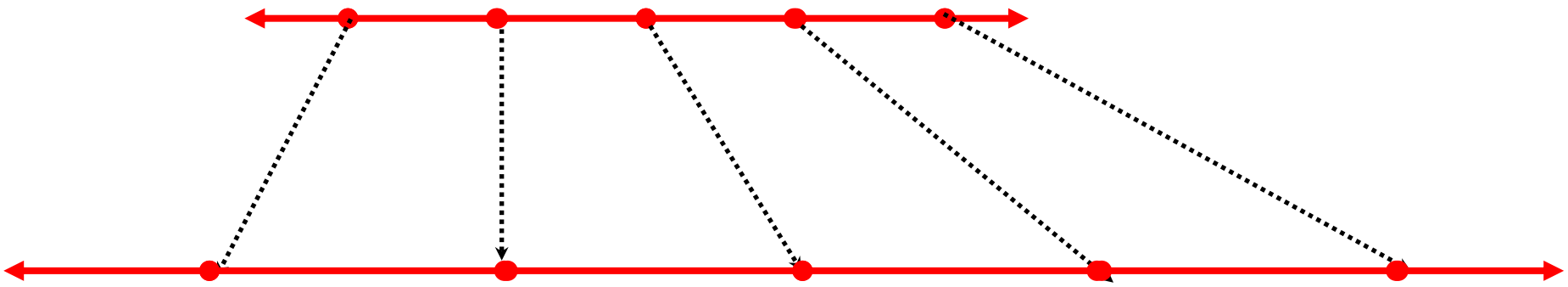
・ハッブルの法則から分かること

＊空間が一様に（どこも同じ倍率で）膨張している

＊銀河は空間に固定されている

イメージ：　しるしをつけたゴムひもを伸ばす

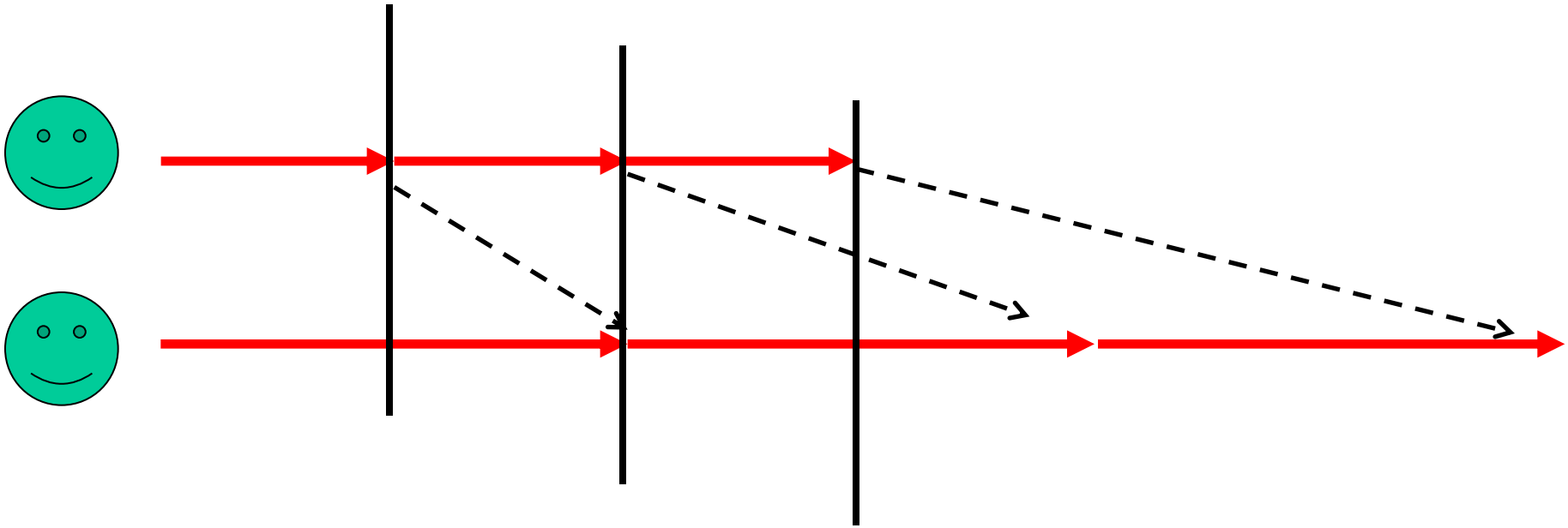
しるし　⇔　銀河
ゴムひも　⇔　空間



しるしはゴムの上で固定されており、しるしがゴムの上を移動するのではない。

・宇宙の膨張とハッブルの法則

一様な膨張　・・・　どこも同じ倍率で膨張



遠い点ほど、移動距離が長い
→　速く遠ざかる、ということ。

・宇宙の膨張と一般相対性理論

宇宙そのものが膨張していることは、アインシュタインが1915年に完成させた一般相対性理論に基づいて、1920年代初めに、フリードマンらに予言されていました。

⇔　ハッブルの発見は、1929年

一般相対性理論は重力の理論で、ニュートンの法則が適用できない状況（重力が強い場合、物体の速さが光の速さに近い場合、宇宙全体など）でも適用できます。

アインシュタインの一般相対性理論

一般相対性理論は、重力の理論ですが、
時間と空間の理論でもあります。

一般相対性理論によると、物質やエネルギーは、
そのまわりの時空をゆがめる。

時空がゆがむとは？
・空間が曲がる
・時間が遅れる

「時空のゆがみ具合」と「物質とエネルギーの分布」
の関係は、アインシュタイン方程式で表される。

・重力と時空

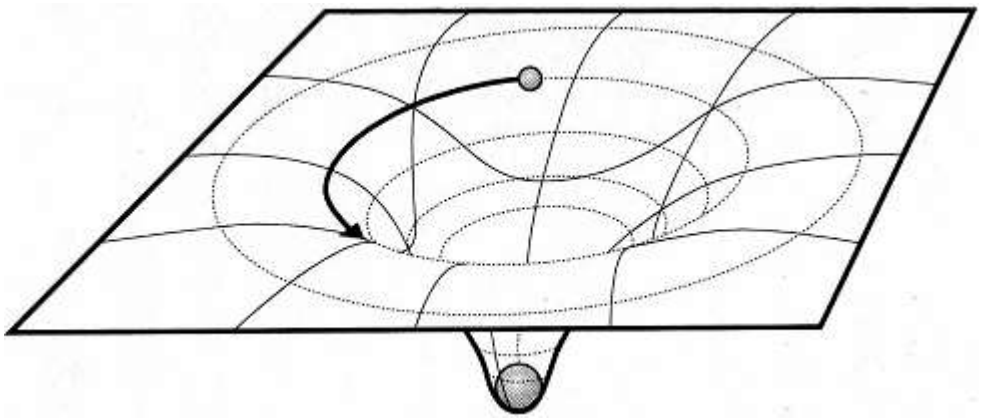
物質・エネルギー

→ 周りの時空をゆがめる。

→ 物体はまっすぐ進めず、曲がって進む。

→ 「物体に重力（万有引力）が働いた」と考える。

「重力とは、時空のゆがみの効果である」

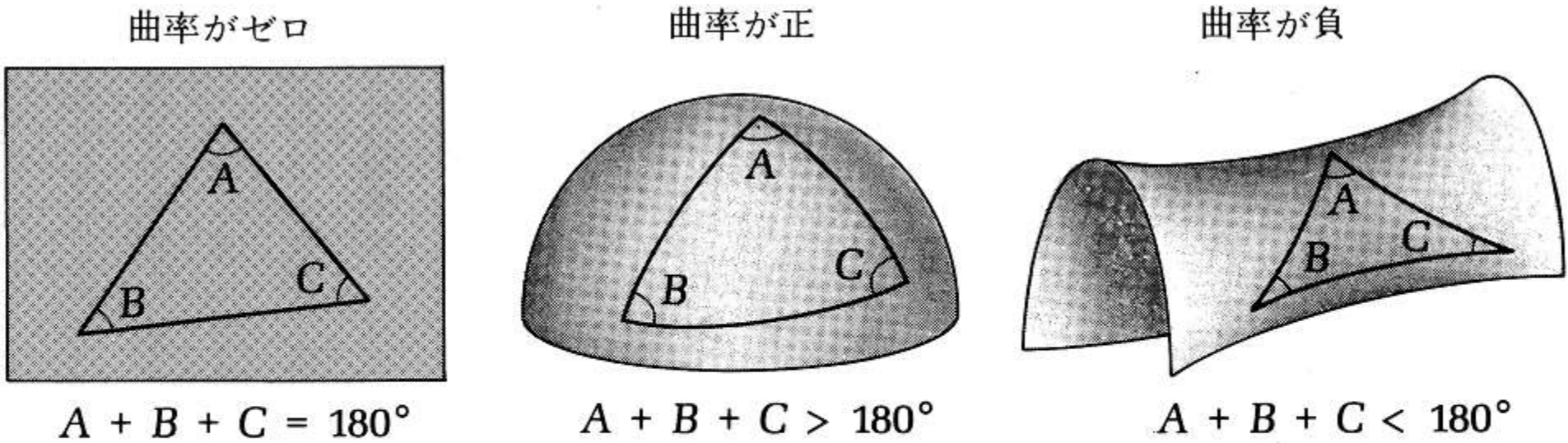


サイモン・シン著「ビッグバン宇宙論」（新潮社）より

物体だけでなく、
光も曲がって進む。

・空間の曲率（曲がり具合）

＊平らな空間　・・・　曲率がゼロ
＊ 曲がった空間　・・・　曲率が正または負



5-10. 曲率がゼロ，正，負であるような二次元空間の例。三角形の 3 つの角 A，B，C の和は，それぞれの場合で違っている。

J.V.ナーリカー著「重力」日経サイエンス社　より

一般相対性理論、特殊相対性理論とニュートン力学の関係

一般相対性理論（GR）

→ 重力なし

特殊相対性理論（SR）

↓ 物体の速さが光速より十分小さい。重力が弱い。

↓ 物体の速さが光速より十分小さい。

ニュートンの運動の法則
＋
ニュートンの万有引力の法則

→ 重力なし

ニュートンの運動の法則
（重力なし）

cf.　光速 ≒ 秒速30万km ＝ 秒速3億m ＝ 3×10^8 m/s

地球一周 ≒ 4万km

・フリードマンの研究（1922~24年）

宇宙空間は一様で等方である（宇宙原理）と仮定して、アインシュタイン方程式を解き、宇宙全体がどうなるか調べました。

結果

（1） 宇宙は有限の過去に、急激な膨張をはじめる。

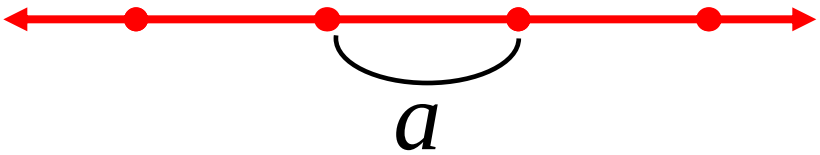
（2） 宇宙の膨張の速さは、重力のため
だんだんゆっくりになっていく。

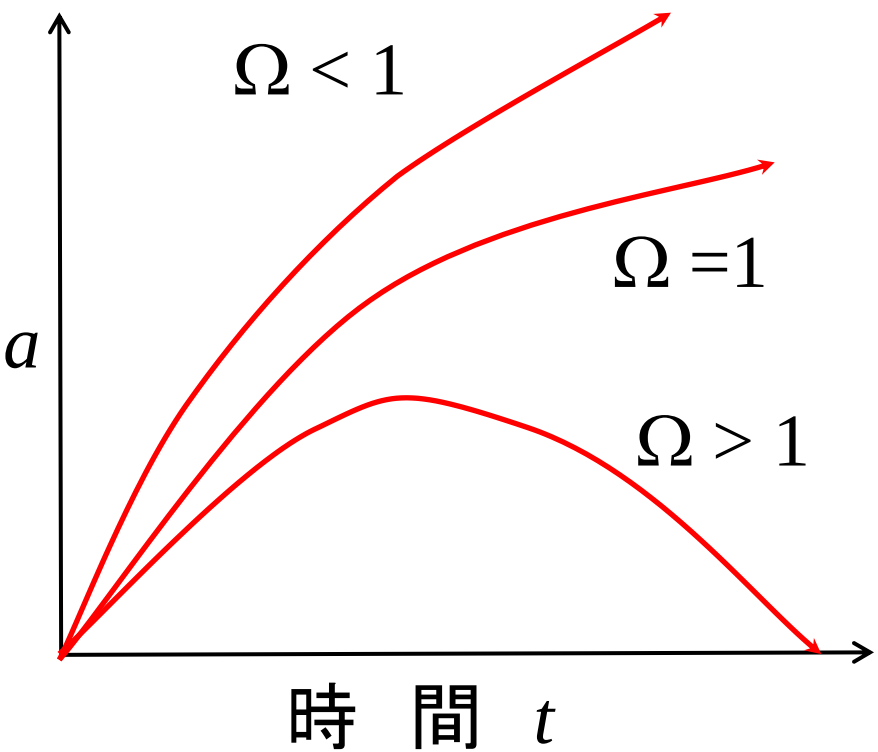
（3）宇宙の未来は、
「ゆっくりと膨張しつづける」か、

「膨張は途中で止まり、
その後、収縮してつぶれる」か、
どちらか。

・フリードマンが発見した宇宙の膨張のパターン

空間内の点と点の間隔の時間変化を考える





Ω : 密度パラメタ

密度が高い
→重力エネルギーが大きい

$$\Omega = \frac{|\text{重力のエネルギー}|}{\text{膨張のエネルギー}}$$

Ω <1 , Ω =1
膨張し続ける

Ω >1
収縮してつぶれる

・宇宙に存在する物質の密度

＊空間の曲率（曲がり具合）を決める

＊宇宙の膨張のパターン（宇宙の歴史と運命）を左右する

この宇宙に存在する物質の大半は暗黒物質

→「暗黒物質が、
宇宙の形と運命を決定している」

暗黒物質（と普通の物質や光）

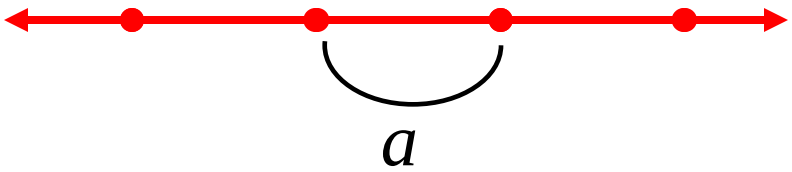
→　宇宙の膨張を「減速」させる重力源

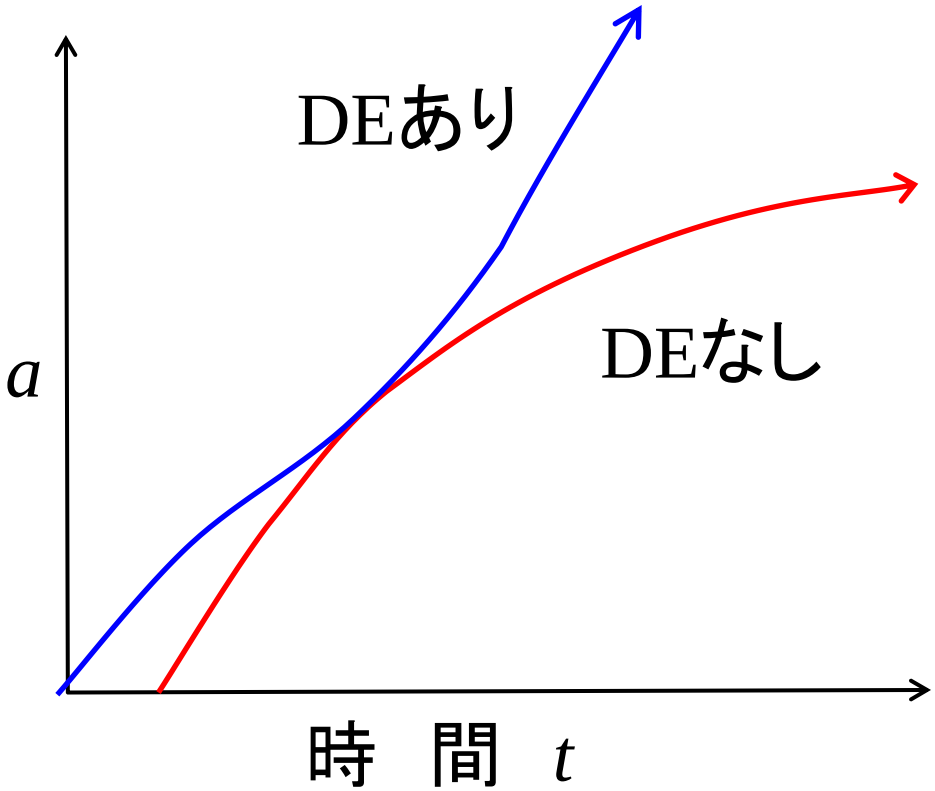
これらの他に、
宇宙には、「暗黒エネルギー（Dark Energy）」と呼ばれる、空間に一様にべったりと詰まったなぞのエネルギーが存在していると考えられています。

→　引力ではなく、反発しあう力を及ぼします。

→　宇宙の膨張を「加速」させます。

・暗黒エネルギー（DE）の宇宙膨張への影響





・DEなし

→　膨張は減速する

・密度一定のDEあり

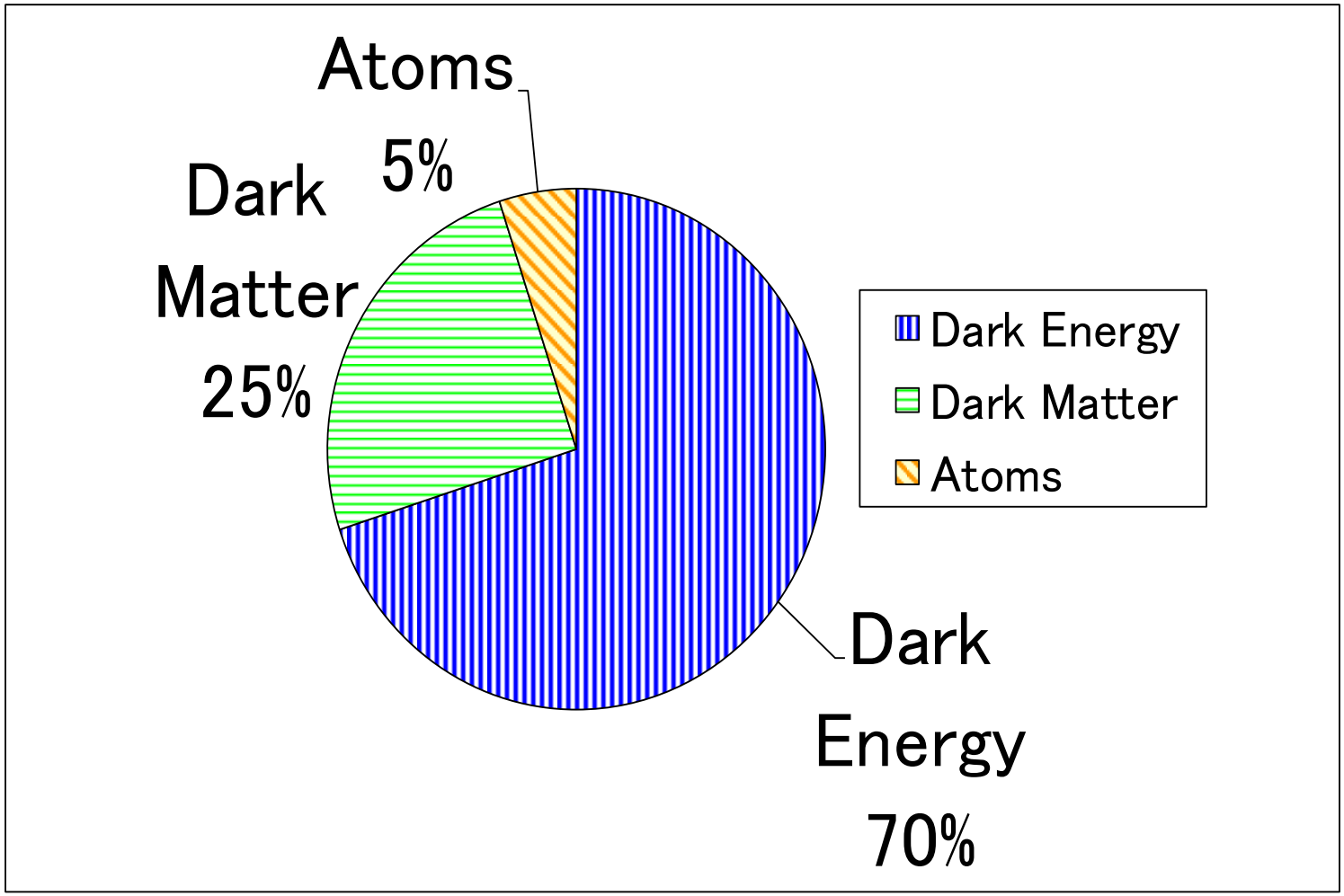
→　初めは、膨張は減速

→　後に、膨張は加速

DM：引力　⇔　DE：斥力

・宇宙のエネルギー組成（内訳）

物質の質量密度を、エネルギー密度に換算して表示



暗黒エネルギーと暗黒物質で95%以上

・宇宙に存在するエネルギーの量

＊宇宙の膨張のパターンを左右する

＊空間の曲率（曲がり具合）を決める

・この宇宙に存在するエネルギーの大半は、
「光り輝く物質」ではなくて、
「暗黒エネルギー」と「暗黒物質」

→「暗黒面が宇宙の運命と構造と形を
決定している」

宇宙は暗黒面が支配している

４．暗黒宇宙で生まれる銀河

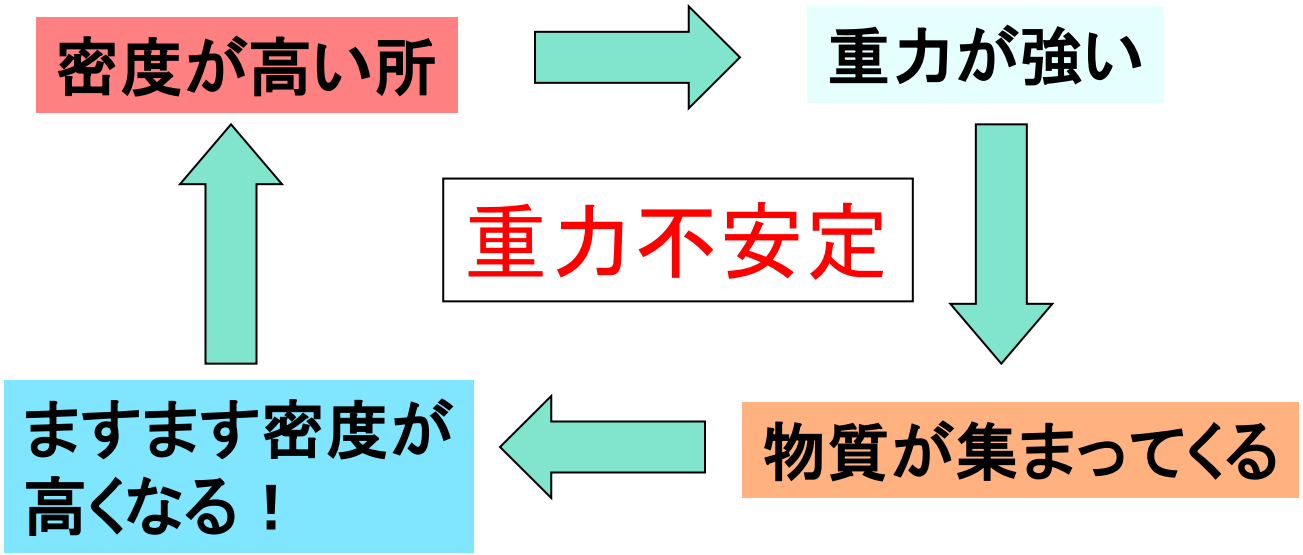
宇宙の構造形成は暗黒物質が主導で行われてきたと考えられています。

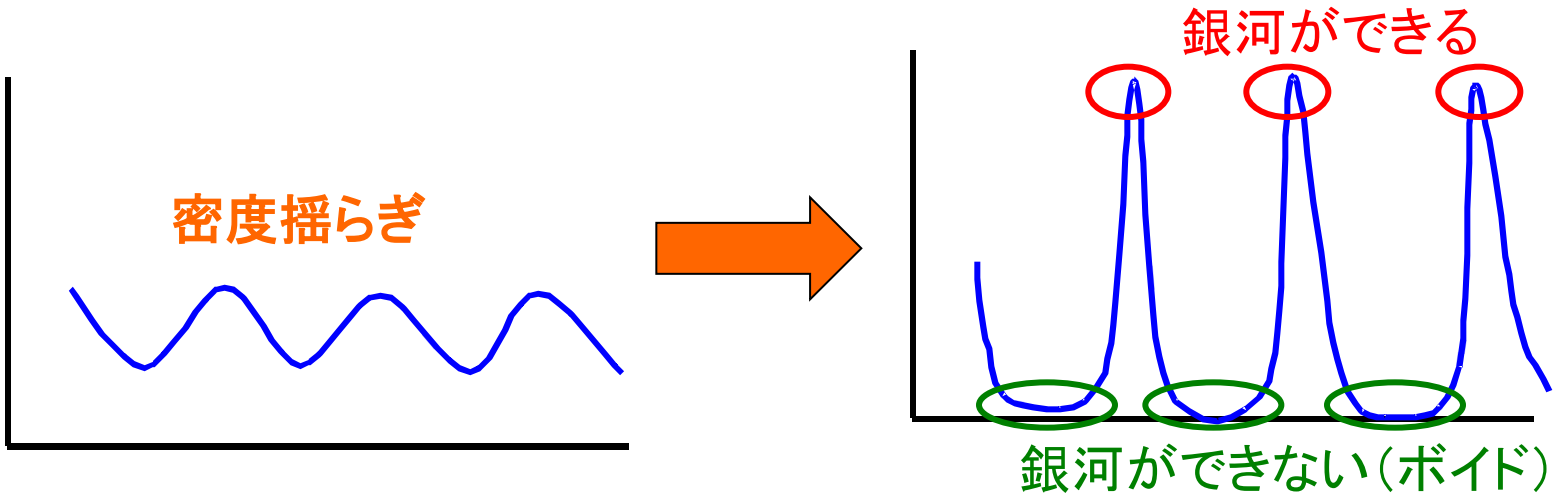
暗黒物質が重力で集まった塊である「ダークハロー（dark halo）」が作られ、その中心部に星や星間ガスとなる普通の物質が集まり、銀河が生まれた、と考えられています。

銀河の形成も暗黒面が支配している

重力不安定による銀河の形成

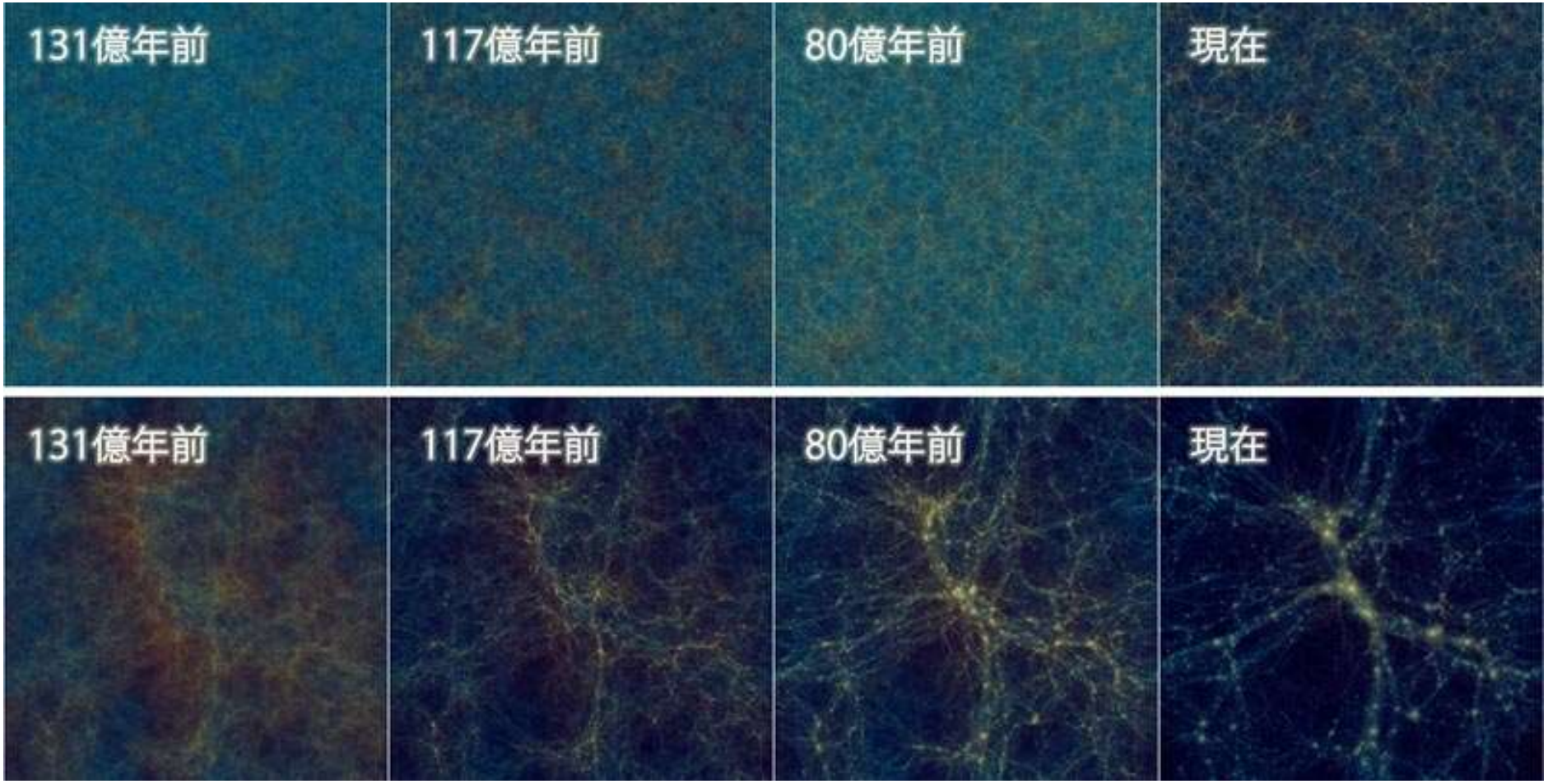
宇宙初期に形成された密度の濃淡（ゆらぎ）が重力により成長し、銀河が形成されていく。





スーパーコンピュータが計算した暗黒物質の成長

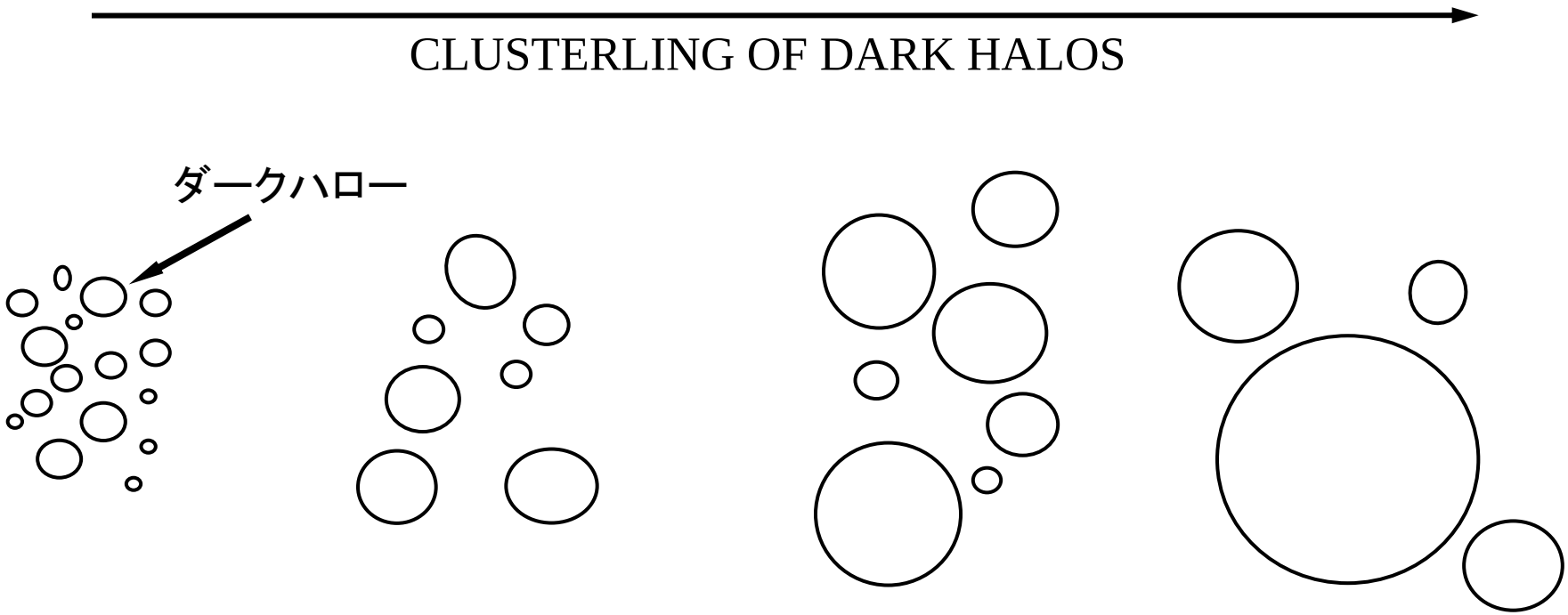
石山智明(千葉大学)、榎基宏(東京経済大学)、小林正和(愛媛大学)、
真喜屋龍(東京大学)、長島雅裕、大木平(文教大学)の研究



Ishiyama et al. (2015)
http://www.cfca.nao.ac.jp/en/pr/20150501

ボトムアップ構造形成

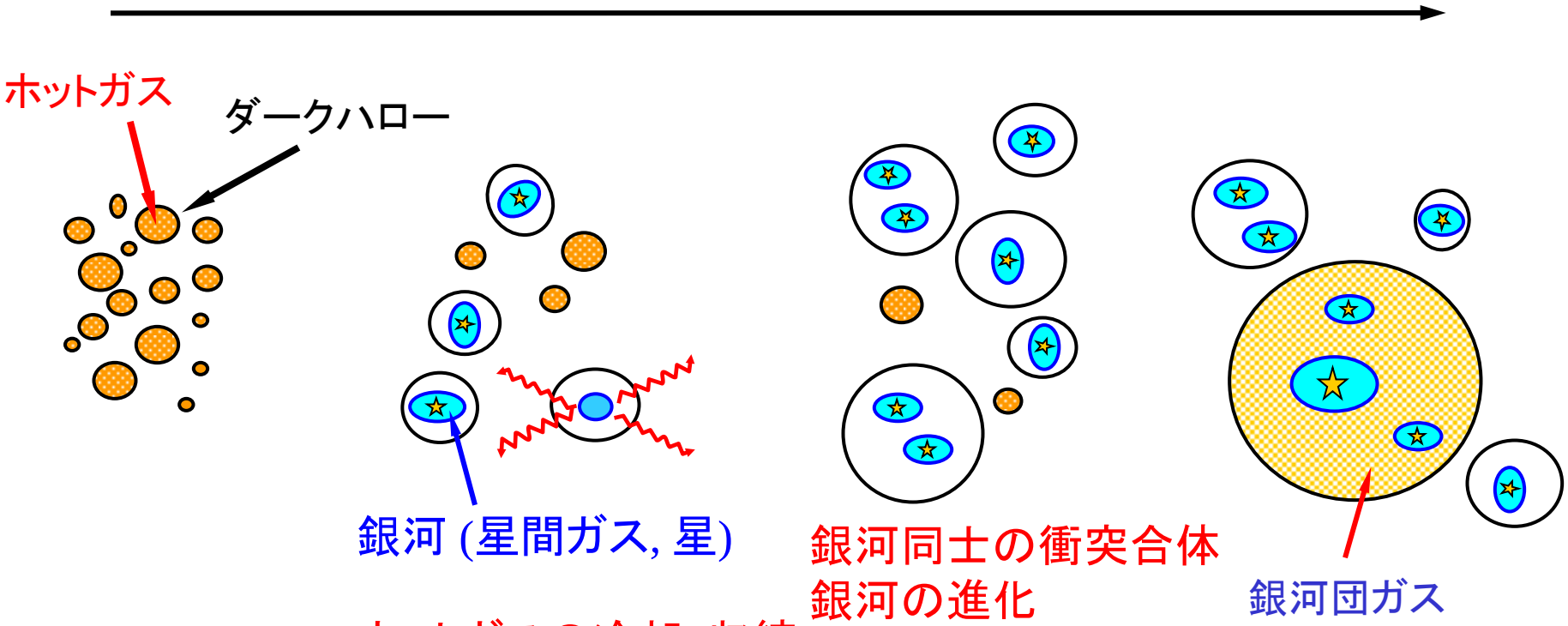
小スケールから大スケールへ



・暗黒物質が重力で集まって、ダークハローが形成される。
・ダークハローは衝突合体を繰り返し成長していく。
・ダークハローの形や大きさは、暗黒物質の性質を反映

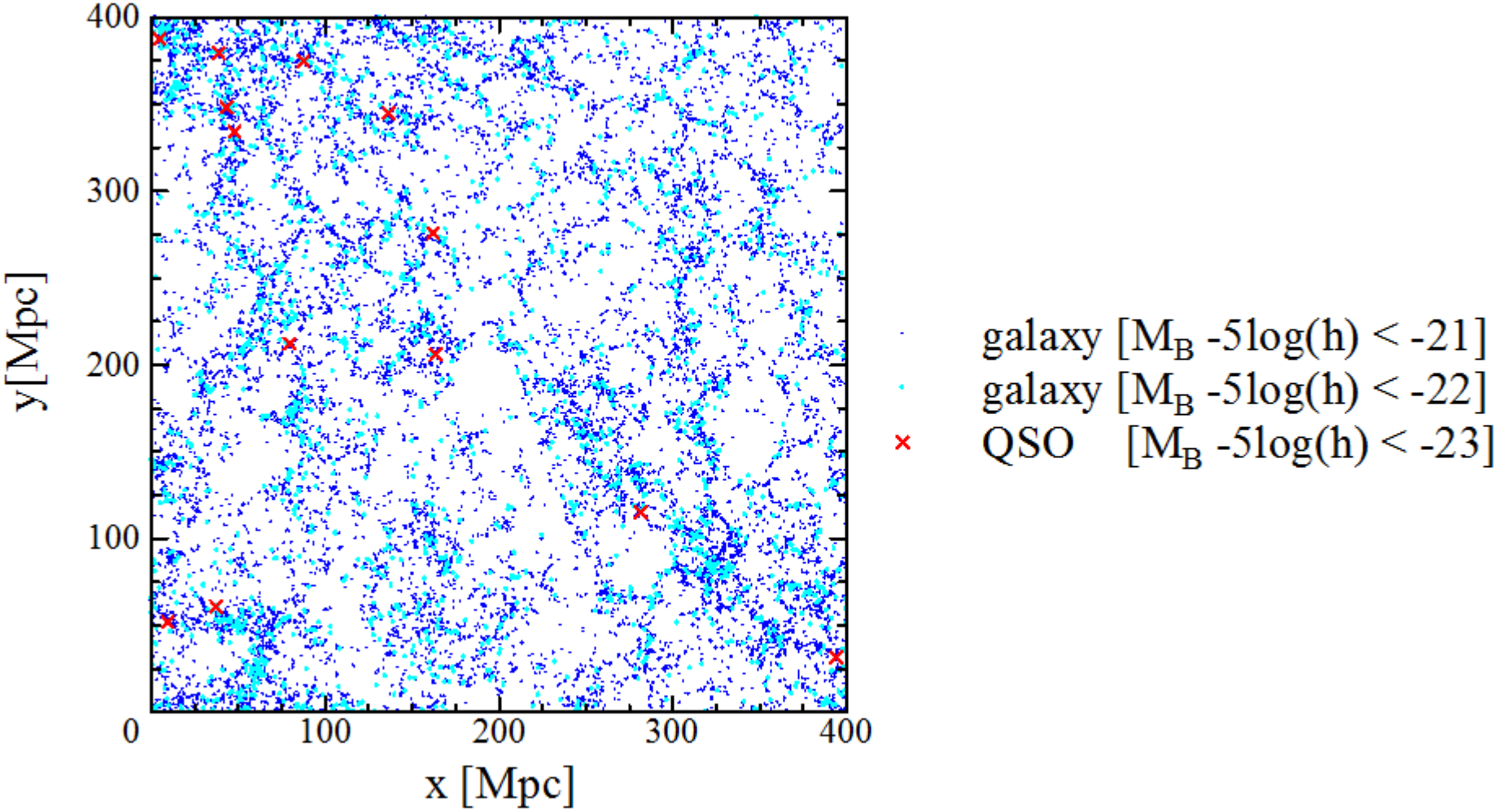
ボトムアップ銀河形成のシナリオ

普通の光る物質（バリオン）のガスはダークハローの中心に集まり、銀河として成長していきます。



ホットガスの冷却・収縮
→ 星間ガスの形成
→ 星形成
→ 超新星爆発による
星間ガスの加熱

銀河団の形成

銀河形成モデルの計算例

榎（東経大）、石山（千葉大）、小林（愛媛大）、長島（文教大）の計算