

宇宙の

“ダーク”な話

高橋龍一（弘前大学・理工）

★ 話の概要:

近年の天文学・宇宙物理学の観測から、
宇宙の約96%は“ダーク”な成分で構成
されていることがわかってきた

本講演ではその“ダーク”な成分について
最先端の話題を紹介する

★ 話の概要:

前半:天文学&宇宙物理学の基礎

後半:宇宙の“ダーク”な話

★ 宇宙での距離の単位:「光年」

光の速さは秒速30万キロメートル

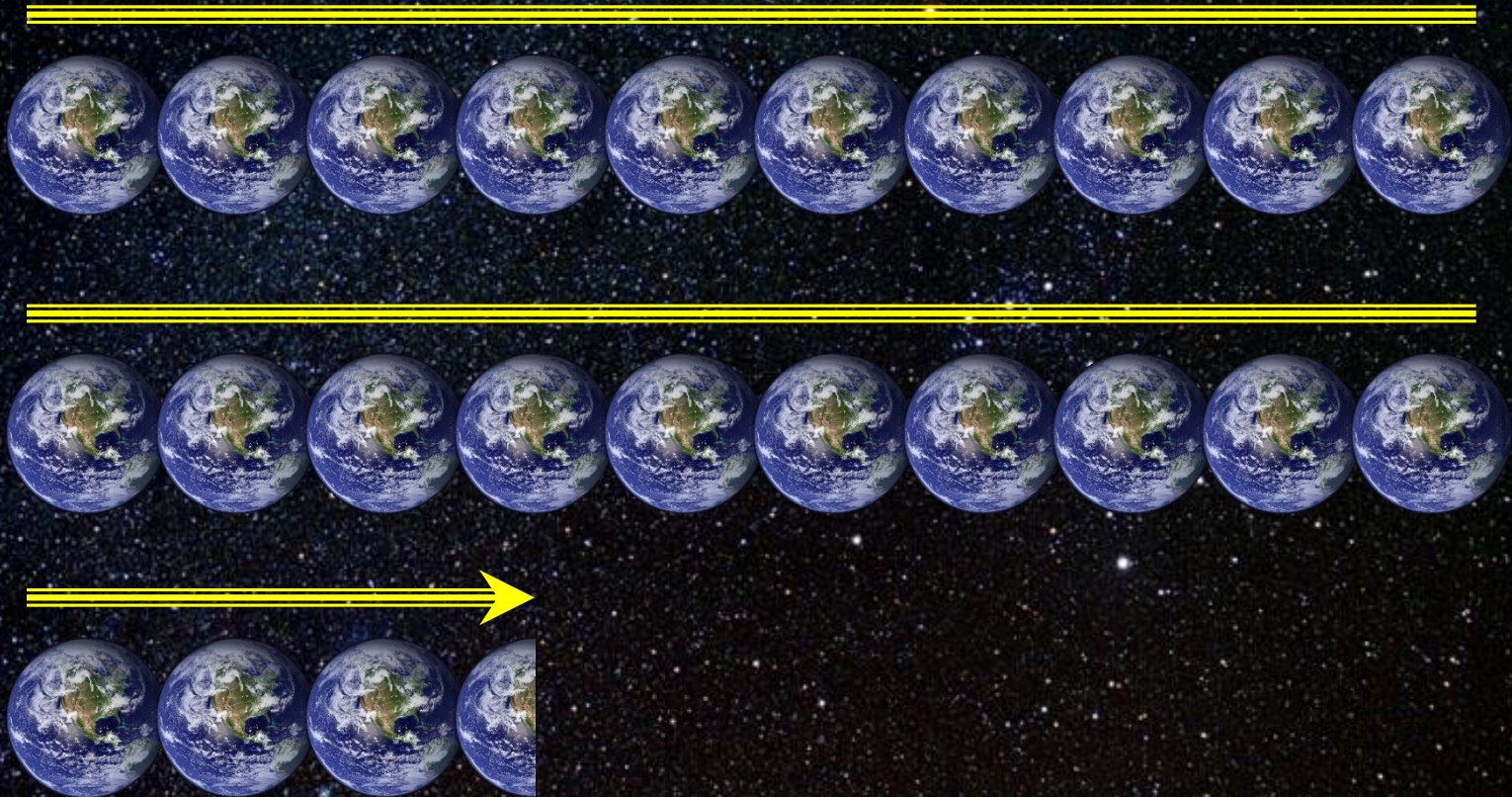
1秒間で地球を7周半



★ 宇宙での距離の単位:「光年」

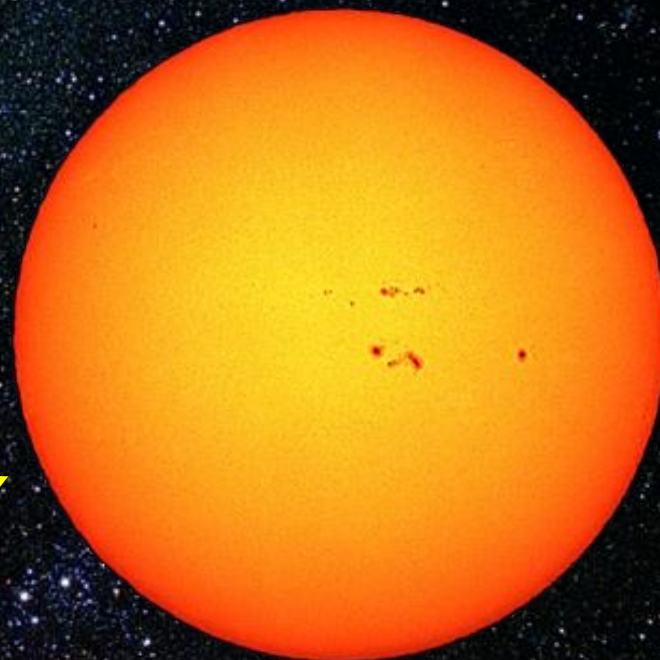
光の速さは秒速30万キロメートル

1秒間で地球を23.5個分を通過



★ 宇宙での距離の単位:「光年」

光の速さなら
太陽まで約8分



★ 宇宙での距離の単位:「光年」

宇宙はあまりに広大なため、光の速さを基準にした距離で測ります

光の速さは秒速30万キロメートル

光年: 光が1年(=3千万秒)かけて進む距離

1光年=9兆4600億キロメートル

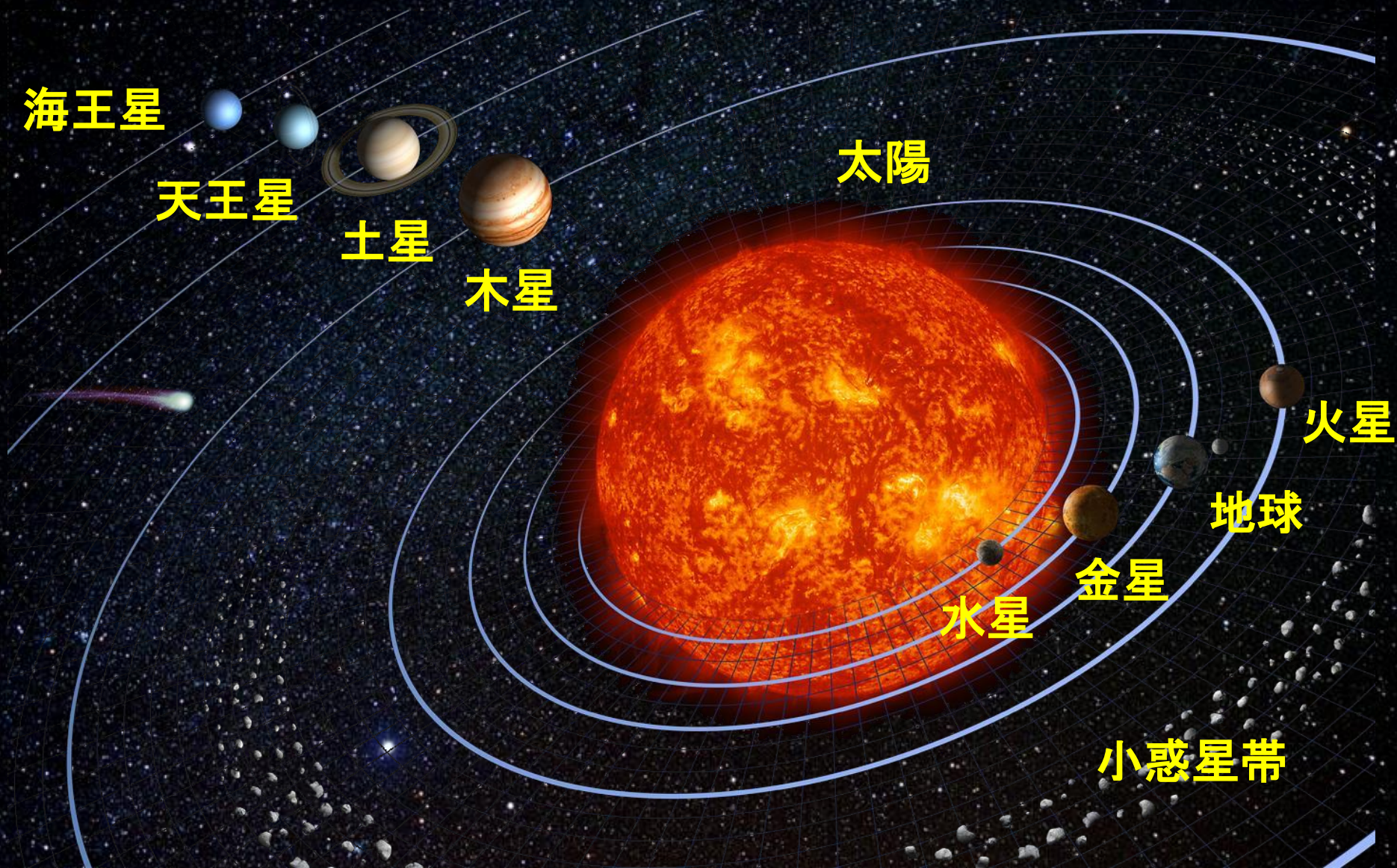
★ 宇宙での距離の単位:「光年」

宇宙では「遠く」を見ることは「過去」を知ること

「1光年先」の星を見ることは
「1年前」の星を知ること

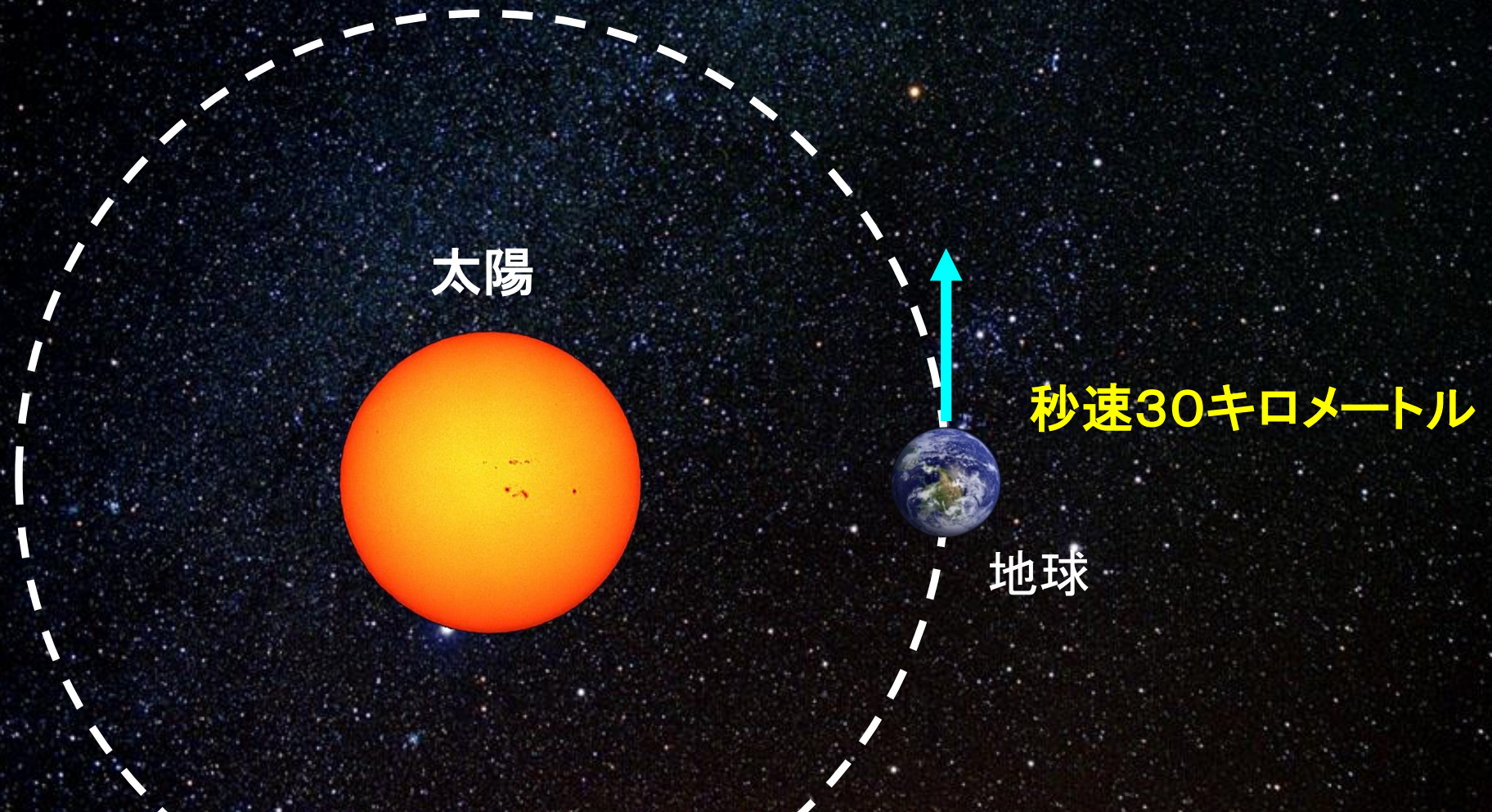


★ 地球は太陽系の一員



★ 地球は太陽系の一員

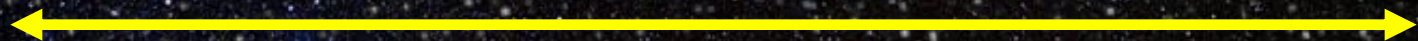
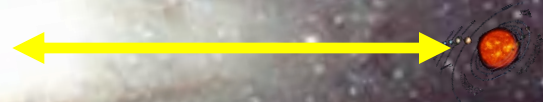
地球を含む太陽系の惑星は太陽の周りを
公転運動している



★ 太陽系は銀河系の一員

太陽系は銀河系(又は天の川銀河)と呼ばれる、
円盤状の星の集団に所属している

太陽系は銀河系中心から
約3万光年の所にいる

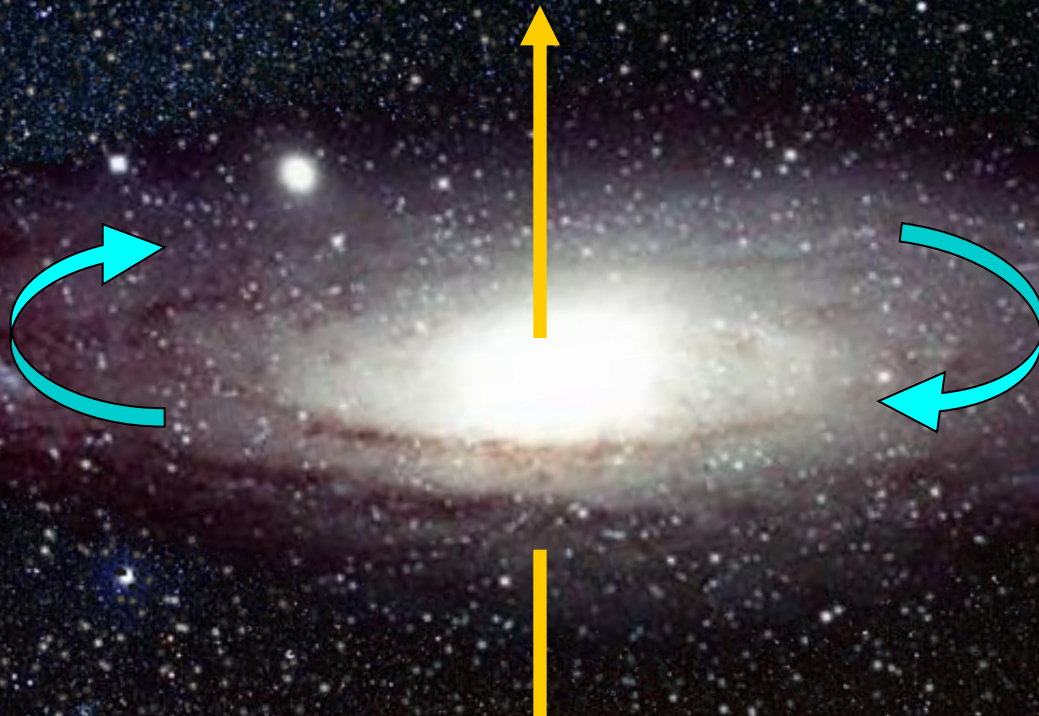


直径約10万光年

★ 太陽系は銀河系の一員

銀河系には約2千億個の星がある

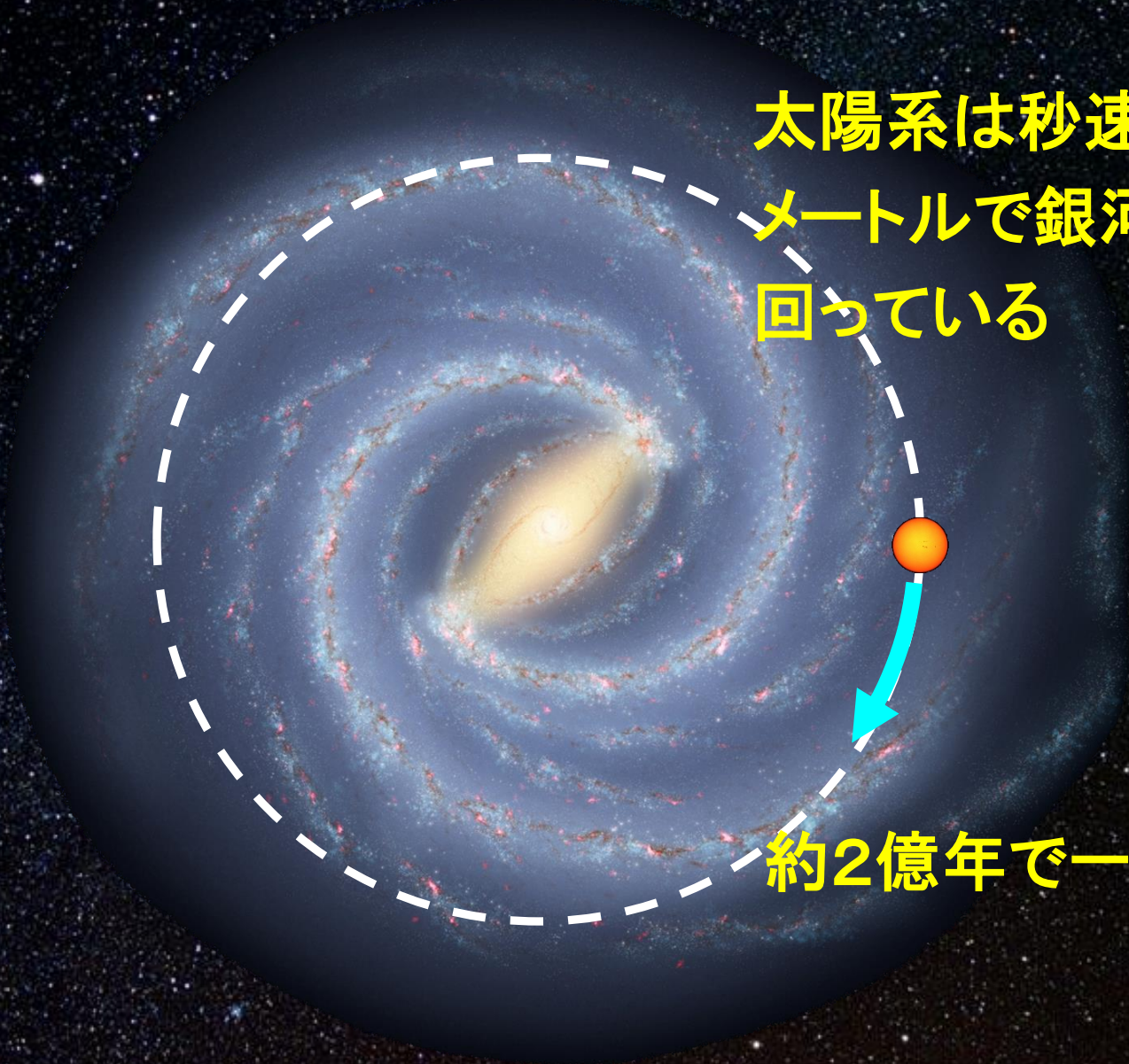
円盤状に分布した星が銀河系中心を軸として、
公転運動している



★ 太陽系は銀河系の一員

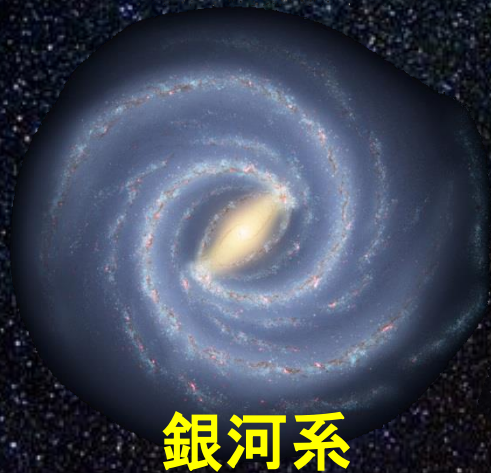
太陽系は秒速220キロ
メートルで銀河系を
回っている

約2億年で一周



★ 銀河系の隣人：アンドロメダ銀河とマゼラン星雲

大マゼラン星雲
(距離16万光年)



銀河系

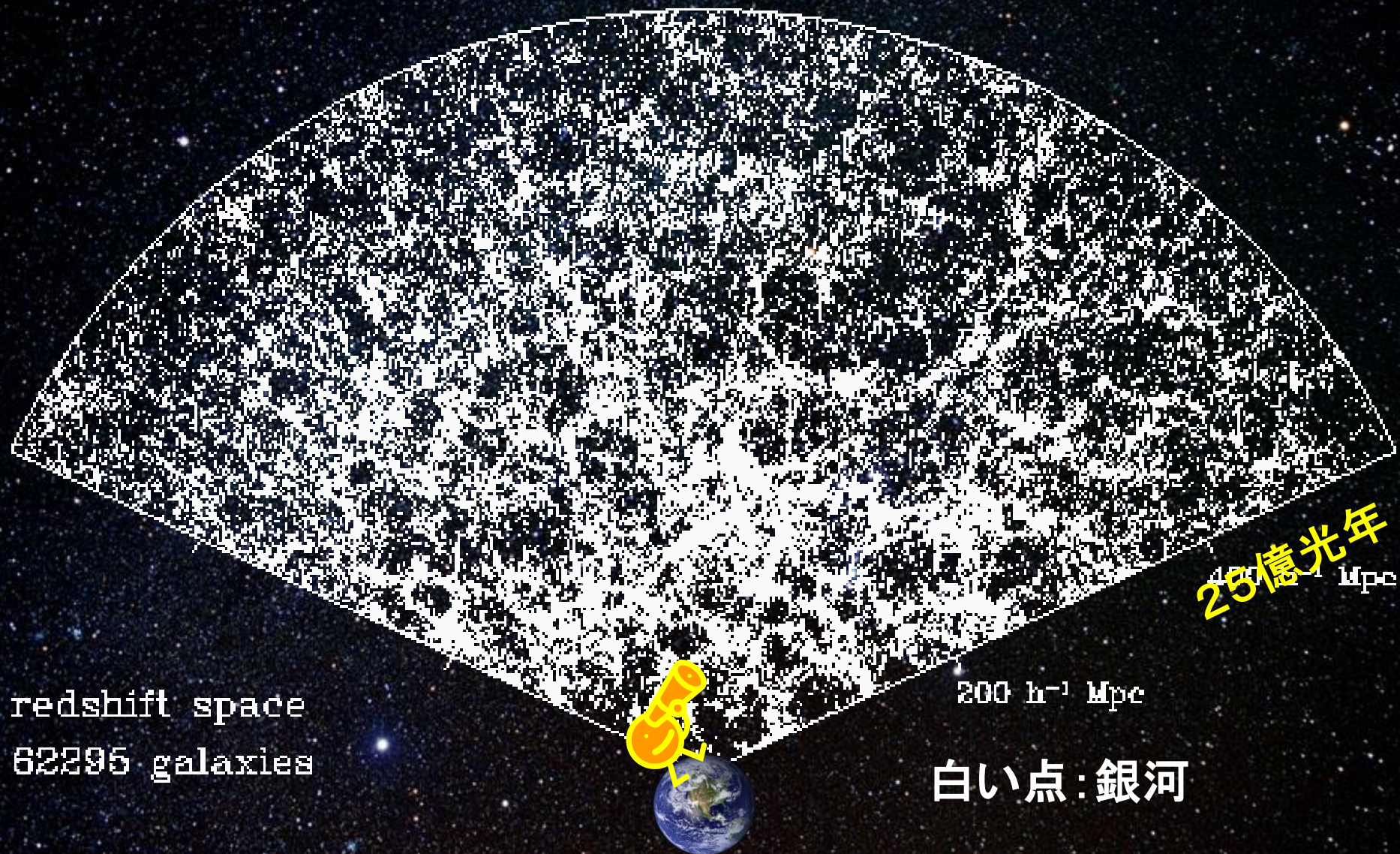
アンドロメダ銀河
(距離230万光年)



小マゼラン星雲
(距離20万光年)



★ 銀河系も無数の銀河のひとつ



★ 銀河系も無数の銀河のひとつ

(我々から見える)

宇宙の全銀河数は約1000億個

銀河系はそのうちのひとつ

我々の住む銀河を特別に
「銀河系」や「天の川銀河」と呼ぶ

redshift space
62296 galaxies



$200 h^{-1} \text{ Mpc}$

白い点: 銀河

25億光年
Mpc

★ なぜ「天の川」と呼ばれるか

円盤方向を見たときに星が帯状に集まって見えるため



星が密集している

星が全然ない

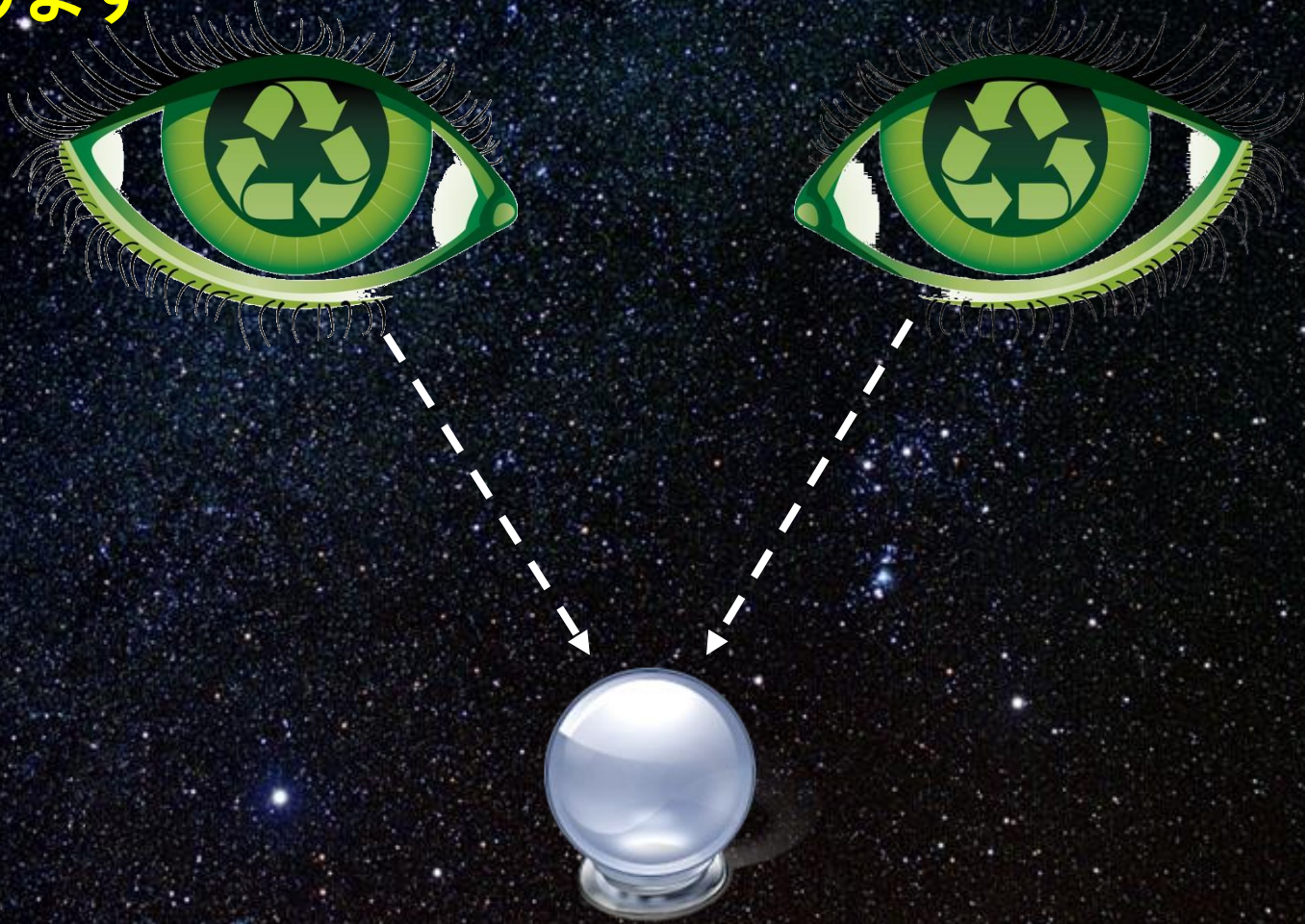
★ なぜ「天の川」と呼ばれるか

円盤方向を見たときに星が帯状に集まって見えるため



★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

人間は左右の目で見えて、その見え方の違いから距離を測ります



★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

地球の太陽の回りの公転運動を利用し、同じ天体を離れた2箇所で見測し、距離を測ります

(年周視差)



★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

地球の太陽の回りの公転運動を利用し、同じ天体を
離れた2箇所で見測し、距離を測ります
(年周視差)

ただ、この方法だと比較的近く(数千光年)の星まで
しか測れません

★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

もう少し遠く of 天体までの距離は、
「本当の明るさ」がわかっている天体を観測して、
「見かけの明るさ」から距離を決める



近い星：
明るく見える



遠い星：
暗く見える

★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

もう少し遠く of 天体までの距離は、
「本当の明るさ」がわかっている天体を観測して、
「見かけの明るさ」から距離を決める



距離が2倍 $\Rightarrow$ 見かけの明るさ4分の1

★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

「本当の明るさ」がわかっている天体

セファイド変光星：

周期的に明るくなったり暗くなったりする星

周期が長いほど、明るさが明るい星

明るさの変動周期から、「本当の明るさ」がわかる

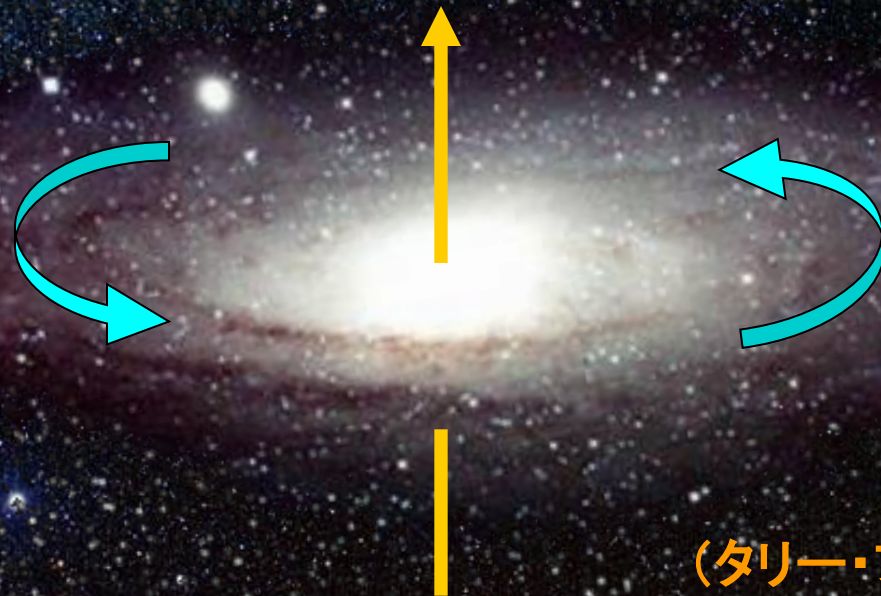
数千万光年先までの星の距離を測れる

★ 星や銀河までの距離はどうやって測るの？

「本当の明るさ」がわかっている天体

円盤銀河：

円盤の回転速度が速い方が明るい

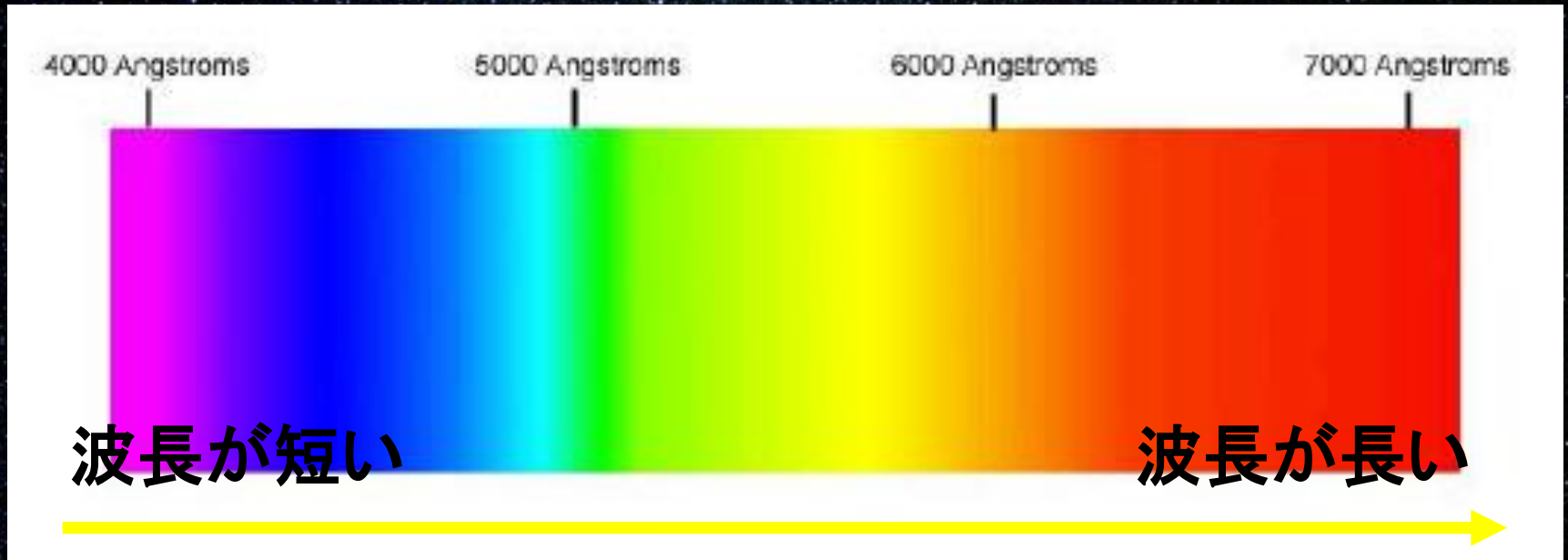


(タリー・フィッシャー関係)

★ 銀河の速度の測り方

(銀河の)光のスペクトル

光を様々な色(波長)の成分にわけたもの



波長

単位は1億分の
1センチメートル

★ 銀河の速度の測り方

光の「ドップラー効果」を用いる

波長が伸びて、赤い方にずれる
(赤方偏移)

遠ざかる銀河



波長が縮んで、青い方にずれる
(青方偏移)

近づいてくる銀河



★ 銀河の速度の測り方

光の「ドップラー効果」を用いる

星や銀河を構成する元素により吸収・放出された光の波長を
スペクトルから詳細に調べる

(地上で知られている)標準的なスペクトルと比較し、波長が
どれだけずれたか調べる



銀河



★ 銀河の速度の測り方

音の「ドップラー効果」の例：救急車のサイレンの音

近づいてくる救急車はサイレンの音が高く聞こえる

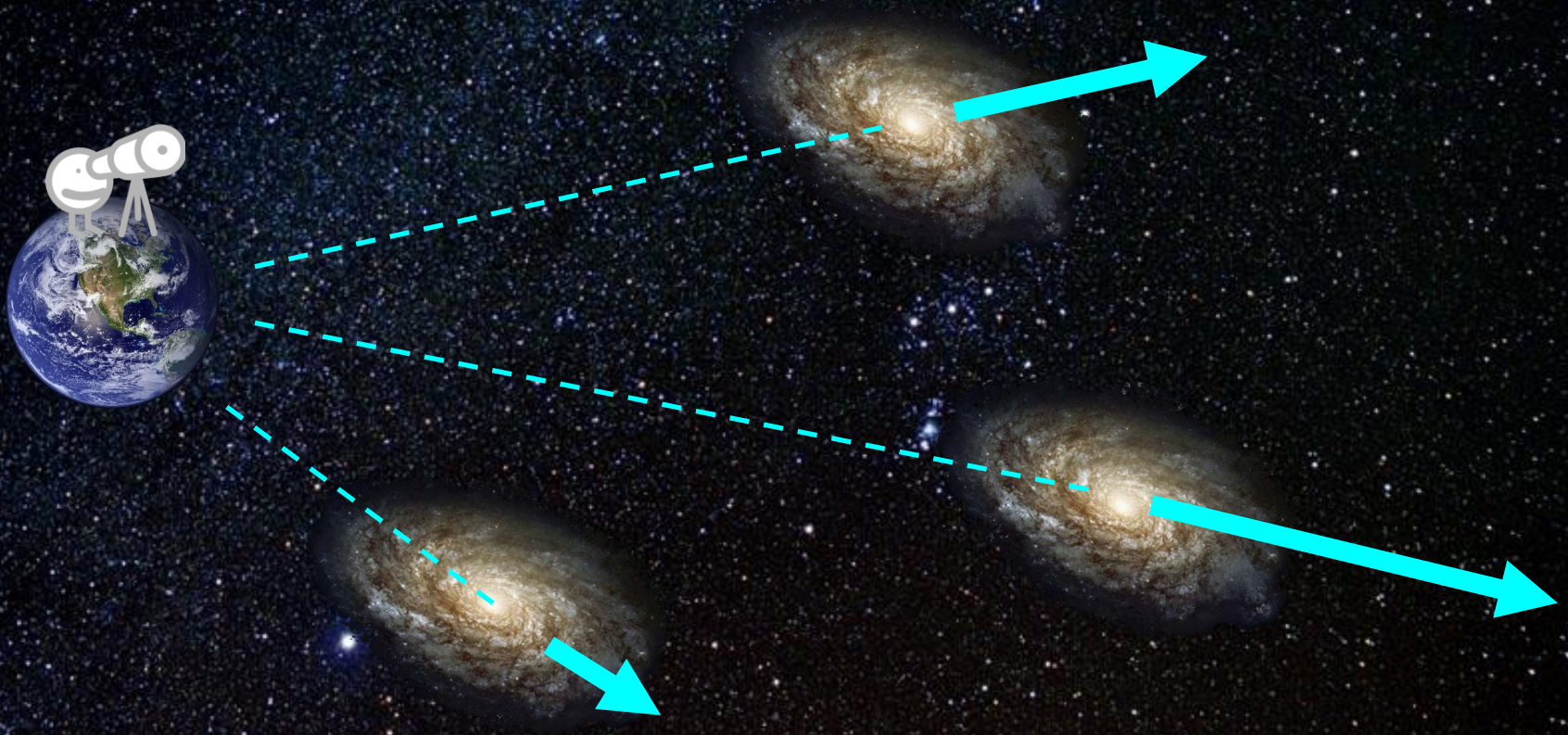


遠ざかる救急車はサイレンの音が低く聞こえる



★ 膨張する宇宙

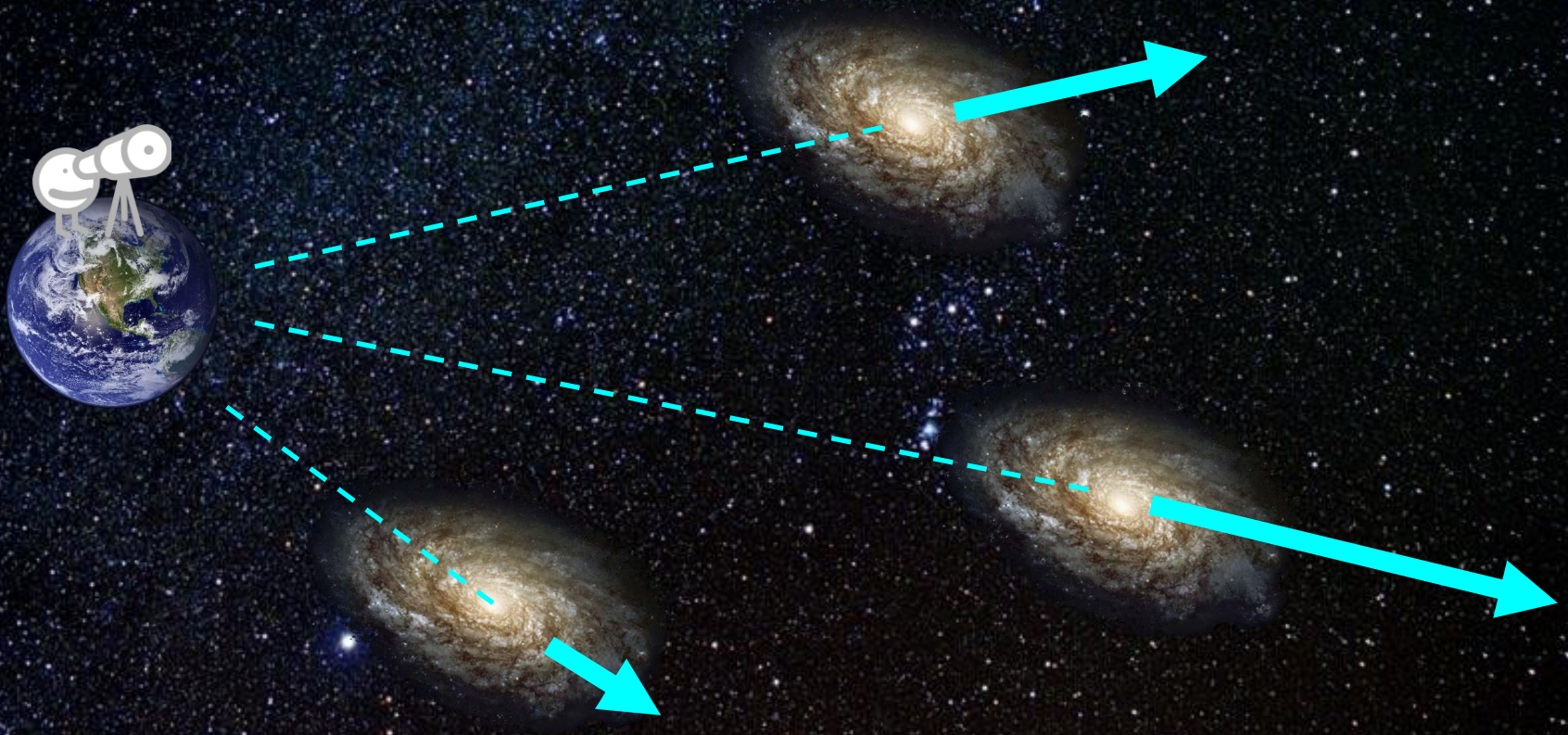
銀河までの距離 & 速度を測ってみると...



★ 膨張する宇宙

銀河までの距離 & 速度を測ってみると...

➡ 遠方の銀河は我々から遠ざかっている

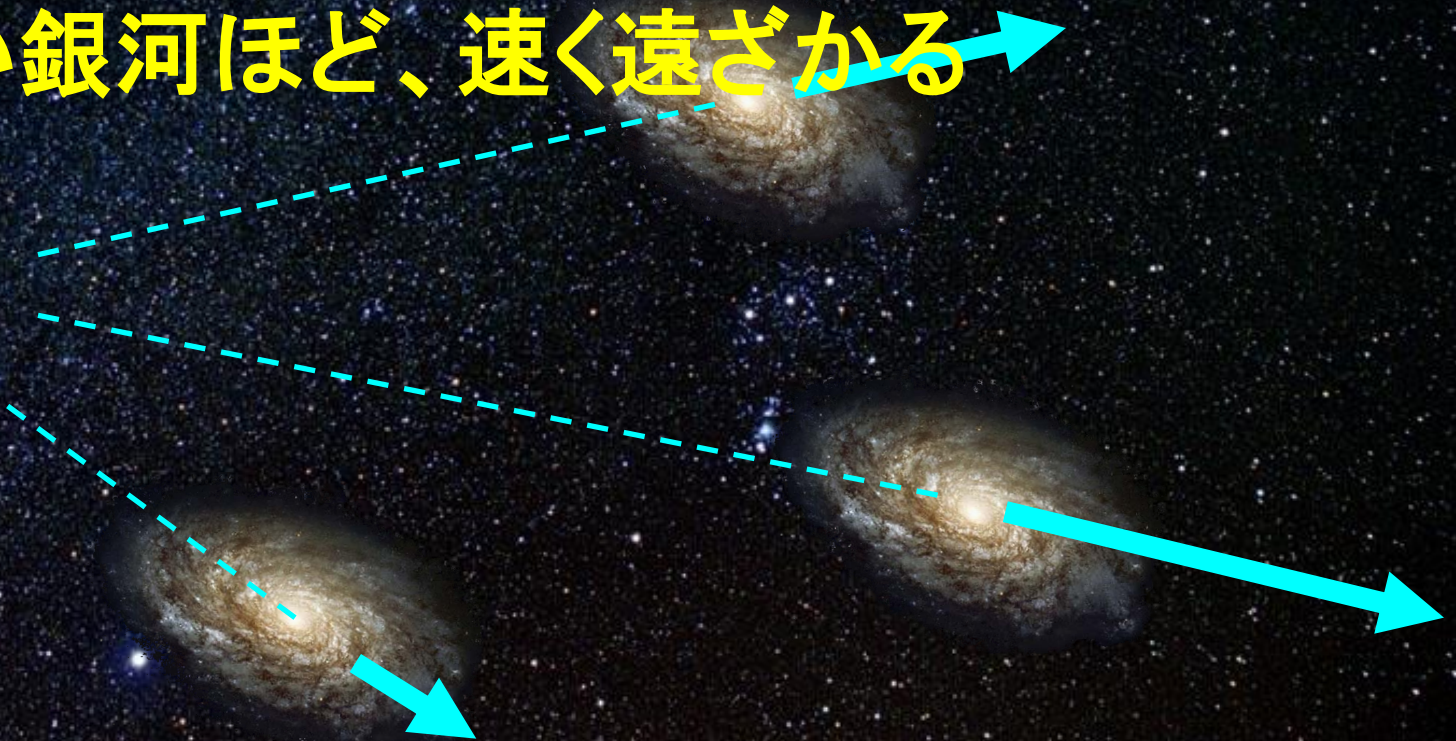


★ 膨張する宇宙

銀河までの距離 & 速度を測ってみると...

➡ 遠方の銀河は我々から遠ざかっている

➡ 遠い銀河ほど、速く遠ざかる



★ 膨張する宇宙

遠い銀河ほど、速く遠ざかる



銀河までの距離

遠ざかる速さ



比例

銀河までの距離 $\propto$ 遠ざかる速さ

(ハッブルの法則 1920年代)

★ 膨張する宇宙



➡ 周りの銀河がどんどん遠ざかる

★ 膨張する宇宙



➡ どんどん密度が低くなる

宇宙膨張 よくある質問

Q1. 宇宙が膨張したら、人間の体や地球、太陽も膨張するんですか？

A1. 膨張しません

地球や太陽は重力で固まっています。また人体は多数の原子が電氣的な力でくっついていています。このように何らかの力で強く結びついている場合、膨張しません。
同じく、銀河自体の大きさも膨張しません。

宇宙膨張 よくある質問

Q2. 銀河が光より速く遠ざかることは問題になりませんか？

A2. なりません

宇宙膨張は空間自体の膨張で、銀河がある“速さ”をもって遠ざかっているわけではありません。

銀河は空間の中で静止しているのですが、空間自体が膨張しています。

★ ビッグバン

時間が経つと宇宙はどんどん膨張していく



時間が経つと...

互いに離れ離れになり、
密度が下がる

★ ビッグバン

逆に時間をさかのぼると宇宙はどんどん収縮していき、
やがて一点に集まる



ビッグバン

密度 & 温度 無限大



ビッグバン
(イメージ)



時間をさかのぼると...

★ ビッグバン

逆に時間をさかのぼると宇宙はどんどん収縮していき、
やがて一点に集まる



ビッグバン

密度 & 温度 無限大

最新の研究から、ビッグバンは137億年前に
起こったと考えられています
つまり、宇宙の年齢は137億歳です



★ 宇宙の果て

現在、宇宙に果てではなく無限に広がっていると
考えられている

そのため銀河も無限個存在する

★ 宇宙の果て

宇宙が出来て137億年しか経っていないので、
137億光年先までしか知ることが出来ない



137億光年

宇宙は無限だが、我々が観測できるのは有限

★ 宇宙の果て

(17世紀からの問題)

「夜はなぜ暗いのか」 (オルバースのパラドックス)

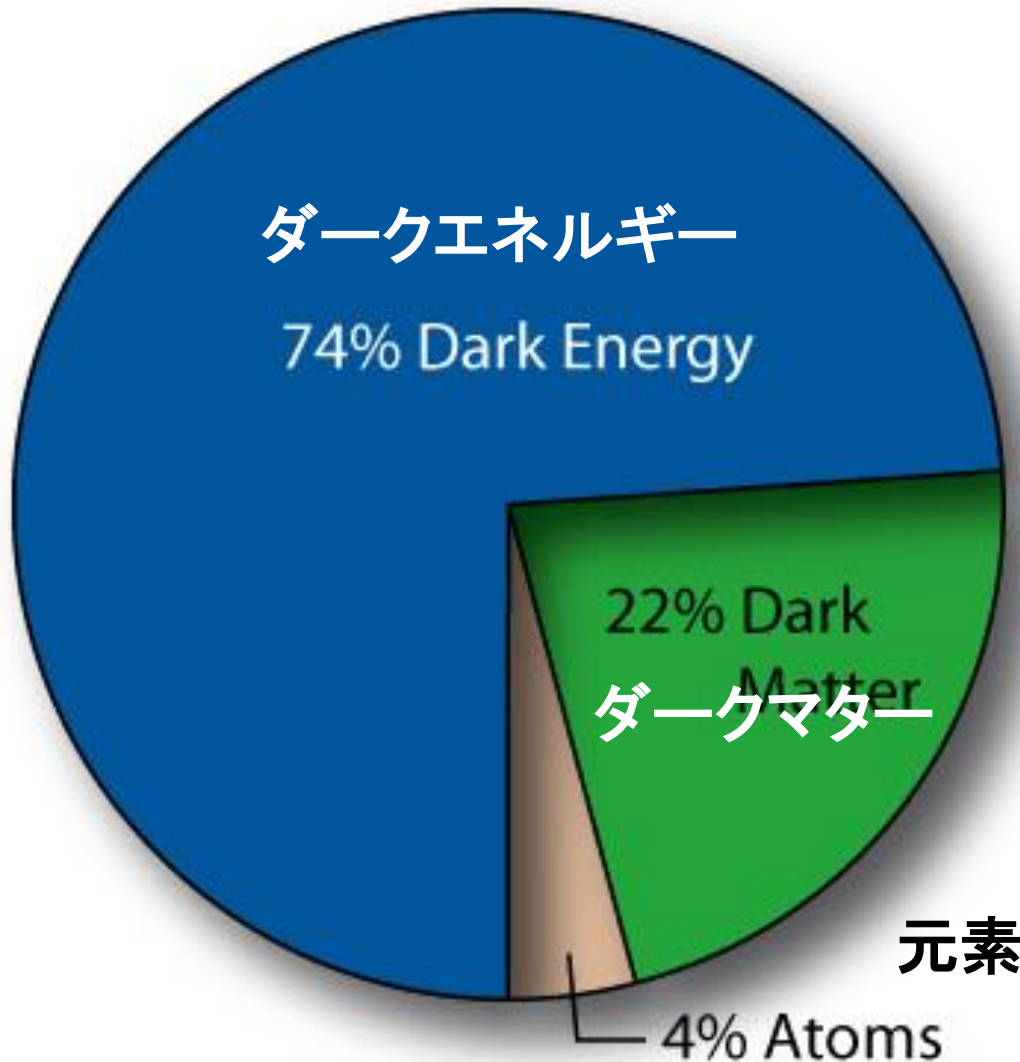
宇宙が無限で星や銀河も無限個あれば、
夜空も明るいはず

(現在の回答)

見える範囲で宇宙は有限なため

小休止

★ 宇宙は何から出来ているか？



最新の観測から
宇宙の96%は
“ダーク”な成分
で出来ている

★ 宇宙は何から出来ているか？

夜空を眺めた時に見える星の光は、宇宙全体の4%の元素から作られた部分のみ

残りの96%は眼で見ることとは出来ません！

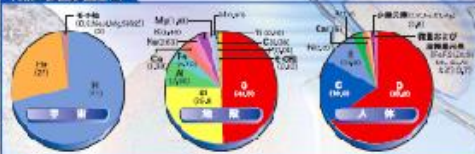
★ 元素

元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている

元素の存在比 (重量%)



メンデレーエフ (Dmitri Mendeleev) 1834 - 1907
1869年、ロシアペテルスブルグ大学の教授メンデレーエフは、当時知られていた63種類の元素を(1)原子量の順に並び、(2)性質の類似と相違による周期的な変化をみた、周期表の原形を完成させた。この表は、元素の性質を系統的に整理し、(1)未知の元素の存在を予測し、(2)発見された元素の性質を説明する上で、極めて重要な役割を果たした。この表は、現代の化学の基礎となっており、元素記号で書かれている。



1 H Hydrogen	2 He Helium	3 Li Lithium	4 Be Beryllium	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon	11 Na Sodium	12 Mg Magnesium	13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon	55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon	87-103 Actinides	104 La Lanthanum	105 Ce Cerium	106 Pr Praseodymium	107 Nd Neodymium	108 Pm Promethium	109 Sm Samarium	110 Eu Europium	111 Gd Gadolinium	112 Tb Terbium	113 Dy Dysprosium	114 Ho Holmium	115 Er Erbium	116 Tm Thulium	117 Yb Ytterbium	118 Lu Lutetium	119 Ac Actinium	120 Th Thorium	121 Pa Protactinium	122 U Uranium	123 Np Neptunium	124 Pu Plutonium	125 Am Americium	126 Cm Curium	127 Bk Berkelium	128 Cf Californium	129 Es Einsteinium	130 Fm Fermium	131 Md Mendelevium	132 No Nobelium	133 Lr Lawrencium
--------------------	-------------------	--------------------	----------------------	-----------------	------------------	--------------------	------------------	--------------------	------------------	--------------------	-----------------------	----------------------	---------------------	-----------------------	-------------------	----------------------	-------------------	----------------------	---------------------	----------------------	----------------------	---------------------	----------------------	-----------------------	------------------	--------------------	--------------------	--------------------	------------------	---------------------	-----------------------	---------------------	----------------------	---------------------	---------------------	----------------------	-----------------------	--------------------	-----------------------	---------------------	------------------------	------------------------	-----------------------	---------------------	-----------------------	--------------------	---------------------	--------------------	-----------------	----------------------	-----------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	----------------------	---------------------	----------------------	---------------------	---------------------	--------------------	---------------------	----------------------	------------------	---------------------	----------------------	------------------	---------------------	----------------------	----------------------	-------------------	---------------------	------------------------	---------------------	---------------------------	------------------------	-------------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------	----------------------	-------------------------	----------------------	---------------------	----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	---------------------------	---------------------	------------------------	------------------------	------------------------	---------------------	------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------------	--------------------------	-----------------------	-------------------------

★ 元素

宇宙の元素のほとんどは水素 & ヘリウム

水素 75% ヘリウム 24%

「ダークマター」や「ダークエネルギー」は元素の
周期表に載っていない、知られていない物質

★ ダークマター(暗黒物質)ってなに

宇宙で2番目に多い未知の物質

(普通の)元素の5倍存在

“ダーク”なので、眼で見ることには出来ません
光を反射、吸収、散乱することはありません

★ ダークマターってなに

ダークマターの存在は1930年代から知られていました



かみのけ座銀河団
(千個以上の銀河の集まり)

天文学者が銀河団内の
銀河の速度を調べた

銀河団：
銀河が集まったもの

★ ダークマターってなに

ダークマターの存在は1930年代から知られていました



銀河がすごい速さで動いている



強い重力で互いにくっつけないと、
銀河が飛び出す



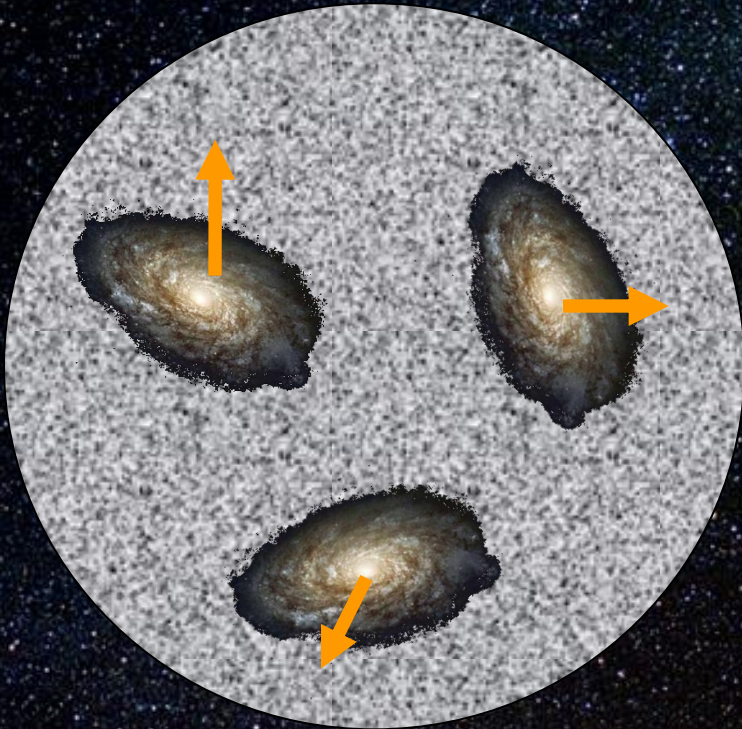
目に見えない重力源があるはず



“ダークマター”と呼ばれる

★ ダークマターってなに

ダークマターの存在は1930年代から知られていました



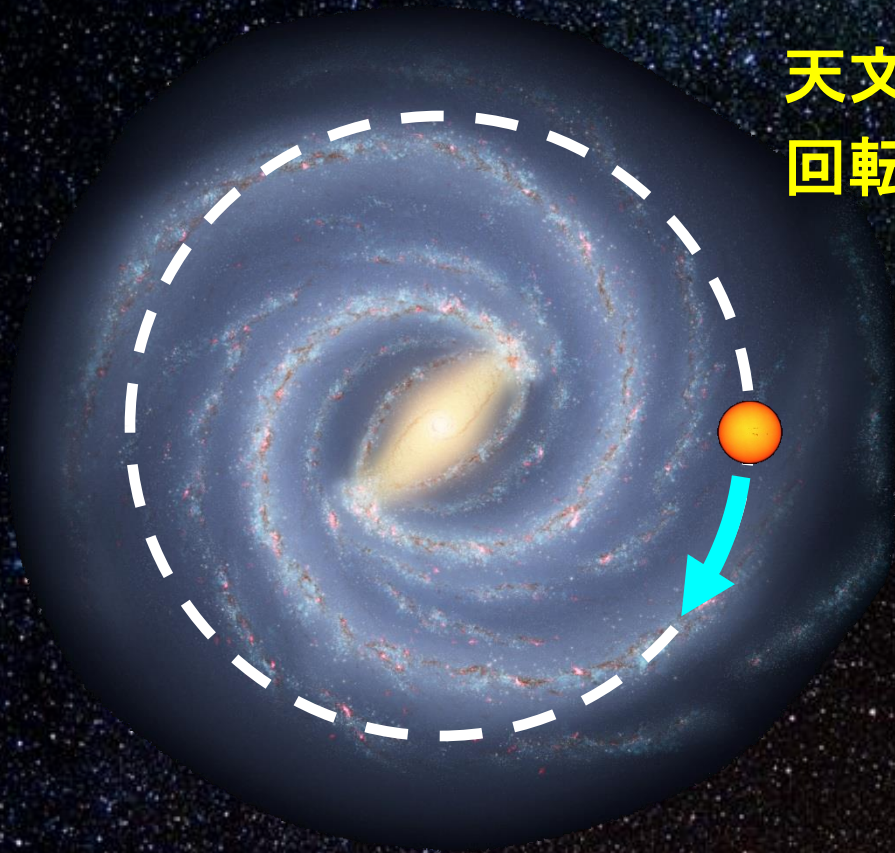
ダークマターの重力で
互いの銀河をくっつけている

ダークマター分布のイメージ

★ ダークマターってなに

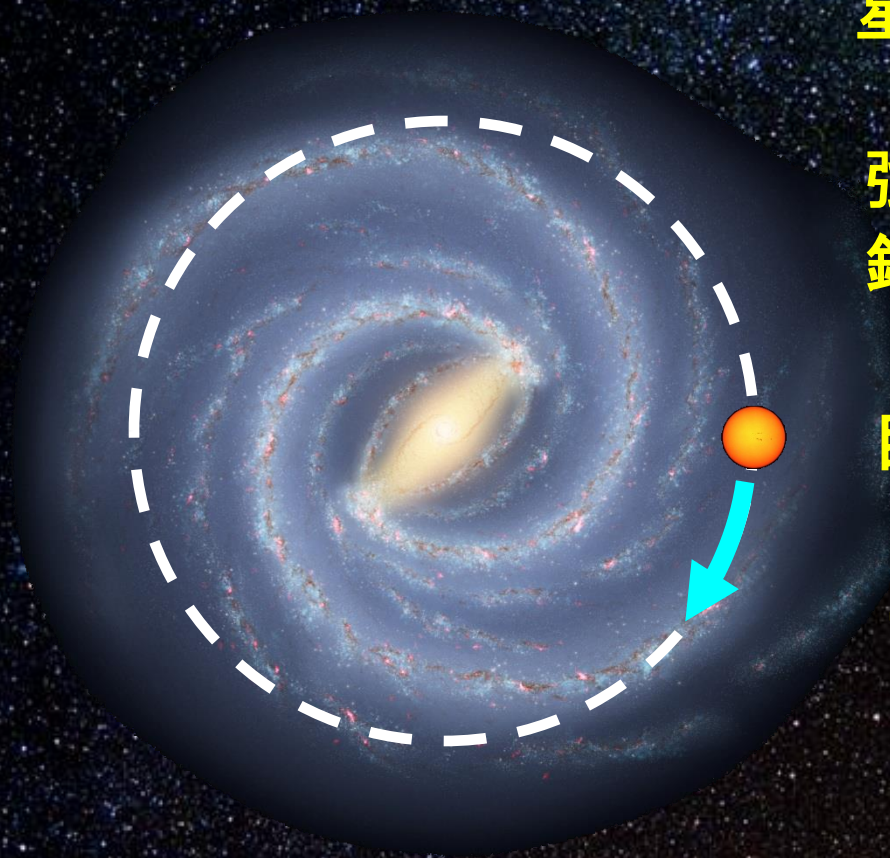
ダークマターは銀河にも存在することが1970年代から知られていました

天文学者が銀河内を回る星やガスの
回転速度を測りました



★ ダークマターってなに

ダークマターは銀河にも存在することが1970年代から知られていました



星やガスがすごい速さで回っている



強い重力で互いにくっつけないと、
銀河から飛び出す



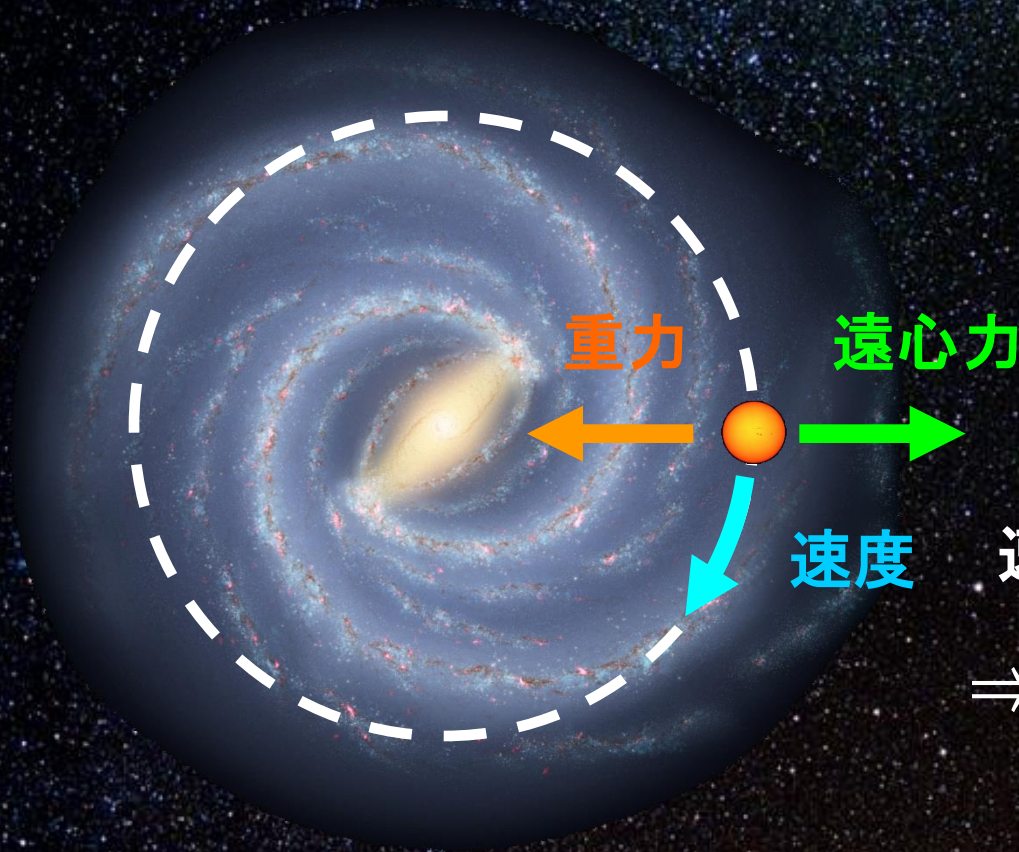
目に見えない重力源があるはず



“ダークマター”と呼ばれる

★ ダークマターってなに

ダークマターは銀河にも存在することが1970年代から知られていました

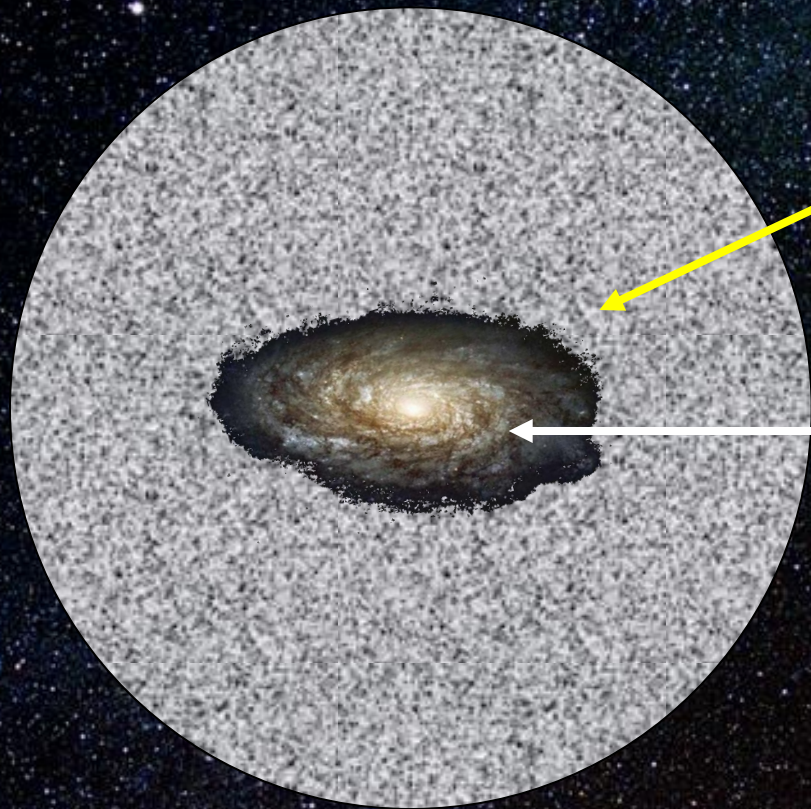


重力と遠心力は釣り合う

速く回ると遠心力が大きくなる
⇒ 重力も大きくする必要があり

★ ダークマターってなに

銀河に存在するダークマターの分布



円盤を取り囲むように球状に
ダークマターが広がっている

銀河円盤

ダークマターの方が約5倍多い

ダークマター分布のイメージ

もちろんダークマターは太陽系にも地球にも存在します！

1立方センチメートル当たり、

[illegible]

地球全体で1kg程度



★ ダークマターの正体は？

候補1：(通常のエメントから出来た)暗い星やガス

元素はダークマターの存在量を説明出来るほど、
たくさん存在しない

そのため×

★ ダークマターの正体は？

候補2:ブラックホール

光さえも吸込んでしまう、重力の強い天体

ダークマターの候補になりうる

★ ダークマターの正体は？

候補3：未知の粒子

通常のエリメント以外の未知の粒子

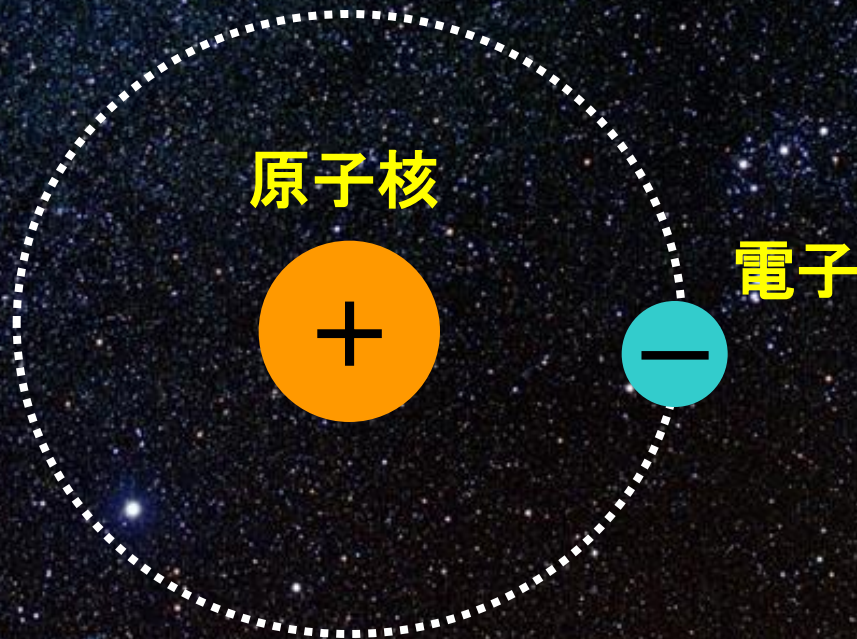
ダークマターの候補になりうる

★ ダークマターの性質

① 電気を持っていない

普通の元素は電気を持っている

： プラスの電気をもつ原子核の周りをマイナスの
電気を持つ電子が回っている



元素の構造

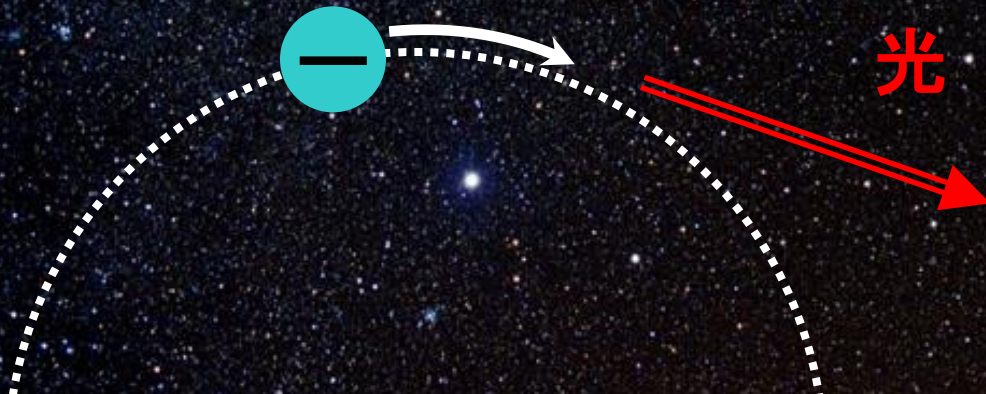
★ ダークマターの性質

① 電気を持っていない

なぜ電気をもってはダメか：

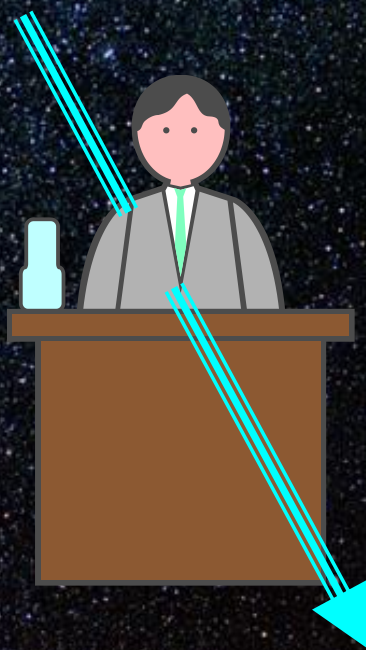
電気を持っている物質は加速したり、回転したり、振動すると光を出す性質がある

“ダークマター”は光ってはいけない



★ ダークマターの性質

② 触ることが出来ない & 人体も突き抜ける



★ ダークマターの性質

③ 重さはある、重力で引っ張りあう

ダークマターも銀河や星の重力に引っ張られる



銀河や星もダークマターの重力に引っ張られる

★ ダークマターの性質

③ 重さはある、重力で引っ張りあう

ダークマターは自分で固まることが出来る



★ ダークマターの性質

④ 安定な粒子

現在の宇宙でも観測される

宇宙年齢(137億年)経っても安定な粒子

★ ダークマターと宇宙の将来

我々の宇宙にダークマターが少なければ、、、



時間が経つと...

永遠に膨張し続ける

★ ダークマターと宇宙の将来

ダークマターが多すぎると、、、
ダークマターの重力(引力)で宇宙が収縮を始める



ビッグクラッシュ

時間が経つと...

宇宙は最後はつぶれる

★ ダークマターと宇宙の将来



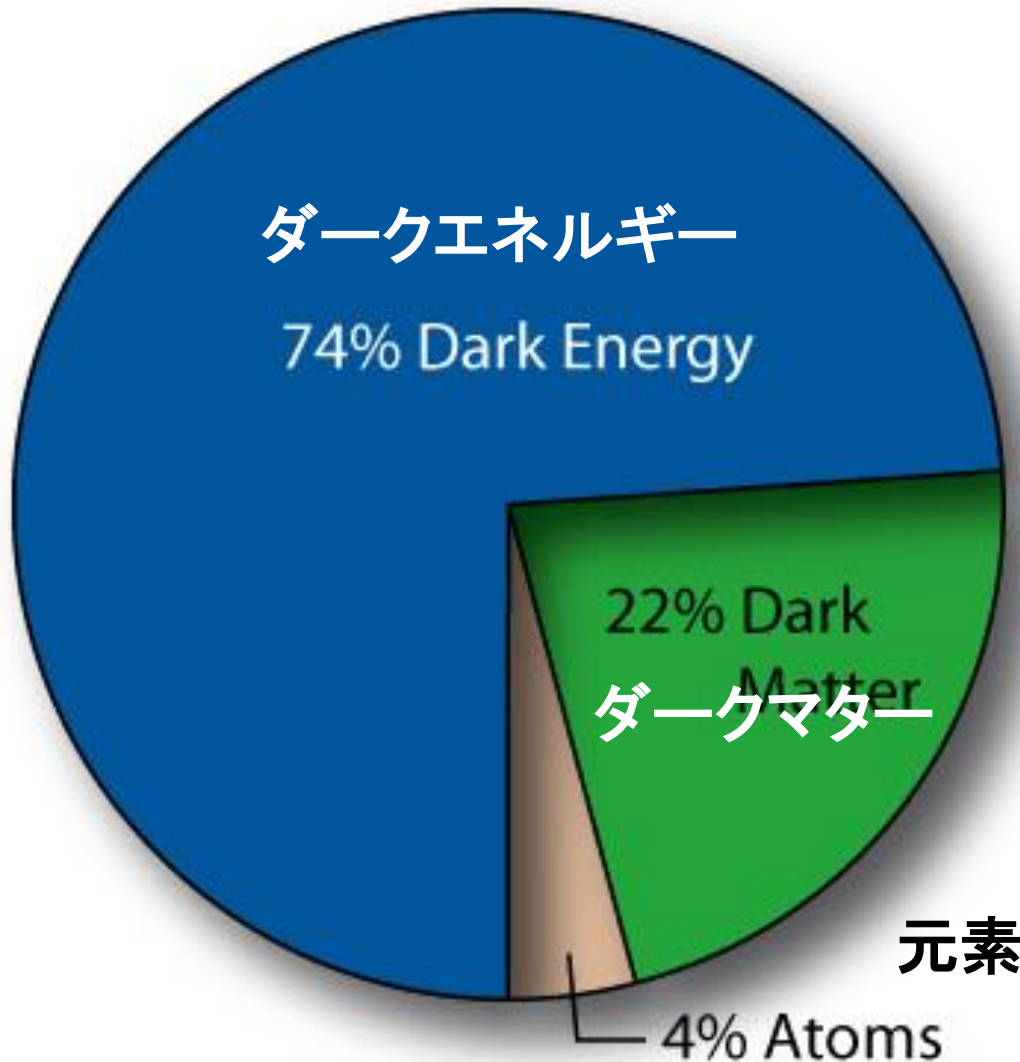
時間が経つと...

最新の研究では、ダークマターはそれほど多く存在せず、
宇宙は永遠に膨張し続けると考えられている

★ ダークマター探し

現在でもダークマターを見つけようと世界中の研究者が調べていますが、いまだにその正体は全くわかっていません

★ 宇宙は何から出来ているか？



最新の観測から
宇宙の96%は
“ダーク”な成分
で出来ている

★ ダークエネルギーってなに(まとめ)

宇宙の約70%を占める最も主要な成分

空間に一様に満ちている

銀河間の反発力を生む



宇宙を加速的に膨張させる

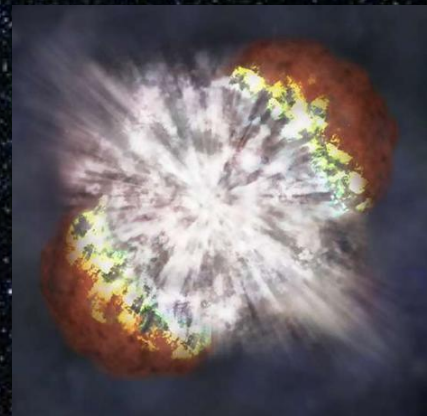
★ ダークエネルギーってなに

1990年代後半に観測から発見

“ダークエネルギー”という呼び方も90年代から

★ ダークエネルギーってなに

1990年代後半の超新星爆発の観測から発見



超新星爆発

遠方の超新星が暗い

⇒ 距離が遠い

⇒ 宇宙を加速的に膨張させて、距離を伸ばす

⇒ ダークエネルギーの存在

★ ダークエネルギーってなに

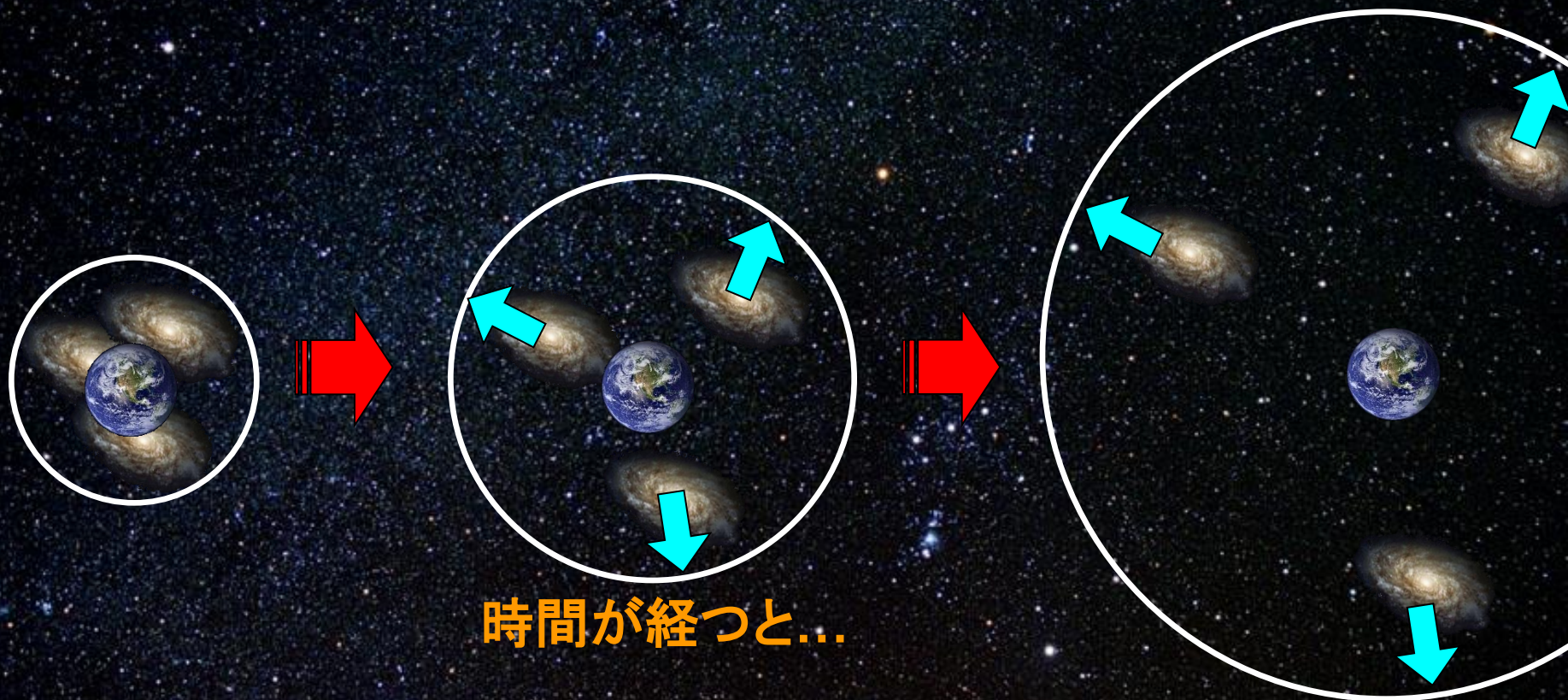
宇宙空間に一様に満ちている

ダークマターのように重力で集まったり、固まったりしない
銀河同士を反発させるように働く



★ ダークエネルギーってなに

宇宙膨張を加速させる



★ ダークエネルギーってなに
宇宙が膨張しても密度は変わらない



時間が経つと...

普通の物質：体積が2倍 $\Rightarrow$ 密度半分

★ ダークエネルギーってなに
宇宙が膨張しても密度は変わらない



ダークエネルギー：体積が2倍 $\Rightarrow$ 密度そのまま

★ ダークエネルギーってなに

宇宙が膨張しても密度は変わらない

宇宙がどんどん膨張すると、ダークエネルギーの割合が相対的に増える

現在70%だが、やがて100%に近づく

ダークエネルギーは太陽系にも地球にも存在します！

地球でのダークエネルギーの密度

1立方センチメートル当たり、

[illegible]

地球全体で0.01g程度



終わり