

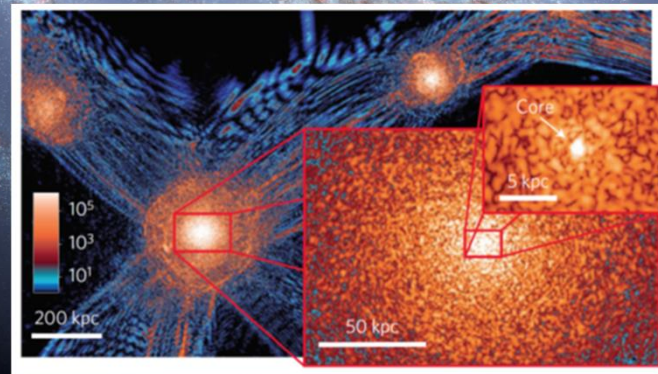


ダークマターとはなにか？

～宇宙をつくるダークマターの謎に挑むJASMINE計画～

ごうだ なおてる こくりつてんもんだい ジャスミン

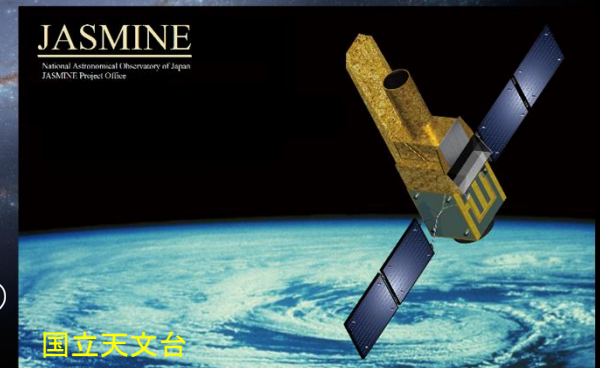
郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）



Credit: Hsi-Yu Schive et al. Nature Physics (2014)



JAXA



ダークマター(暗黒物質)

「光らない」「わからない」物質

?

今日のお話し

1. 宇宙はどうなっているの？

- ・どれくらい広いの？
- ・宇宙にはどんな物があるの？
- ・宇宙全体はどうなっているの？
- ・宇宙のはじまりは？ ～その後、現在までどうなってきたの？～

2. ダークマターがあることはどうして分かったの？

- ・重力(万有引力)がしめす“失われた質量”
- ・“失われた質量”からダークマター(暗黒物質)へ： 銀河の回転運動
- ・宇宙の構造形成で活躍するダークマター

3. ダークマターの正体は？ ～その候補たち～

- ・冷たいダークマター ・温かいダークマター ・自己相互作用するダークマター
- ・ファジーダークマター ・原始ブラックホール

4. ダークマターの正体はどうやったら分かるの？

- ・天体現象を用いた情報収集(重力レンズ効果、天体の運動など)
- ・加速器での生成・地球上や天の川銀河中心での直接・間接検出

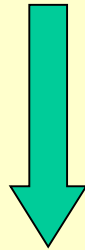
5. 赤外線位置天文観測衛星JASMINEで挑むダークマターの謎解きとは？

1.宇宙はどうなっているの？

★宇宙には何(どんな天体)があるの？

★どれぐらい広いの？

宇宙は広大、豊か



宇宙の階層構造(かいそうこうぞう)

星は遠い！！！！

天文学での距離スケール

光は秒速約 30万 km

→ * 1秒間に地球を約7周半 (地球の直径 : 約1万3000km)

* 月まで1秒ちょっとで到着 (月までの距離 : 約38万km)

* 太陽まで約8分で到着 (太陽までの距離 : 約1億 5000万km)

→ 今、見ている太陽は、約8分前の太陽の姿！！

天文学では、光が1年間に進む距離が距離の単位 (たんい) の1つとなる (研究者は、パーセクという単位をよく用いる)。

1光年 (こうねん) = 約 9.5×10^{12} km
(9兆5000億 km)

* 例 : 北極星は約430光年

→ 約430年前の北極星を見ている！！

宇宙の階層構造

だいこうぞう

たいようけい
太陽系



わいしょう ぎんが
矮小銀河



ぎんが
銀河



ぎんがぐん
銀河群



ぎんがだん
銀河団



宇宙の大構造



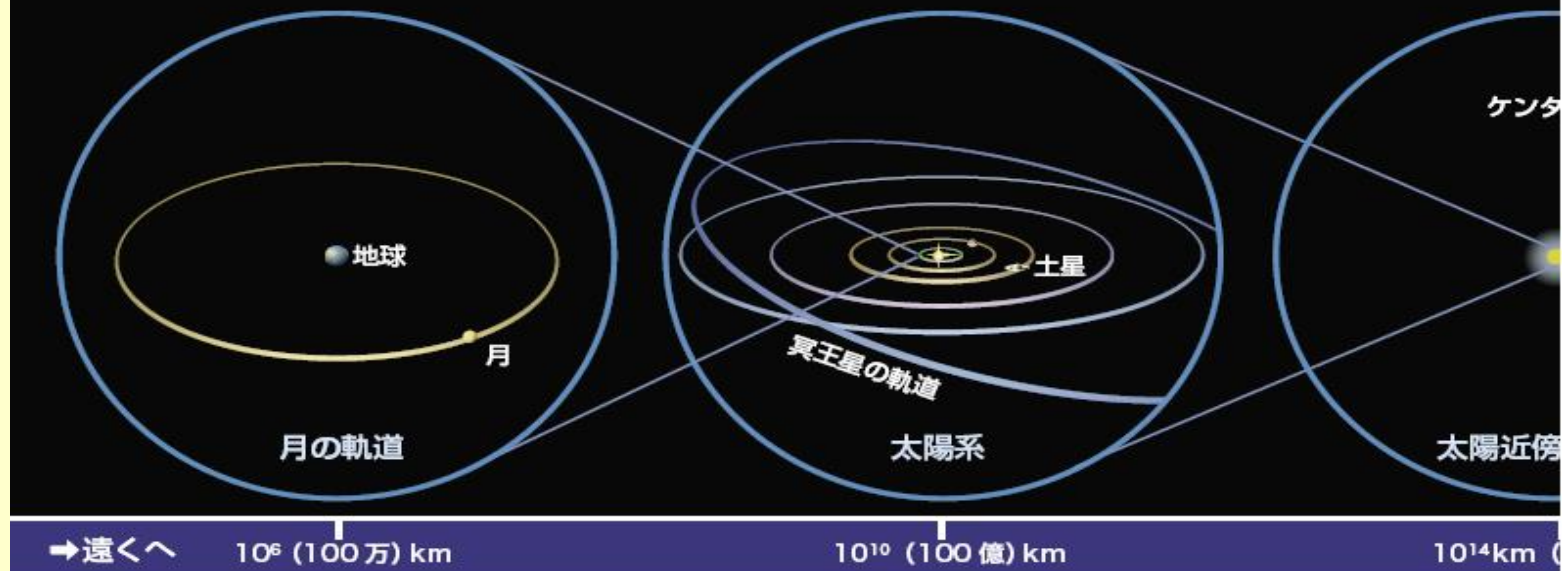
星団 せいだん



← 10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 →

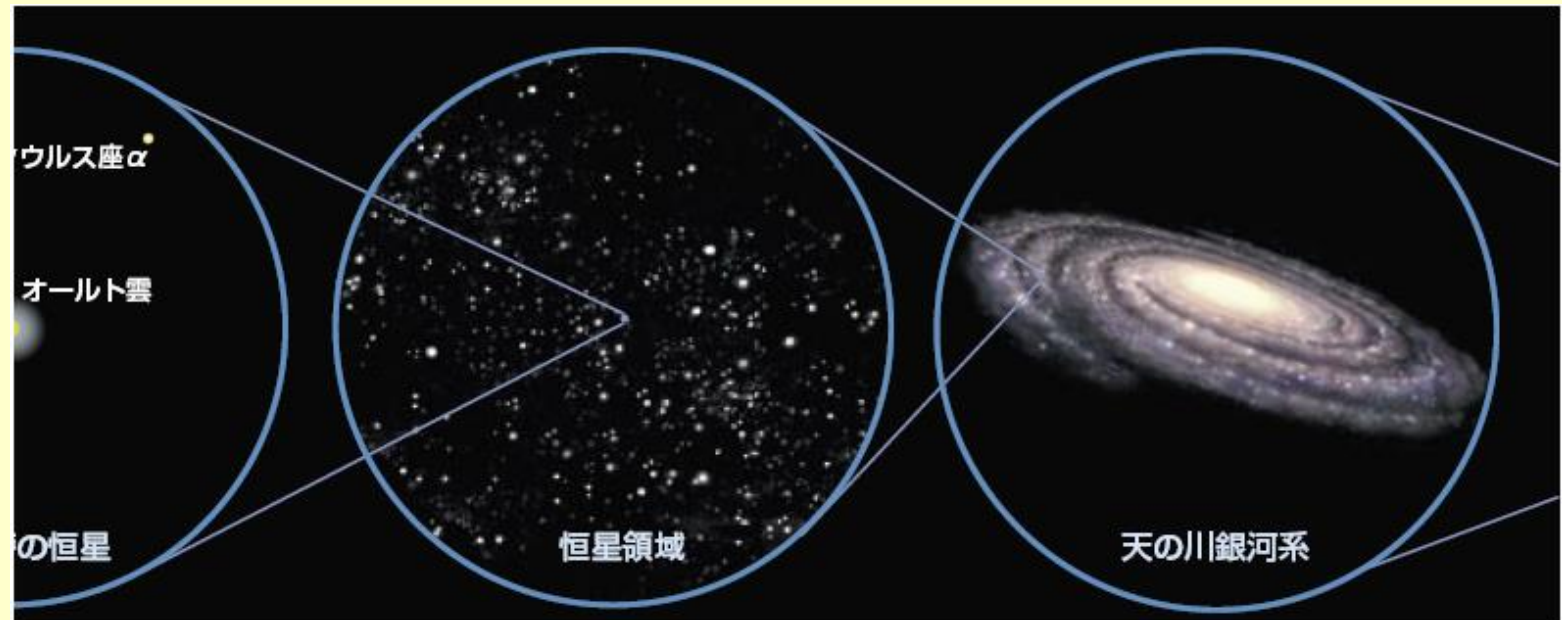
1 10 100 1千 1万 10万 100万 1千万 1億光年
おおよの大きさ(光年)

1光年 = 光の速さ(秒速約30万km)で1年間進む距離
= 約 9.5×10^{12} km (9兆5000億km)



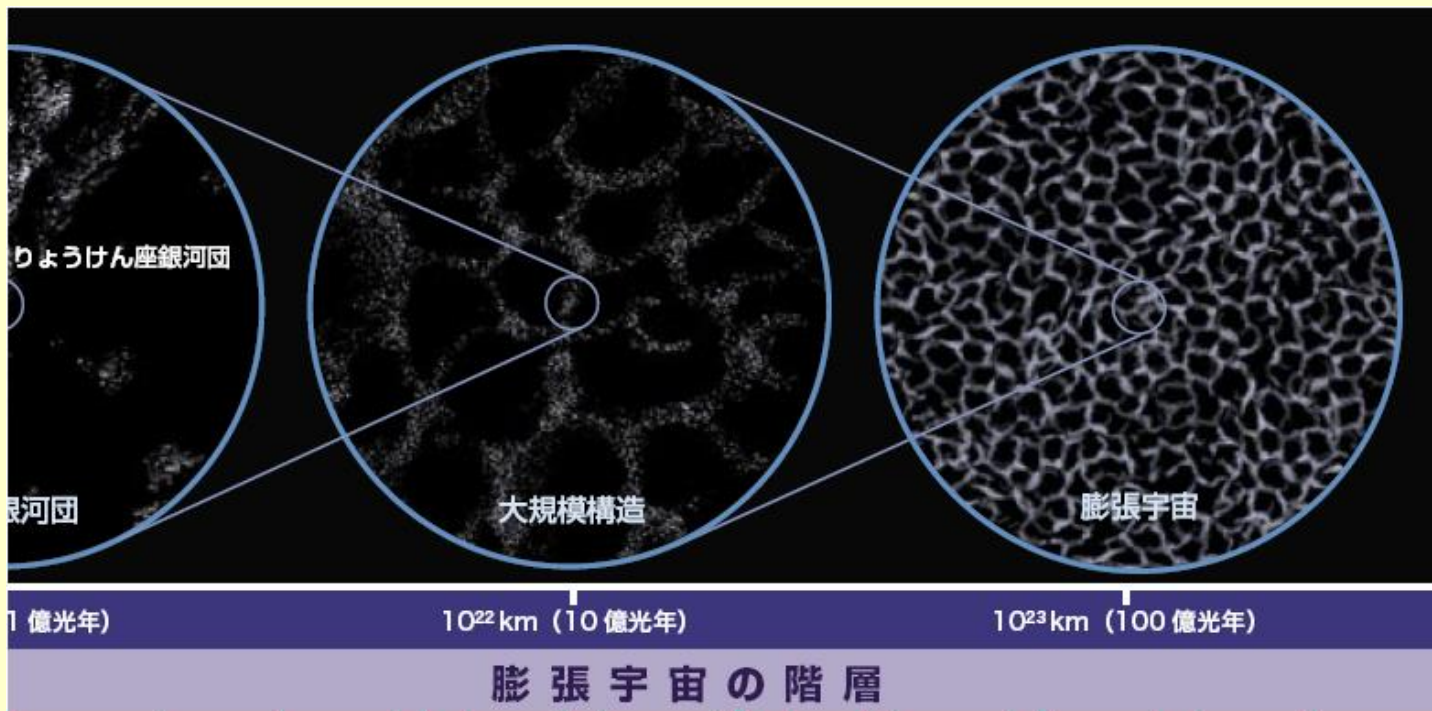
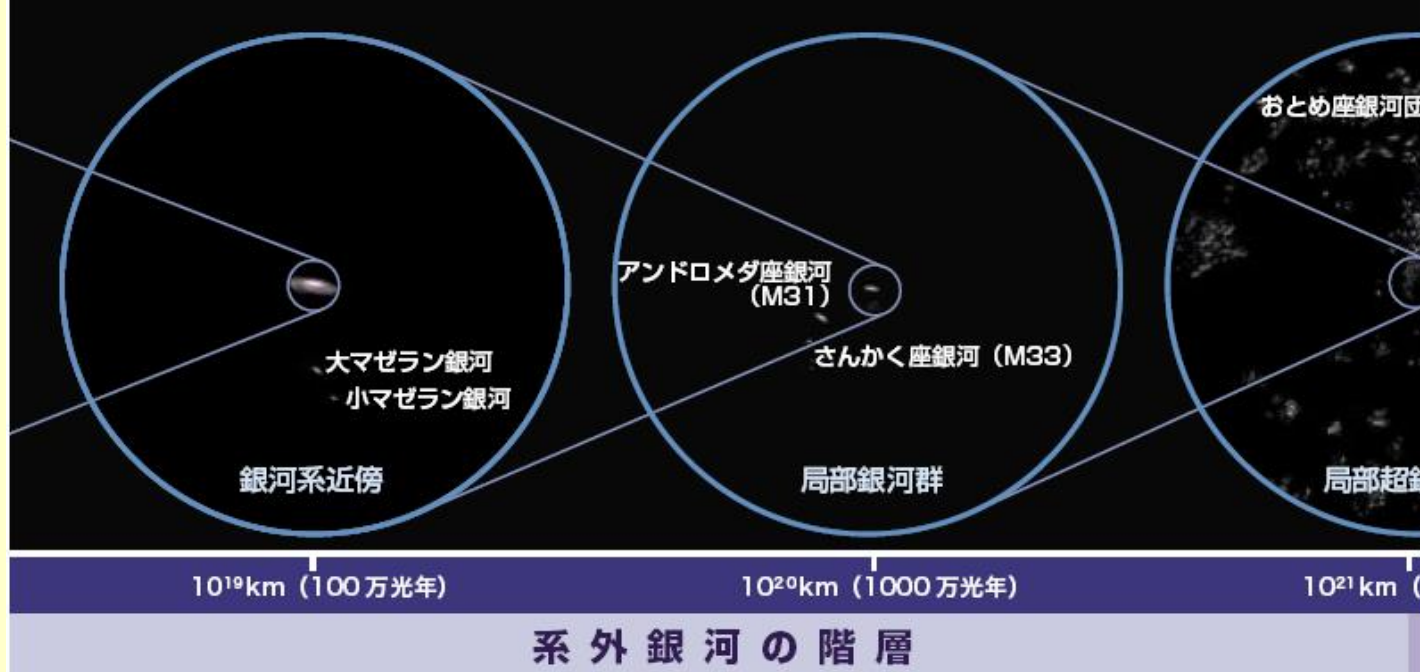
→遠くへ 10^6 (100万) km 10^{10} (100億) km 10^{14} km

太陽系の階層



10 光年 10^{16} km (1000 光年) 10^{18} km (10万光年)

天の川銀河系の階層



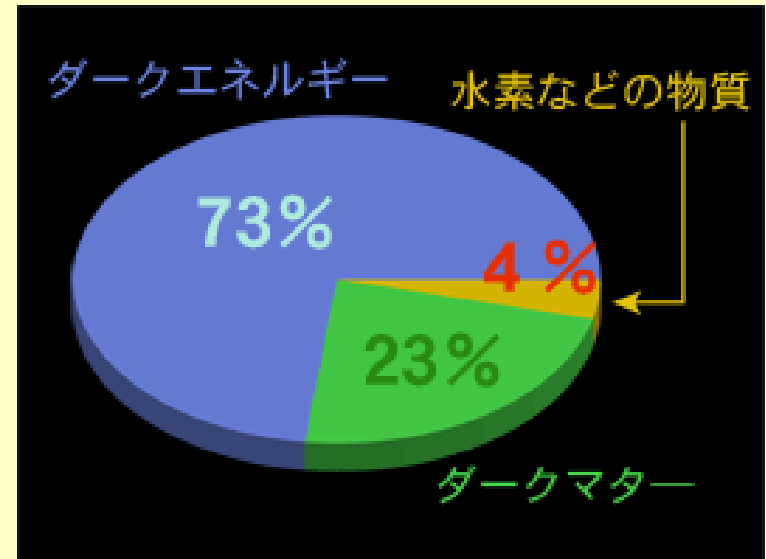
★宇宙にはどんな物(もの)があるの？

◎最近のいくつかの観測事実

しつりょうひ

◎宇宙に含まれる物質の質量比(重さのわりあい):

普通の物質 (バリオン)	+ 暗黒物質(未知) (ダークマター)	+ 暗黒エネルギー(未知) (ダークエネルギー)
~4%	~23%	~73%

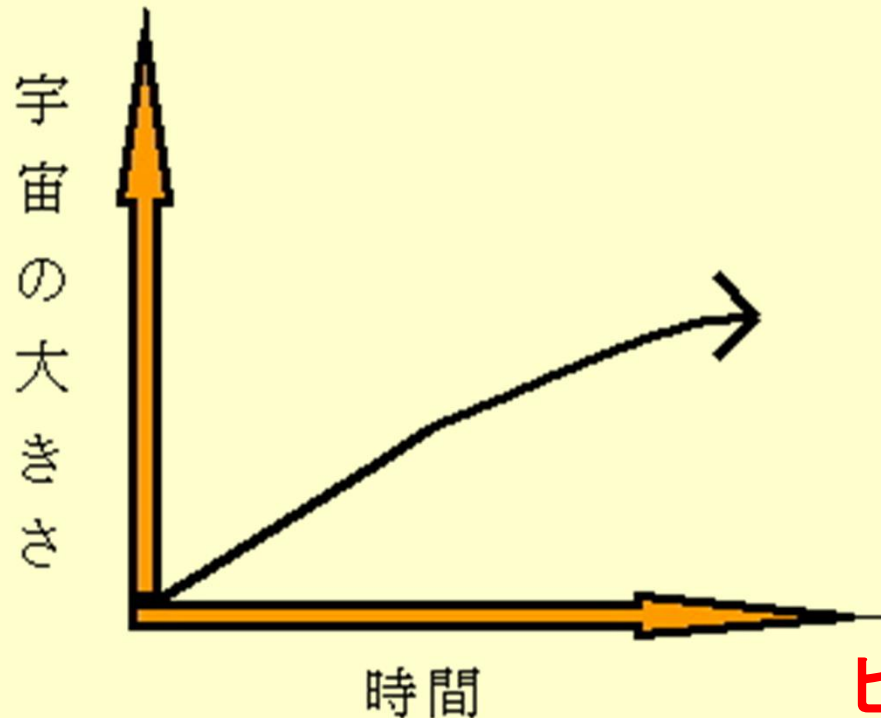


★宇宙全体はどうなっているの？

宇宙はどこも同じ。中心はない。

宇宙空間が^{ぼうちょう}膨張

宇宙の年齢は
約138億年



宇宙のごくはじめは
非常に高い
温度で、
高い密度の
状態

ビッグバン(火の玉宇宙)

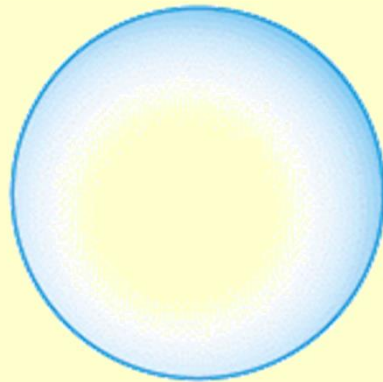
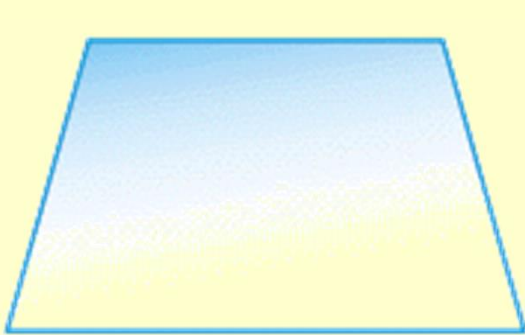
★宇宙には果てがあるの？

138億光年しか見えない

→観測できる“果て”(範囲)はある。

しかし、その先は？

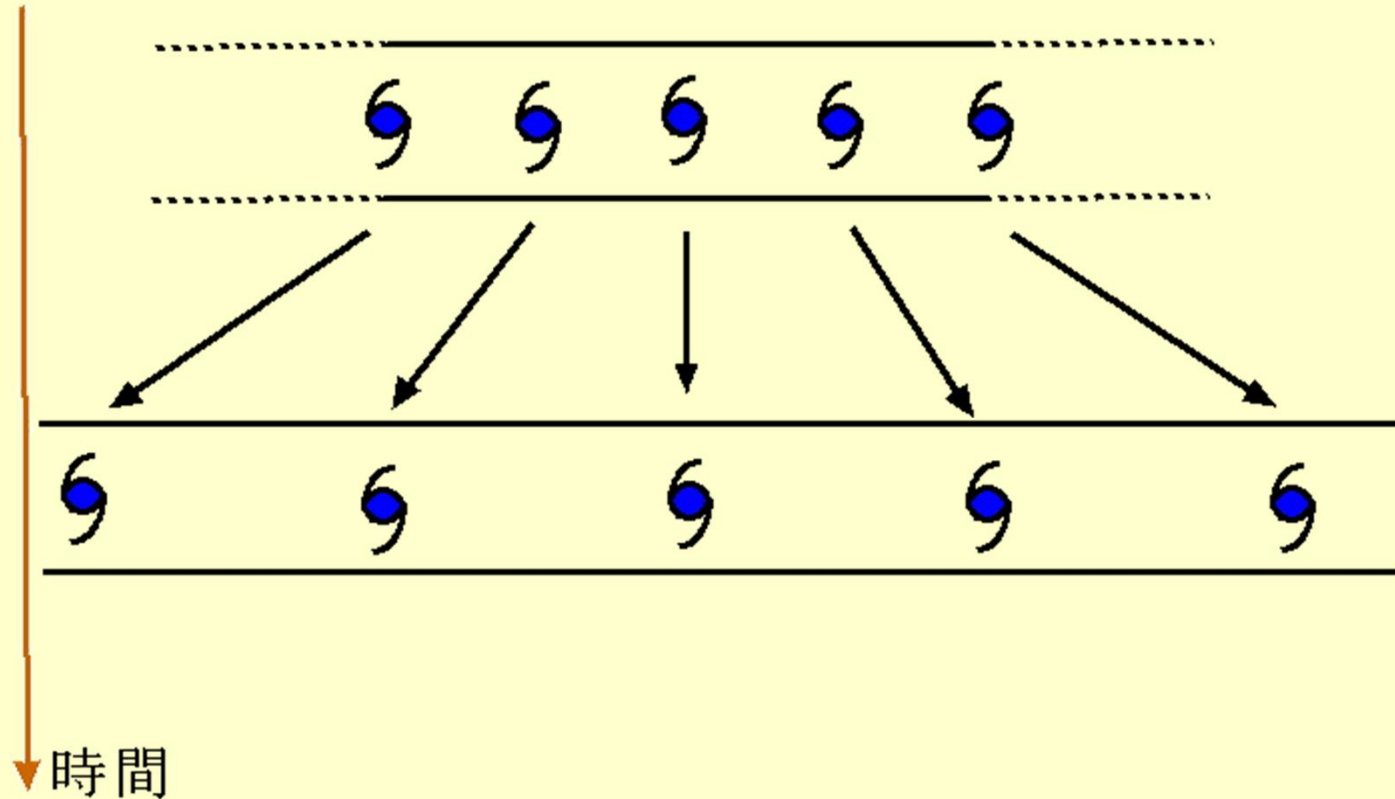
空間は無限 または 有限



“果て(端)”は
無い！

もし、“空間”が無限ならば……

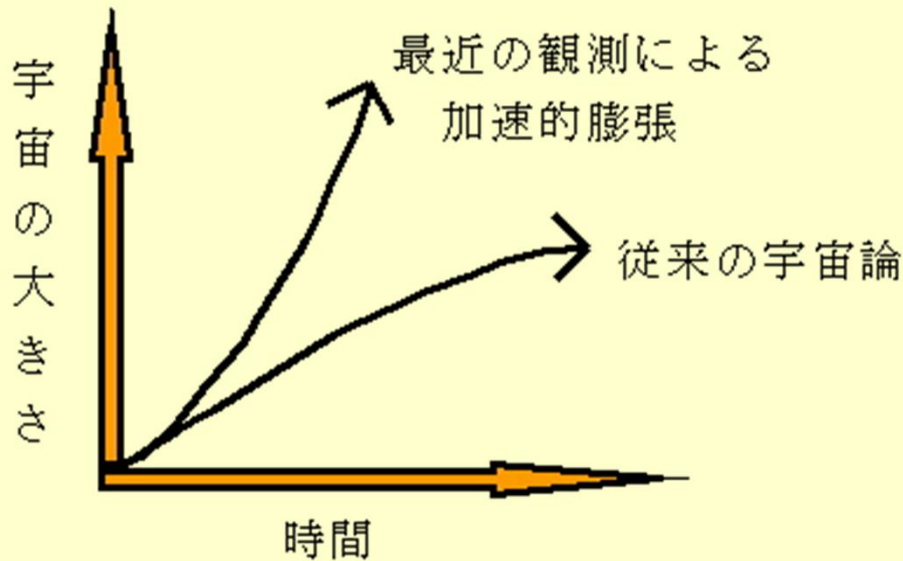
最初から、“無限” どこかに中心はない。



* 有限の場合も同様

ダークエネルギー（暗黒エネルギー）とは？

◎現在は加速膨張（“インフレーション”）



空間が膨張する速さが
どんどん大きくなっている



2011年ノーベル物理学賞



ダークエネルギー：反発力（斥力）を及ぼす

ダークエネルギーの正体は全く不明
（何かエネルギーの場？！）

★宇宙のはじまりは？

～その後、現在までどうなってきたの？～

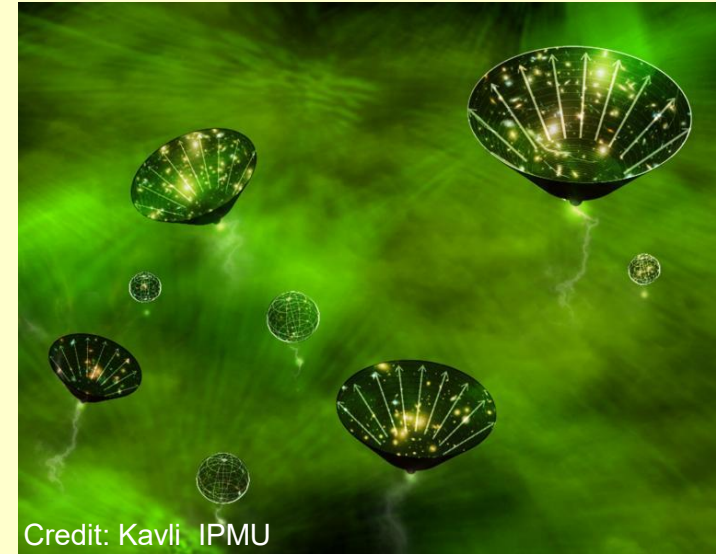
★宇宙のはじまり

時間・空間が、その“時”できた！

それ“以前”は？ → 質問が“無意味”

∵ “時間”が無い

“無”ではない：なにかエネルギー場はある



Credit: Kavli IPMU

マルチバース(多元宇宙)シナリオ

★宇宙初期の物理法則

ミクロな世界の物理学＋宇宙全体の重力場

量子論(“忍者”の世界)＋一般相対論(時空)＝量子重力理論

→ スーパーstring(超弦)理論：10次元時空

宇宙の多重発生：マルチバース 10^{500} 種類の宇宙

その後、現在までどうなってきたの？

◎時空の創成(“量子重力理論”) **宇宙とは、時空そのもの**

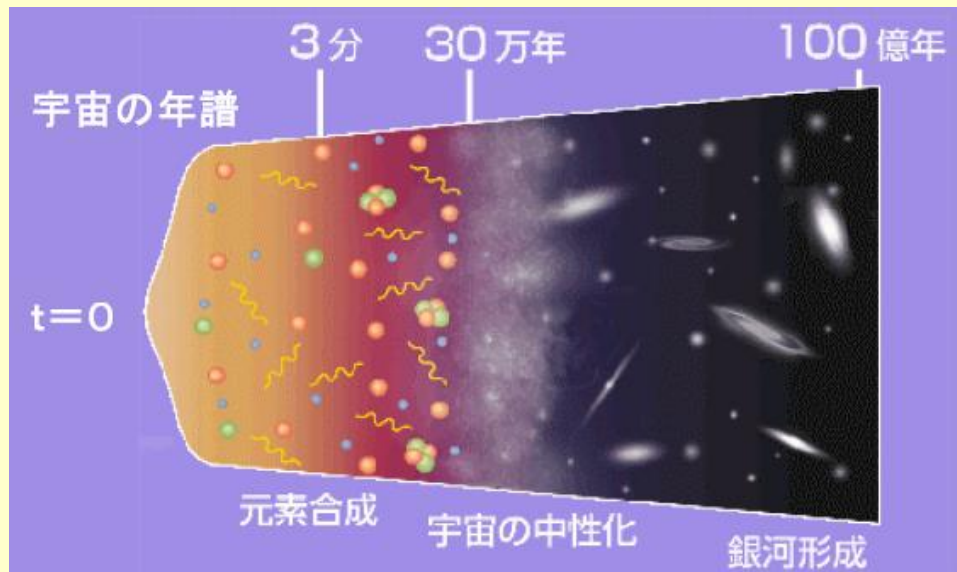


◎インフレーションモデル:量子状態だった物質が古典化(現実に存在する状態に)



◎**ビッグバン**:物質や“光”が高温、高密度。何の構造も無し。**一様・等方、宇宙膨張**
膨張により温度、密度とも下がっていった

○物質:“素粒子”——>原子、分子
(水素——>ヘリウムの合成)



◎現在の天体はどうやってできたの？

○階層構造の形成：重力不安定説

宇宙初期の物質のわずかな密度ゆらぎ

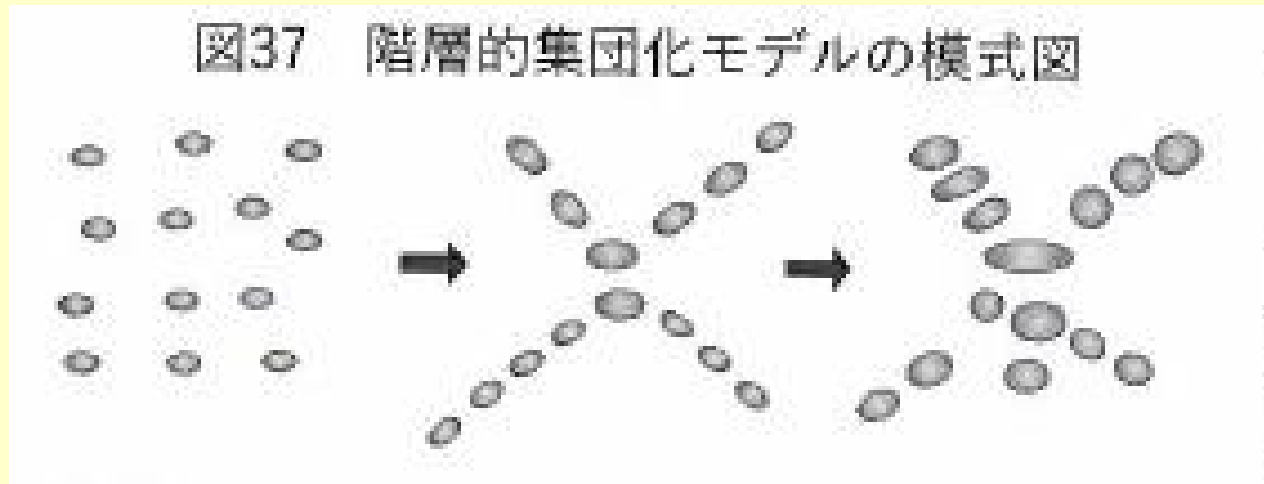
=> 自己の重力で密度が高まる

=> 銀河やその中で星が生まれる

=> 銀河が集団化

=> 銀河団や超銀河団(宇宙の大構造)ができてくる。

ダークマターの
重力の助けを
借りる



2.ダークマターがあることはどうして分かったの？

“万有引力”

全ての物体は互いに**重力**(引力で引き寄せせる作用)を及ぼしあっている

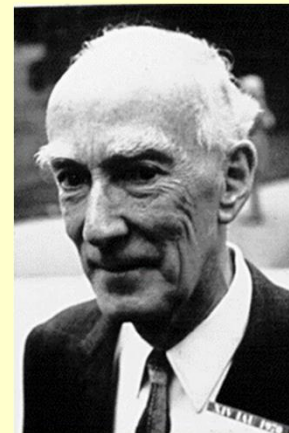
ダークマターからの“**重力**”を通して、その存在を知ることができる

★重力(万有引力)がしめす“失われた質量”

◎ダークマターはいつごろから、どのようにしてその存在がわかってきたか？

(i)太陽系近くにダークマターが存在？！

1932年(昭和7年) オランダの天文学者 オールト



太陽系付近の300光年内の星の数

× 星1個の質量

300光年以内の光っている星の質量

一方、300光年内の星の運動速度

運動速度が速い

↓
重力が強い

300光年以内の物質の総質量

↓
重力の源になる物質の
質量が大きい

↓
光っている星の約2倍！

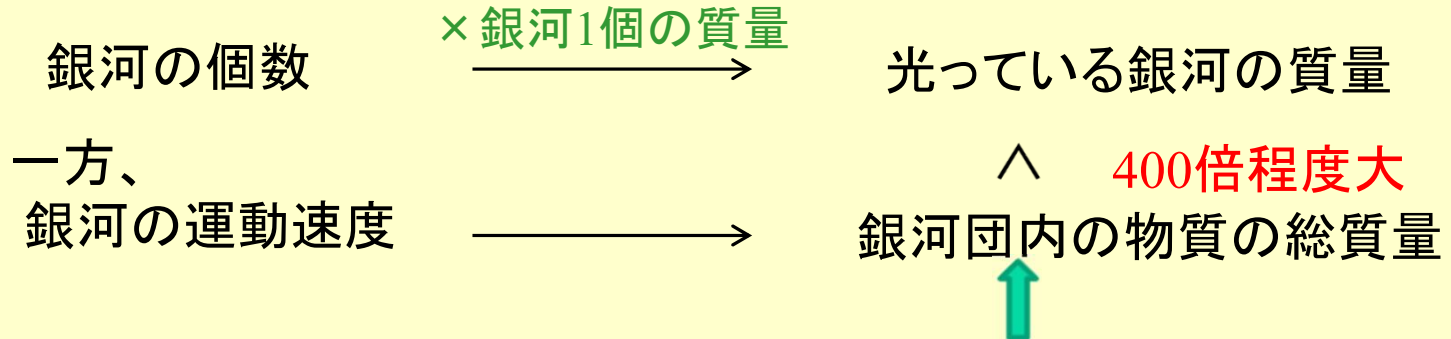
光っている星以外に「見失われた質量」、「行方不明の質量(missing mass)」が存在するのではないか！？

*しかし当時は、数値の信頼性が低く、あまり重要視されなかった。

(ii) 銀河団内にダークマターが存在？！

1933年 ツヴィッキー

かみのけ座銀河団の観測



重力が強くないと銀河が飛び出してしまう！



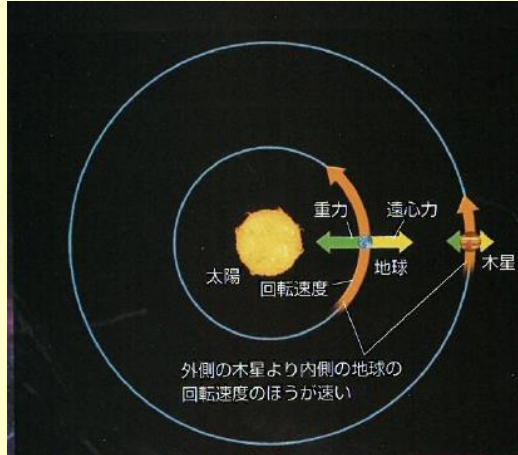
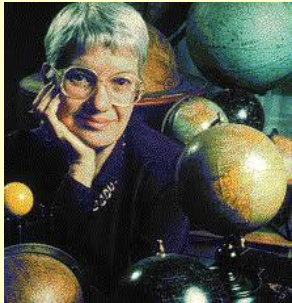
- * しかし当時は、この銀河団特有のものと思われていた。 図は、ニュートン(2012年9月号)より抜粋
- * 現在、多くの銀河団で存在。銀河団内の質量の内訳: 銀河が数%、銀河間ガスが20%、ダークマターが70~80%

★“失われた質量”からダークマター(暗黒物質)へ: 銀河の回転運動

多くの天文学者がダークマターの存在を信じてきたのは。。。

1970年 ルービン

アンドロメダ銀河や渦巻き銀河の回転曲線



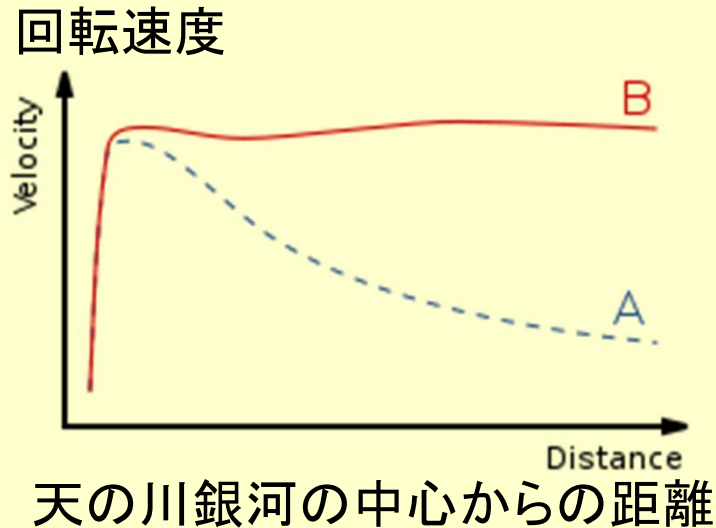
太陽に近いと(重力が強いと)
回転速度が大きい。
遠ざかると、回転速度は小さい。



銀河も。。。
光っている星の分布: 中心に集中。
中心ほど重力が強い。
=>
中心ほど回転速度が大きい。
遠ざかると、回転速度は小さい。
となるはず。

図は、ニュートン(2012年9月号)より抜粋

しかし実際は。。。



光っている星の分布に従えば、
Aのような曲線になるはず。
しかし、実際の観測によると
Bのような曲線。

=>

遠方まで回転速度が落ちない！！

=>

物質が銀河の外側まで分布している。
しかし、光では観測でない。

○電波による渦巻き銀河の回転曲線の観測(水素ガス)

さらに。。。

○楕円銀河にもダークマターが存在(高温ガスの閉じ込め)



「見失われた質量」、「行方不明の質量(missing mass)」

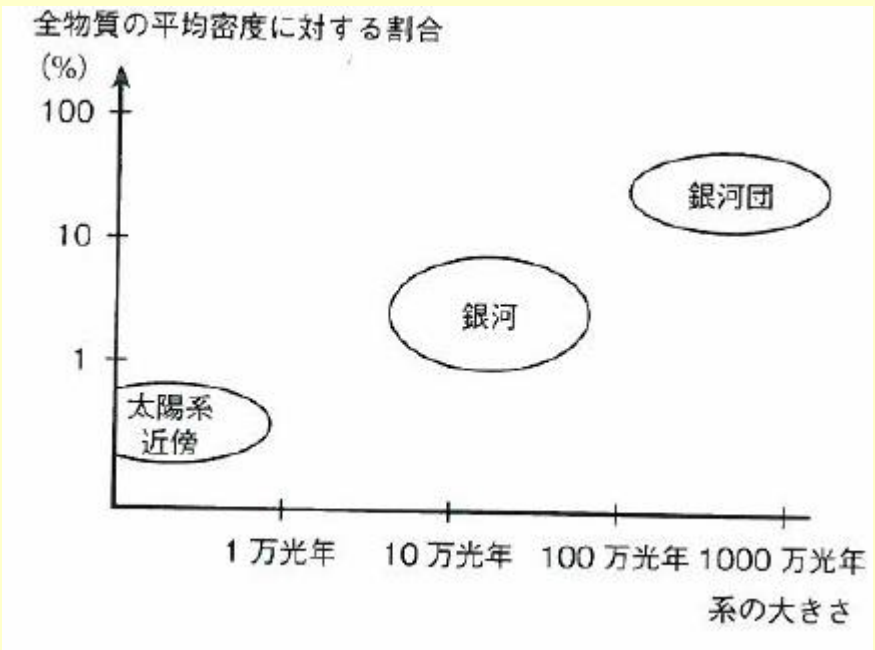
→

ダークマター(暗黒物質)とよばれるようになってきた(1980年代)

* 行方不明なのは、光(電磁波)で見えないからで、物質そのものが失われているからではなく、暗いか全く光を出さずに暗黒(ダーク)な物質ということで
暗黒物質(ダークマター)とよばれるようになった。

◎ダークマターの存在量

★太陽系付近、天の川銀河、銀河団の天体現象によりその存在が示唆されてきたダークマターのおおよその存在量を図示する。



* 大きなサイズの天体になるほど多くのダークマターが付随している。
=>



個々の銀河のダークマターを集めた以上に銀河団には銀河団全体に広がったダークマターの成分が存在

○ダークマターは何か？

暗い星、ブラックホール、白色矮星とかの可能性は無いのか？

○どのスケールのダークマターも同一種類のものか？

それとも違う種類なのか？

普通の物質はどれぐらいの量あるのか？

★全物質の平均密度に対して、4%程度！

* ヘリウムなどの軽い元素は、ビッグバン開始後に約3分間で生成。
普通の物質が多く存在すると、ヘリウムの量が増える。

→理論的計算と軽い元素の観測をくらべると普通の物質の
平均密度は約4%

* 最近の宇宙背景放射の温度ゆらぎの観測からも同様な示唆。



○銀河団に付随するダークマターの量は約20%

>普通の物質の存在量(4%)

=>普通の物質からできている暗い星、ブラックホール、白色矮星とかで
すべてのダークマターは説明できない！



未知な物質が存在！（ダークマター）

*** 普通の物質で光っていないもの（ダークバリオン）**

★宇宙の構造形成で活躍するダークマター

ビッグバン：“熱いスープ状態”



宇宙膨張に伴い
温度が下がってきた

現在、2.7K(摂氏-270.3度)の
電波として存在

宇宙背景(黒体)放射
“ビッグバンの残光”

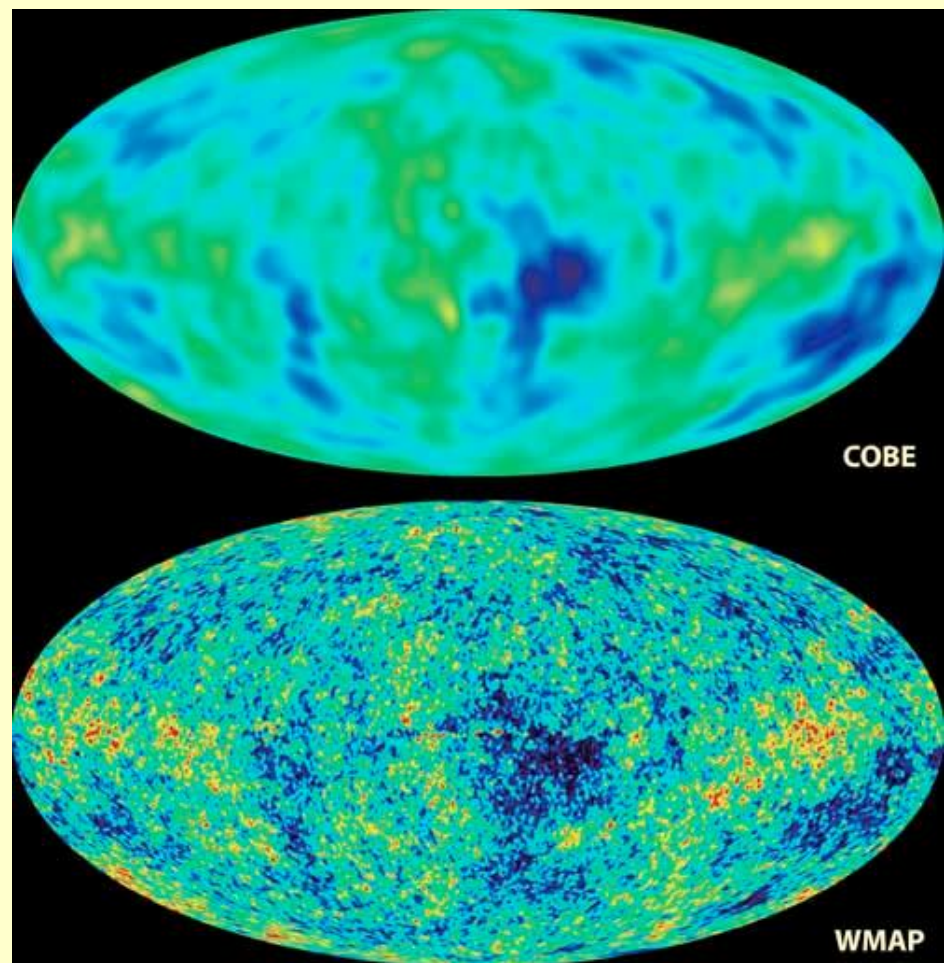
1965年、ベル研究所のペンジアスと
ウィルソンが、“偶然”発見
=>ノーベル物理学賞(1978年)

宇宙背景放射の温度のムラ
→古文書
→物質の密度ゆらぎの存在！

参考：宇宙年齢、ダークエネルギー、ダークマターの質量比の情報が
含まれている。

→アメリカの観測衛星COBEが
初検出(1992)

→2006年ノーベル物理学賞



重力不安定説には大きな問題点があった！

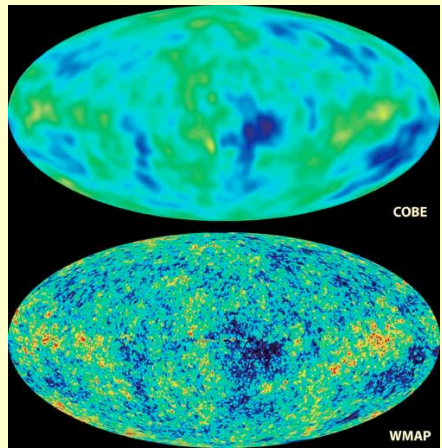
★銀河が早く出来るためには

宇宙初期の密度ゆらぎ 大 → 宇宙背景放射の密度も大



現在の背景放射の温度ゆらぎが大

しかし、。。。



放射の温度ゆらぎは非常に小さかった！
(約10万分の1程度)



宇宙初期の密度ゆらぎは小さかった！？



現在までに銀河や大構造はできない！

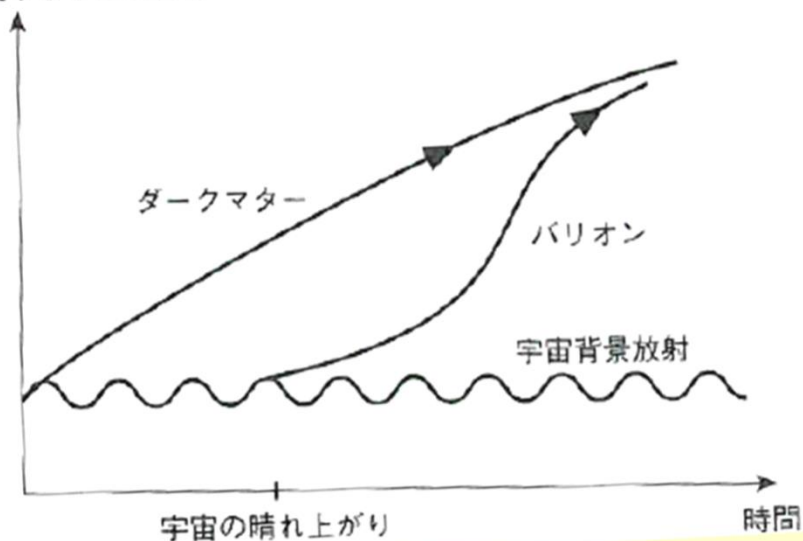
★ダークマターがあればできる！

未知な物質:電磁相互作用をしない(放射に影響しない)



ダークマターの密度ゆらぎは多少大きくても
放射の密度ゆらぎ(温度ゆらぎ)は大きくなるらない。

密度ゆらぎの大きさ



ダークマターの密度ゆらぎは大きく
早く成長。

⇒ダークマターの方が存在量も
多く、重力が強くなるため
普通の物質のゆらぎが
それに伴いあとから大きく成長

現在までに銀河や大構造はできる！

★理論モデル

数値シミュレーション(ダークマターの重力成長)

+

準解析的モデル(“銀河”の形成と進化)

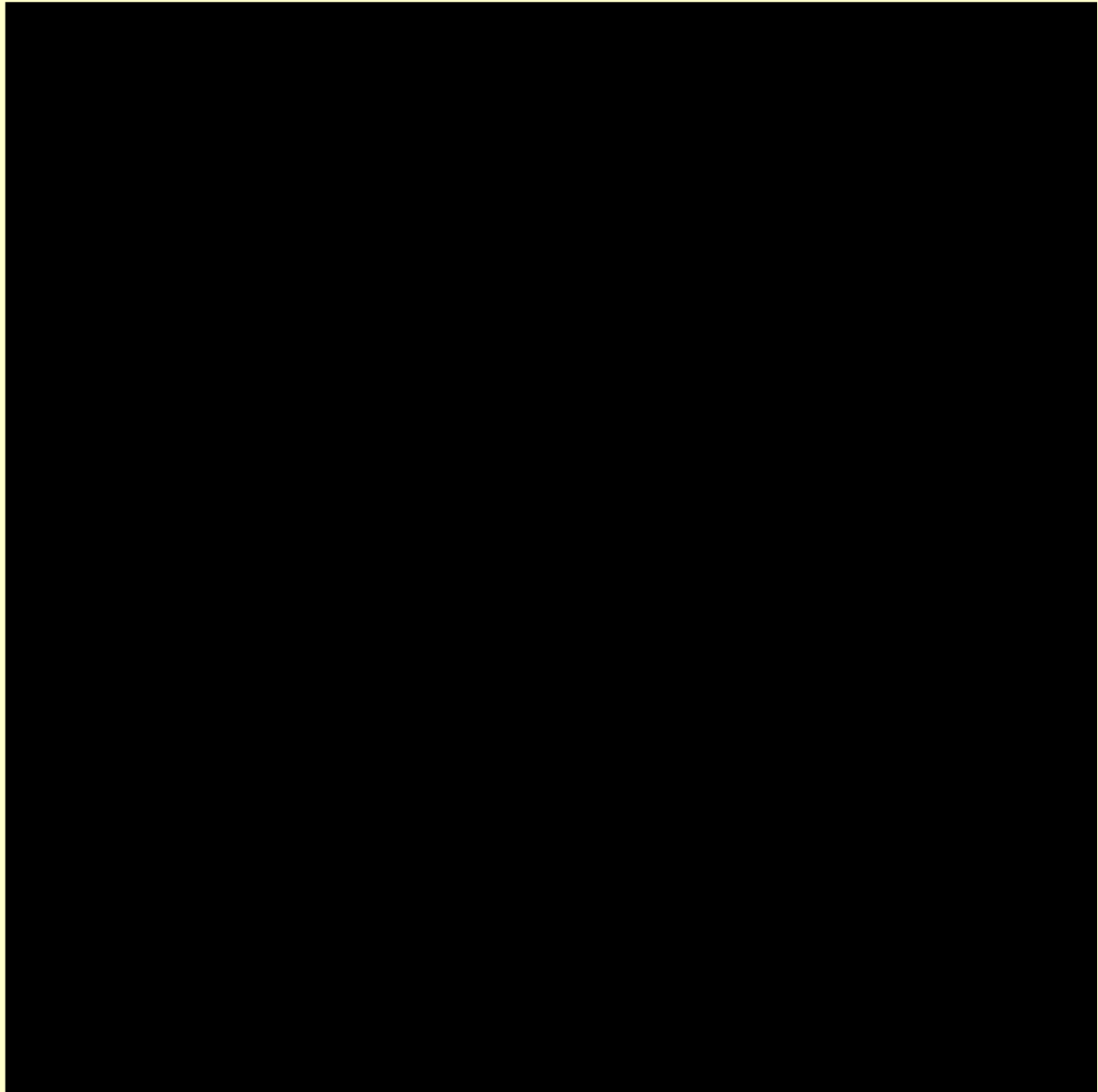
○ダークマターにより、銀河団や大構造ができていく様子
————→ ムービー(矢作日出樹(当時、国立天文台)作成)

国立天文台データ解析計算機センターのスーパーコンピューター使用による
N体計算(約1億3千万の粒子数)

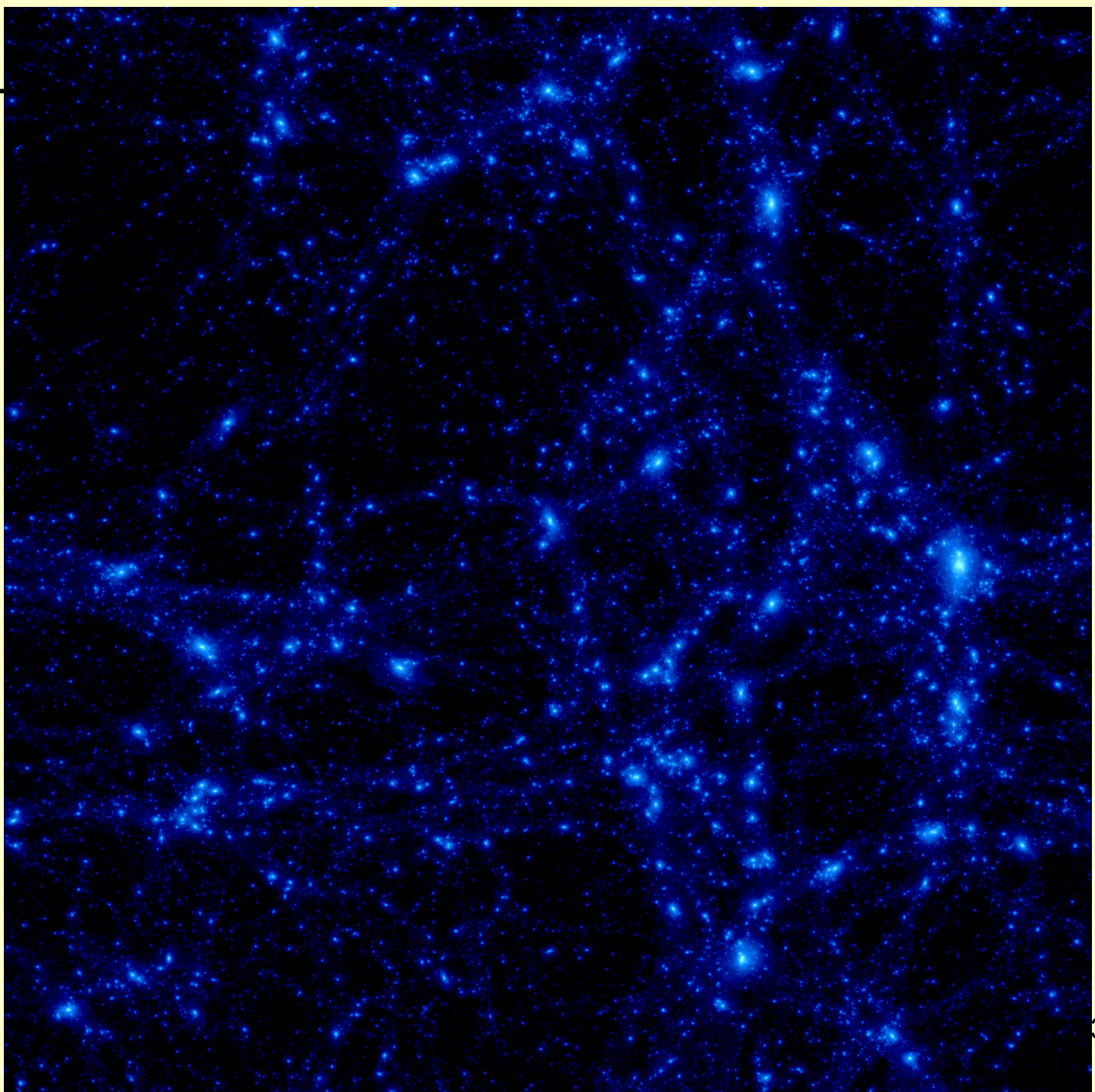
○ダークマターの空間分布+銀河の空間分布(地図)

矢作日出樹作成

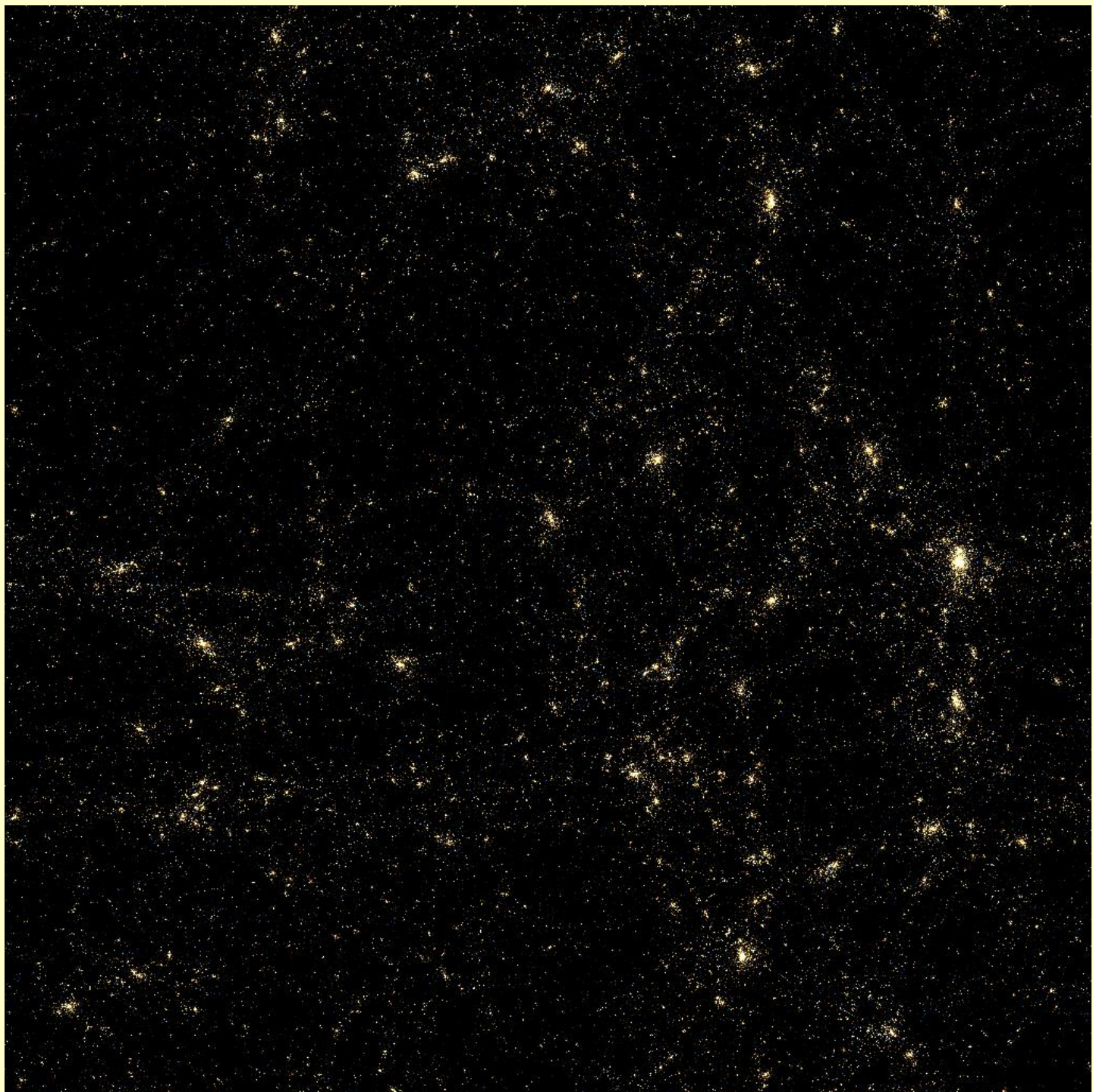
(共同研究者:長島雅裕、榎 基宏(当時、国立天文台)、
吉井 讓(東大)、郷田直輝)



現在の
ダークマター
分布



現在の
銀河分布



ダークマターが存在しないと
銀河が誕生していない。
すると、恒星、惑星もできずに、
生命体も生まれていない！

本当はもっと良い名前を？！

3. ダークマターの正体は？ ～その候補たち～

- ・冷たいダークマター (Cold Dark Matter: CDM)
- ・温かいダークマター (Warm Dark Matter: WDM)
- ・自己相互作用するダークマター
(Self-Interacting Dark Matter: SIDM)
- ・ファジーダークマター (Fuzzy Dark Matter: FDM)
- ・原始ブラックホール

(1) 冷たいダークマター

○特徴

- ・ダークマターの“速度”が小さい。
- ・小さいものから大きいものまで多様な構造ができる
→ 小さい構造が先に形成され、それらが合体を繰り返していくことでより大きな構造が作られる

○候補粒子

- ・WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)

超対称性粒子の一員：**ニュートラリーノ**

* フォティーノ、ズィーノ、ヒグシーノ

質量は陽子 (10^{-23} g) の約10～1000倍 $10^{-23} \sim 10^{-21}$ g

1000立方mあたり1個存在？

- ・アクシオン

* 強い力(核力)を説明する理論で必要とされている

* 軽い(質量は電子 (10^{-27} g) の約1億分の1以下)動きは遅い。 $< \sim 10^{-35}$ g

* 1000立方mあたり1兆個の10万倍存在

◎参考：超対称性粒子について

素粒子論：物質の根源と物質にはたらく力を探求

原子核と電子 陽子と中性子

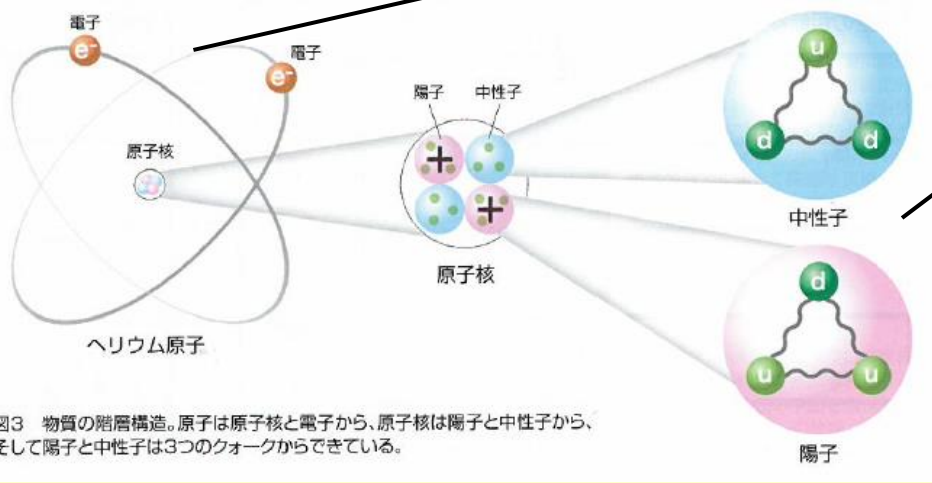


図3 物質の階層構造。原子は原子核と電子から、原子核は陽子と中性子から、そして陽子と中性子は3つのクォークからできている。

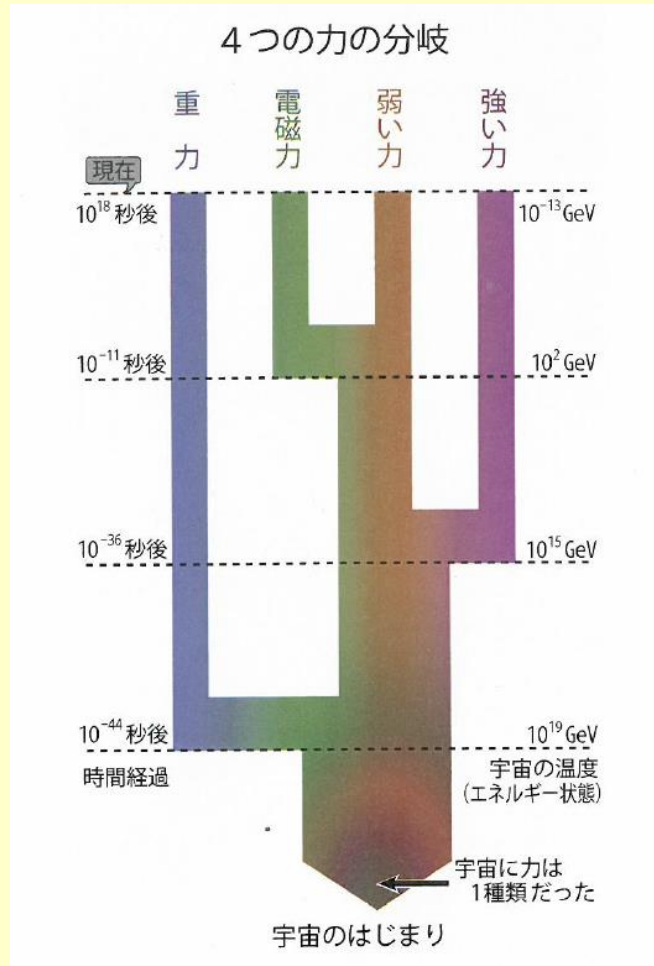
物質粒子				力を伝える粒子
	第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	強い力 グルーオン g
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	
		発見?		H ヒッグス粒子

陽子：アップ2個 + ダウン1個
中性子：アップ1個 + ダウン2個

* クォーク3個からなる物資：バリオン

◎力の統一理論

* 現在は、4つの力: 電磁気力、弱い力(ベータ崩壊)、強い力(核力)、重力
宇宙のはじまりでは1つの力だった(はず)!



力の統一理論の構築が夢!!

(アインシュタインも夢見ていたが成し遂げ得なかった)

○電磁力と弱い力の統一: 成功=>電弱力

ワインバーグ・サラム理論=>ノーベル物理学賞(1979年)

* ヒッグス粒子の存在で完全実証

○電弱力と強い力の統一は?

=>大統一理論: 未完成

最後には重力も統一!: まだまだ。。。

基本原理: 昔は、単純で対称性があった。
それが、分岐し、複雑になっていった。

* 分岐させるメカニズムは、“相転移”

図は、別冊宝島より抜粋

★超対称性理論:

- * クォーク、レプトン: スピンが1/2の奇数倍(フェルミ粒子)
- * ゲージ粒子(力を伝えるもの)、ヒッグス粒子(質量を与えるもの): スピンは整数倍。(ボーズ粒子)

↓ 超対称性の導入

現存するフェルミ粒子 → ペアとなるボーズ粒子が存在
 現存するボーズ粒子 → ペアとなるフェルミ粒子が存在



超対称性粒子:
存在するか?

未確認

* 素粒子論にとっては
存在して欲しい
“ダークマター候補”。

図11 素粒子の超対称性。すべての力の統一のために必要と考えられている。現在知られている各々のフェルミ粒子・ボーズ粒子には、それぞれ質量が同じボーズ粒子・フェルミ粒子が対応して存在するという理論。

※厳密には、フェルミ粒子は(素粒子の回転の強さを示す)スピンの1/2の奇数倍、ボーズ粒子はスピンの整数倍のもの。それぞれのスピンを1/2ずつずらしたものを、その素粒子の超対称性粒子と考えるため、フェルミ粒子の超対称性粒子はスピンの整数の粒子(=ボーズ粒子)、ボーズ粒子の超対称性粒子はスピンの1/2の奇数倍の粒子(フェルミ粒子)となる。

(2) 温かいダークマター

○特徴

- ・ダークマターの“速度”が冷たいダークマターよりはほどほど大きい。
- ・大きな構造中の小さな構造の形成がCDMに比べて抑制される。

○候補粒子

- ・ステライルニュートリノ: 質量 $\sim 10^{-30}\text{g}$

参考：熱いダークマター

○特徴

- ・ダークマターの“速度”が速い(ほぼ、光速)

○候補粒子

ニュートリノ

ニュートリノは、すでに発見されている

昔、質量はゼロと考えられていた

→しかし、質量が存在

2015年度ノーベル物理学賞(梶田先生)！！

ダークマター候補に。

しかしながら。。。

* 昔、光速度で運動

→小さなスケールの密度ゆらぎが消されて大きなスケールのゆらぎだけが残る

→大きなサイズの構造(超銀河団)からできてくる(パンケーキモデル)

→銀河が現在までに形成されない

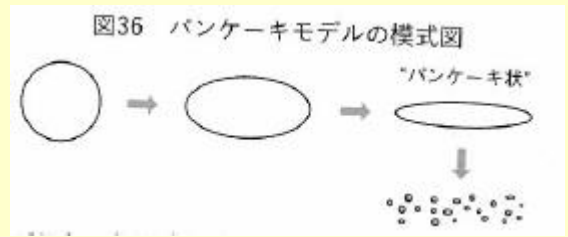
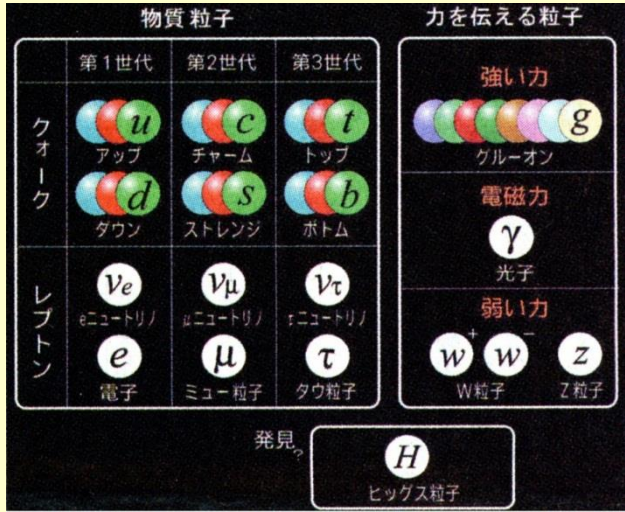
* ニュートリノの質量は確定していないが、

現在の予想だと、小さくて、宇宙全体に占める割合は、

わずか4%以内。

質量は電子(10^{-27} g)の約100万分の1以下

$< \sim 10^{-33}$ g



(3) 自己相互作用するダークマター

○特徴

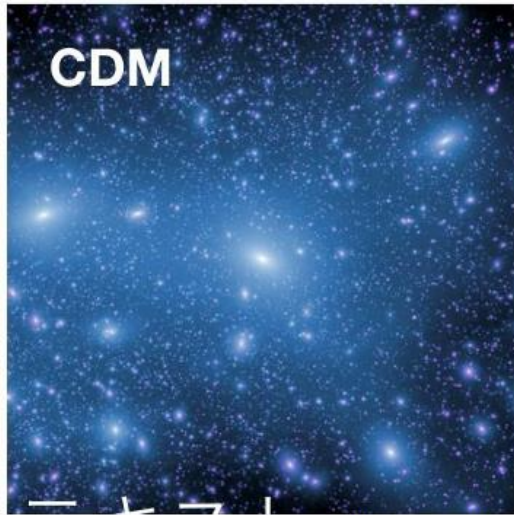
- ・通常物質とは、電気や磁気力を及ぼしあわないが、このダークマター同士は何らかの力を及ぼし合う。
- ・大きな構造中には、CDMなどの場合にはみられない、コアと呼ばれる密度が一定な部分がある。

(4) ファジーダークマター

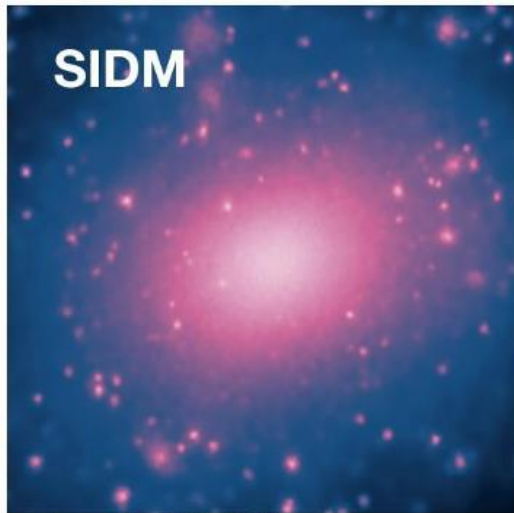
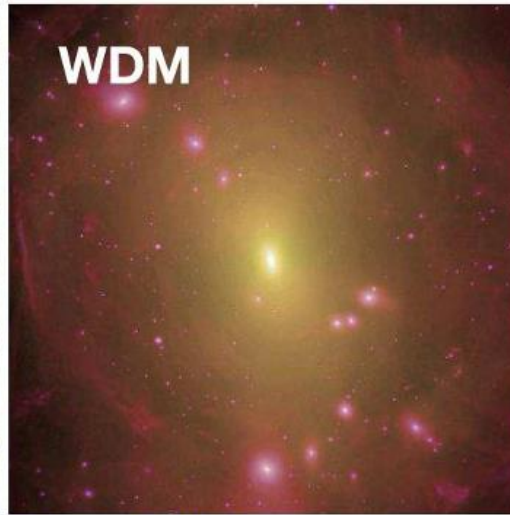
○特徴

- ・非常に軽くて、粒子というよりも、量子力学的効果が大きく、波としての性質が強い。
- ・質量が、 10^{-53} g以下の粒子だと、その波のサイズが銀河サイズになる。
- ・大きな構造中には、波の干渉縞のパターンがダークマターの密度分布にもあらわれる。

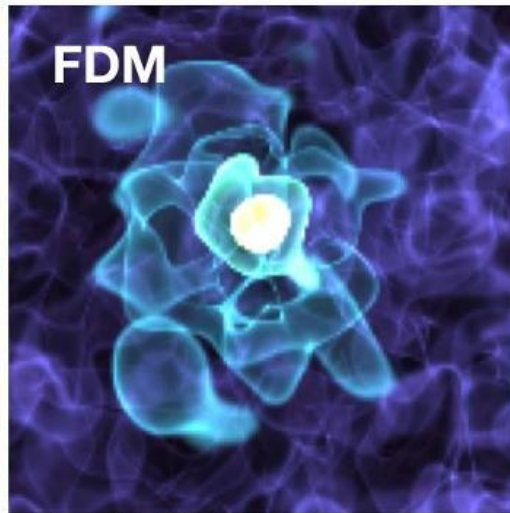
◎4種類のダークマターによる構造形成の違い



www.mpa.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium-II/index.html#Images
arxiv.org/abs/1104.2929



arxiv.org/abs/1705.00623



arxiv.org/abs/1705.05845

(5) 原始ブラックホール

○特徴

- ・宇宙初期に形成され、星の重力崩壊を起源としないブラックホールの総称
- ・標準的シナリオ：
インフレーション中に生成されたゆらぎのうち、稀に大きな振幅をもったものが重力崩壊を起こし、ブラックホールを形成する。
- ・あらゆる質量のブラックホールの形成が理論的に可能



Credit: Kavli IPMU

4. ダークマターの正体はどうやったら分かるの？

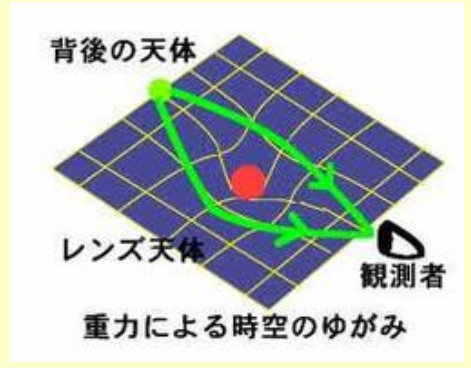
- ・天体現象を用いた情報収集
(重力レンズ効果、天体の運動など)
- ・加速器での生成
- ・地球上や天の川銀河中心での直接・間接検出

★重力レンズ効果を用いたダークマター探査

重力レンズ効果 → 宇宙論スケールでのダークマター分布

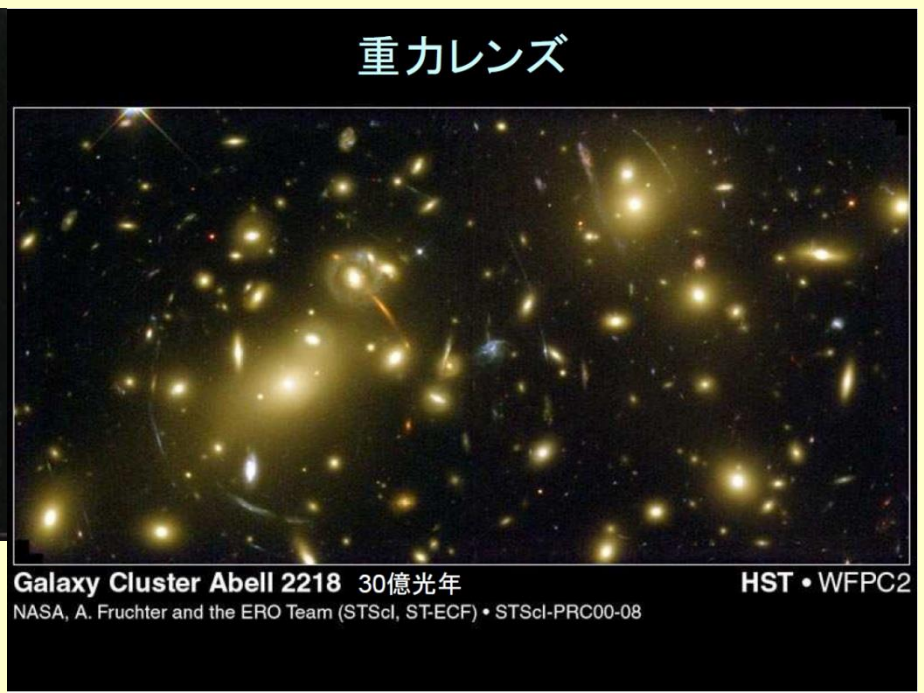
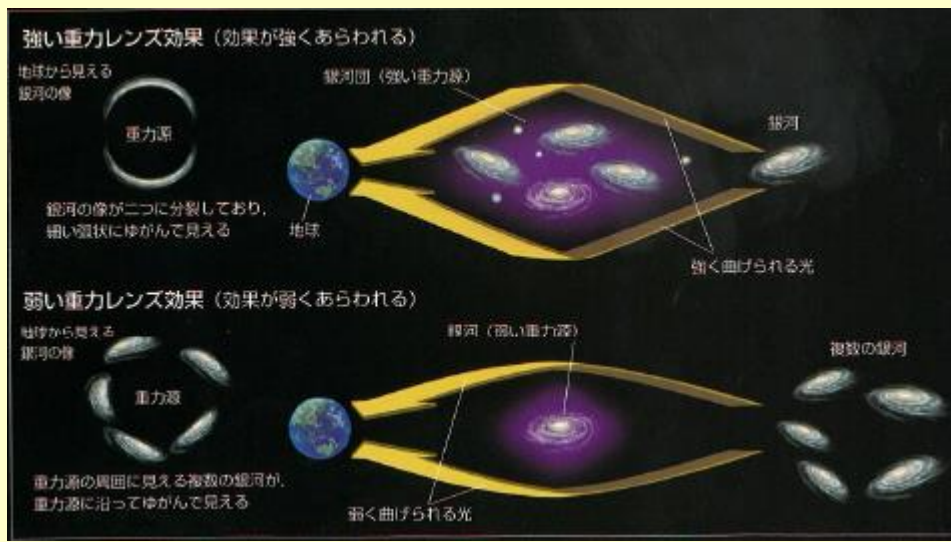
重力レンズ効果とは？

重力物質があると、
一般相対論的効果(時空のゆがみ)により
そばを通る光は曲げられる。



○銀河団により背後の銀河のイメージ像が歪む

=> 像の歪みから銀河団に含まれる物質分布、つまりダークマターの分布も間接的に分かる

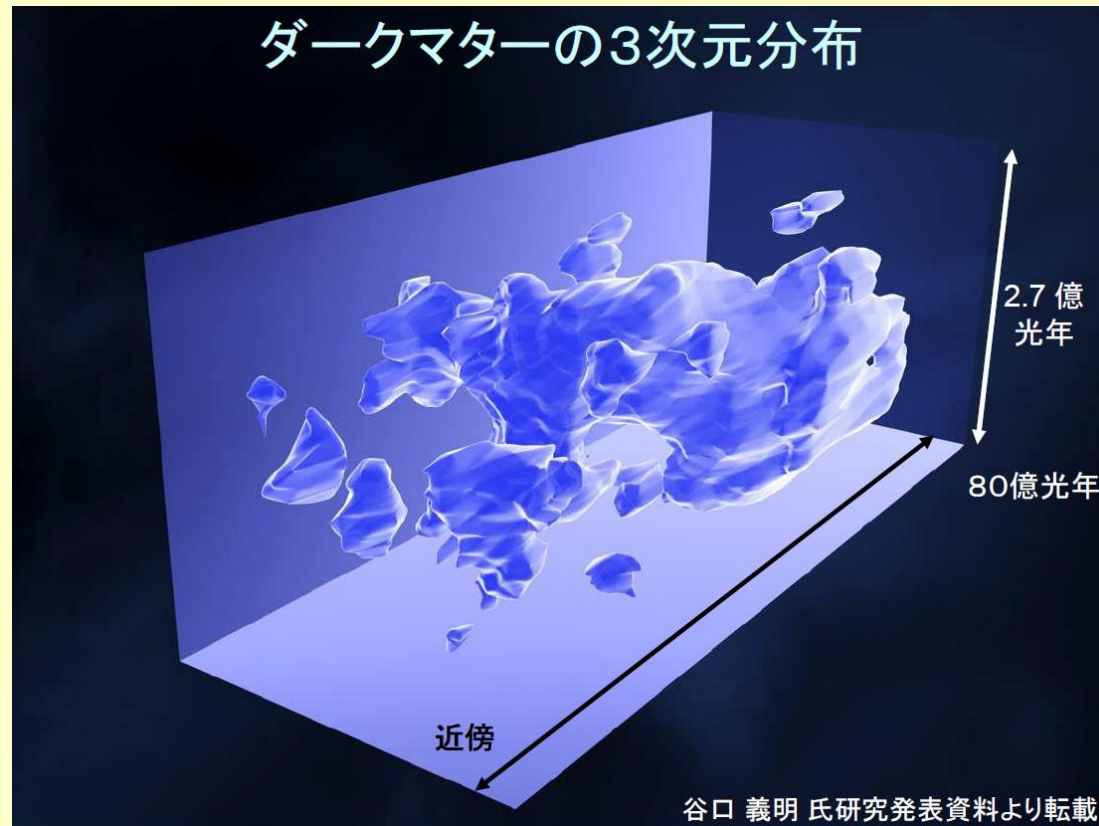


★COSMOSプロジェクト:国際的なプロジェクト

ハッブル望遠鏡 (NASA) 、すばる望遠鏡などを使用

重力レンズ効果

レンズ効果を引き起こす重力源の多くは、ダークマター
→ダークマターの3次元分布が分かる。



→銀河の3次元分布とほぼ一致。銀河はやはりダークマターに付随している。

◎天体の運動を用いたダークマター探査

- * 天の川銀河の円盤構造を大きく取り囲むハロー内のサブ構造であるサブハローの特徴の違い
→ダークマターの種類の違い

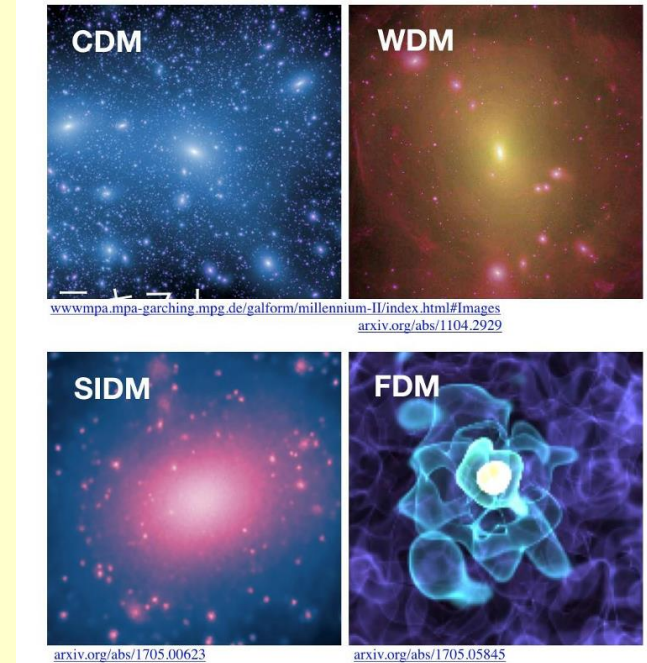
- ・天の川銀河のハロー内のサブハローの個数
- ・天の川銀河のハロー内を運動する星団や矮小銀河が引きのばされた恒星ストリームの構造の違い



- ・いずれも星の空間分布と速度分布の情報を用いて、サブハローの同定や恒星ストリームの同定を行う。

- * 矮小銀河にある星の空間分布、速度分布の構造
→重力場→ダークマターの空間分布を復元

すばるPFS計画で観測予定



安藤真一郎氏
(<https://member.ipmu.jp/DarkMatter/plan-c02.html>)

★加速器での生成

ダークマターの質量より加速器のビームのエネルギーが大きい場合



ダークマターが生成できるかも

現在、WIMPの質量想定範囲の $10^{-23} \sim 10^{-21}$ g のダークマターを探索できる加速器

→CERN研究所(@フランスとスイスの国境)にあるLHCのみ

10^{-24} g 以下のダークマターを探索できる国内の加速器

→高エネルギー加速器研究機構(@つくば)のSuperKEKB

現在まで、加速器でダークマターは発見されていない

★地球上や天の川銀河中心での直接・間接検出

◎地上での直接検出

ダークマターが他の物質と**ごくまれに**おこす衝突の痕跡をみつけて、地球上にあるダークマターの証拠をとらえる。

世界でいくつかの計画がある(XENON実験など)

例：XENON実験

イタリアのグラン・サッソ国立研究所の水深相当3100mの地下実験施設で行われている実験。日本からも東大、名大、神戸大の研究者グループが参加

ダークマターがキセノンの原子核と衝突

→光子発生

→光電子増倍管でとらえて信号にかえる。



◎天の川銀河中心での間接検出

ダークマターを検出できるとされる方法の1つ

→同物質同士が衝突した際の対消滅で生じると予測されるガンマ線を観測

しかし、ガンマ線は地上では観測できない

→宇宙から飛来して大気圏内の分子と衝突して二次粒子の空気シャワーを発生させた際に生じるチェレンコフ光を捉えることで、間接的に観測することが可能

ダークマターは重力の強いところに集まる

→地球に最も近い密集領域と想定されるのが、**天の川銀河の中心部**

* チェレンコフ望遠鏡「MAGIC」@スペイン・カナリア

諸島等ラパルマ島による

天の川銀河中心からのガンマ線観測

チェレンコフ望遠鏡は比較的、

“重い”暗黒物質である

10^{-21} g以上の探索を得意としている。



5.赤外線位置天文観測衛星 JASMINEで挑む ダークマターの謎解きとは？

★位置天文観測とは

天の川銀河内の**星までの距離**

星の運動



星の**立体地図**



星の基本情報

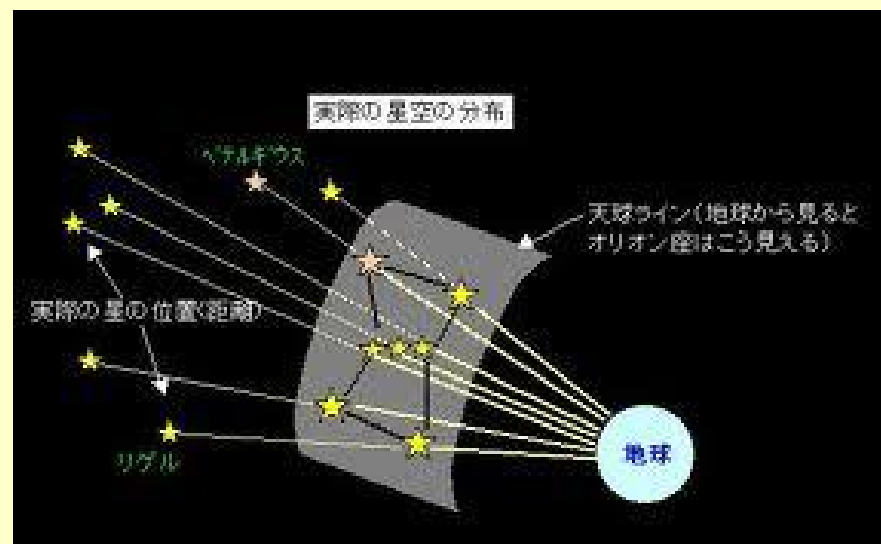
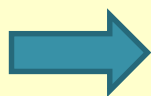
天文学、宇宙物理学の様々な分野の研究に関わるデータ



* 他の銀河は遠すぎて、個々の星の距離や運動速度は観測できない

* 星までの距離はどうやって分かるの？

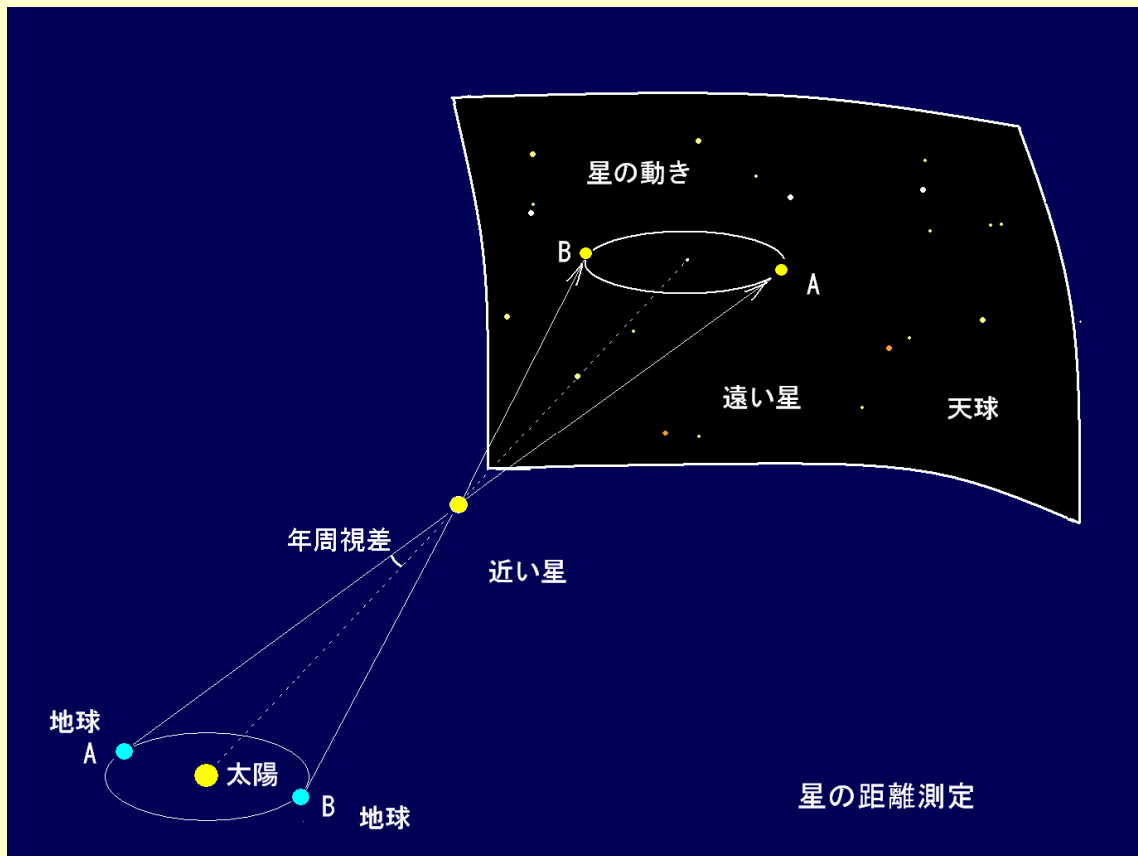
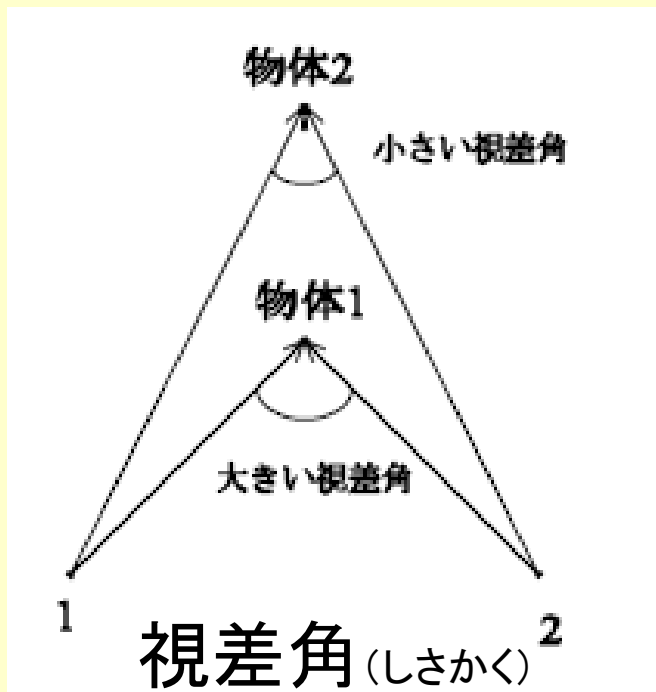
星座の星はお互い近くにあるわけではない。
距離はかなり違う！



○距離をきめる方法のしくみ

=> 三角測量(さんかく・そくりょう)

星までの距離を直接的に測る方法としてもっとも信頼できる方法



年周視差(ねんしゅう しさ)の大小距離がわかる



★ 星座を形作る星(恒星)も動いている！

星の運動

→ 星が、まわりの星やダークマターによる
万有引力(重力)の影響を受けて独自に運動
(秒速で数km~100km以上の場合も: 弾丸の速さ以上)



星は、非常に遠くにあるので、地球からみると天球上(夜空)での動きは、ゆっくり。



しかし、何万年以上もたつとその変化に気づく

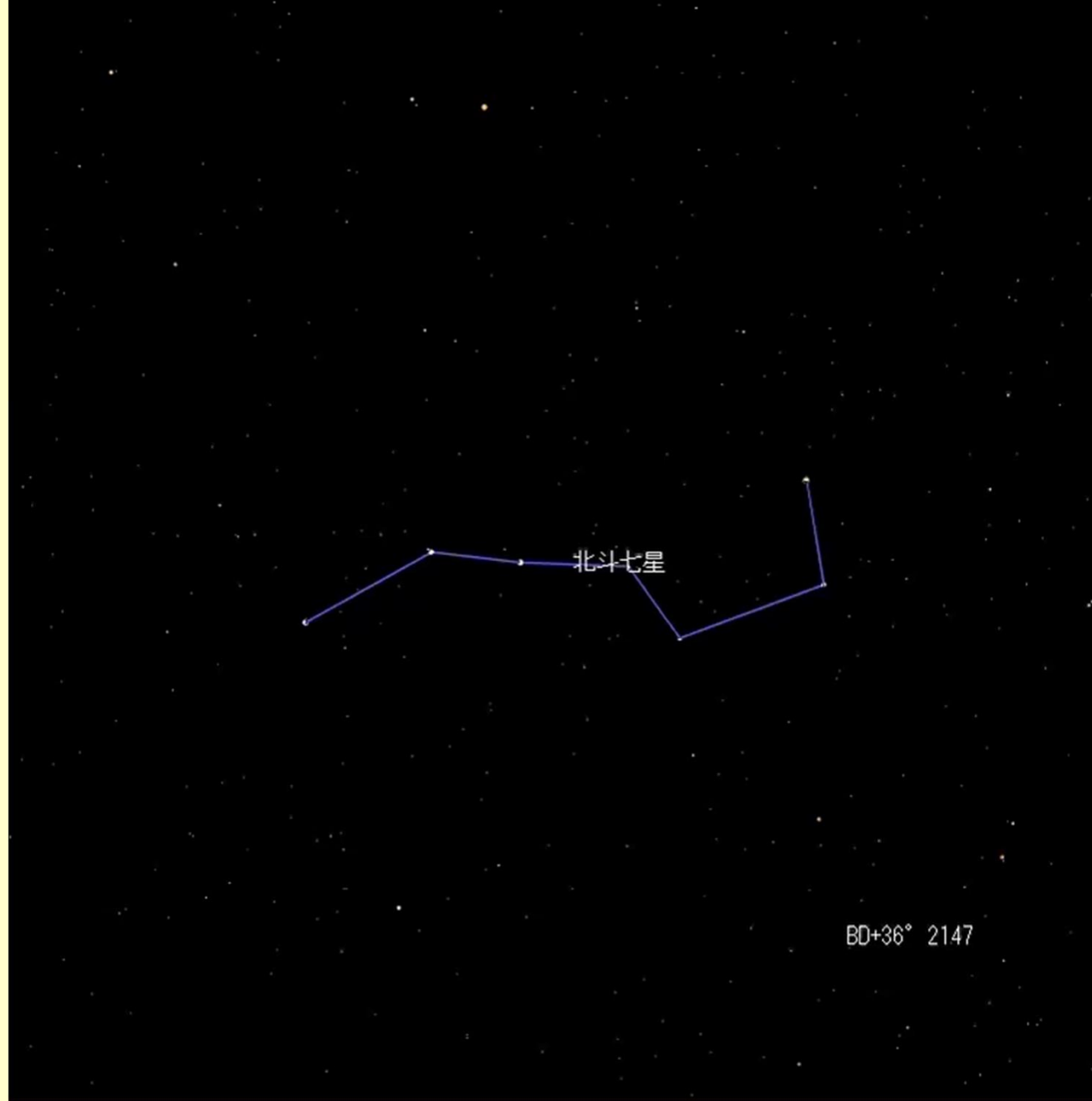


10万年後



北斗七星

未来へ



HippLiner

透視投映モード

見かけの等級

星座線描画

Epoch 0

秒速 10

光年

コマンド

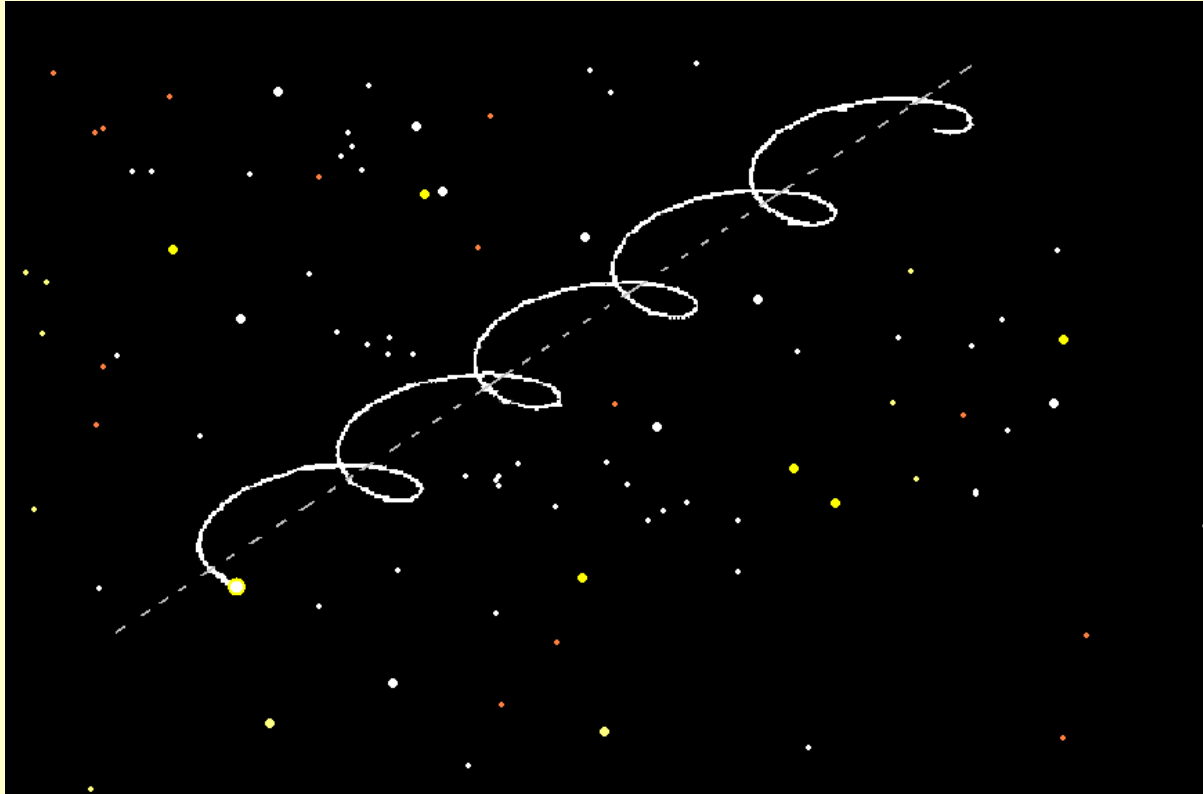
星座線種別

ふつうは、まるっぽい運動(楕円運動)

+ まっすぐな運動



恒星は、らせん運動をする



丸く動いているが、
その丸の大きさ



星までの距離
が分かる！

* らせん運動からずれる場合: 連星系、系外惑星の存在、重力レンズ効果
→ 逆にすれが検出できれば、系外惑星の質量などこれらの物理的特徴が分かる。

★星の天球上での位置と
その動きを測定
→位置天文学

星の立体地図と運動を知る！ →さまざまな宇宙の謎をとく！



位置天文観測は難しい！

* 実際の星の年周視差の大きさ

もっとも近い恒星であるケンタウルス座プロキシマ・ケンタウリでも、その年周視差は0.77秒角(4.22光年)

$$\begin{aligned} 1 \text{ 秒角 (びょうかく)} &= 1/3600 \text{ 度角} \\ &= 0.00028 \text{ 度角} \end{aligned}$$

* 天の川銀河の中心にある星(約2万6千光年)

$$0.000000035 \text{ 度} = 125 \text{ マイクロ秒角}$$

100km離れたところにいる人(例:東京から見て富士山頂にいる人)の髪の毛1本の太さ(ふとさ)を見込む(みこむ)角度(かくど)にひとしい。かみのけ

どのようにして、観測の精度を良くするか？

→これ自体が研究

→位置天文学

○位置天文観測の精度 (せいど) のうつりかわり

古代ギリシア、古代エジプト

測定精度

紀元前150年：ヒッパルコス（天文学者） 1000秒角

(1秒角 = 1/3600 度)

↓
1838年：ベッセル（年周視差の発見！！） ~0.1秒角

* 地動説の直接証拠

↓
1980年代：地上にある望遠鏡での観測 ~0.03秒角

↓
*地上での観測では、空気のゆらぎなどで精度があまり良くならない。
宇宙空間へ(ヒッパルコス衛星(ESA)：1989年打ち上げ)

人工衛星に望遠鏡をのせて宇宙空間から観測→位置天文観測衛星

1997年：ヒッパルコスカタログ
~0.001秒角

* 1ミリ秒角

2013年~2025年：ガイア衛星
~0.00001秒角



ガイア (Gaia) による位置天文観測の大革命時代がやってきた！！

ヨーロッパ宇宙機関

大型の位置天文観測衛星 Gaia (ESA) は革命的：

質 (10マイクロ秒角クラスの位置決定精度)、

量 (15億個以上の星) とともに画期的な星の位置、距離、速度情報が得られる時代になってきた！



天の川銀河の研究が大進展！！

Gaia

Credit: ESA

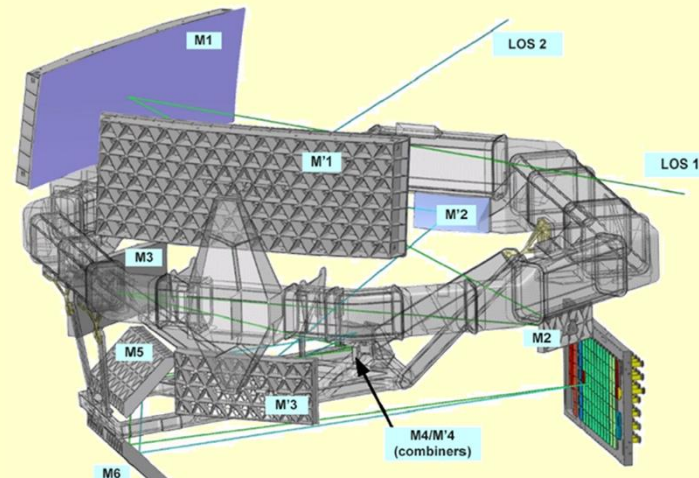
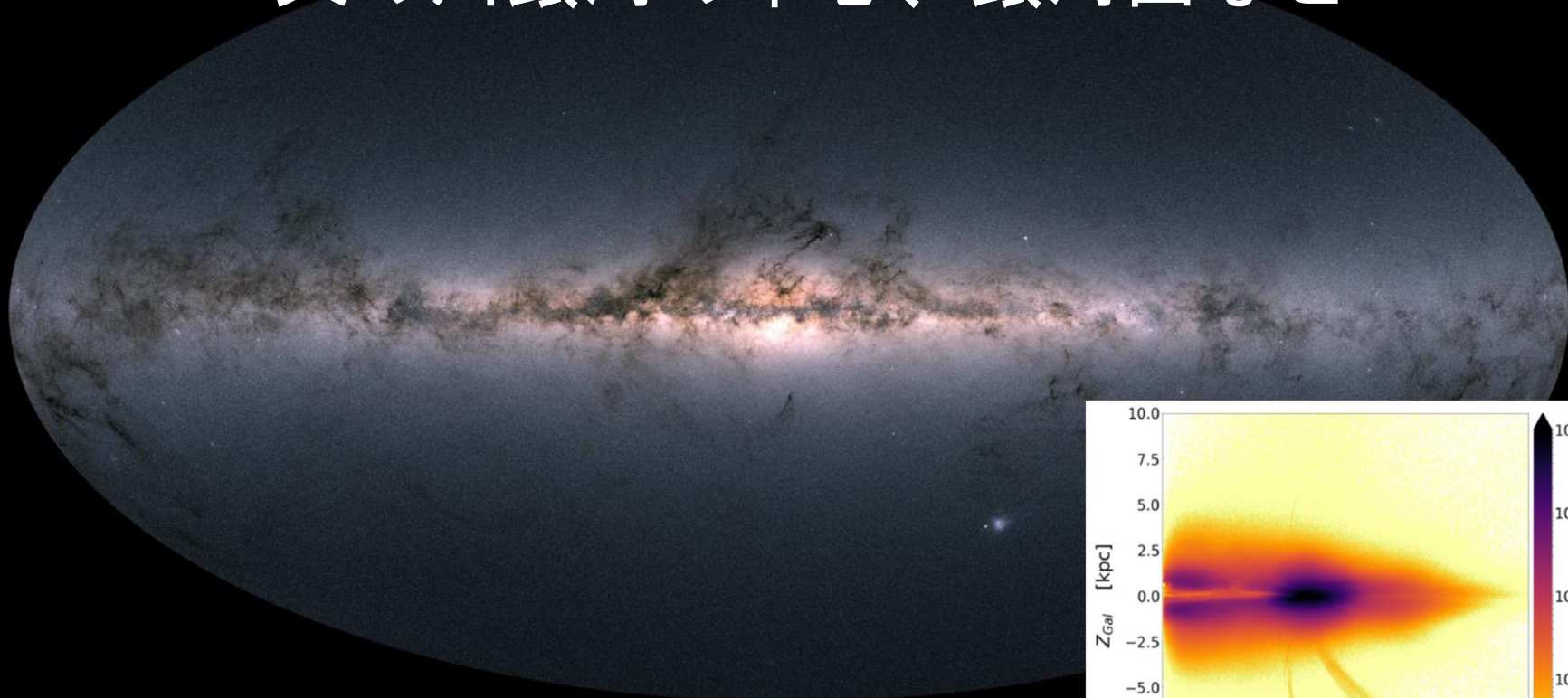
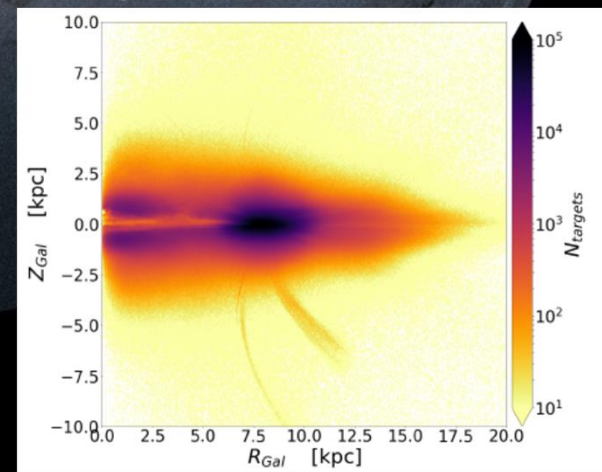


Figure courtesy EADS-Astrium

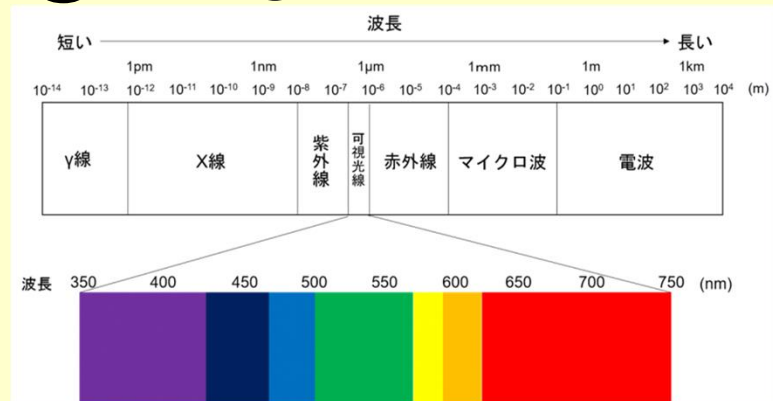
Gaiaでは、よく見えないところが！
天の川銀河の中心、銀河面など



Gaia DR2 (2回目のデータ) : 2018年4月
Gaiaでみた天球の星



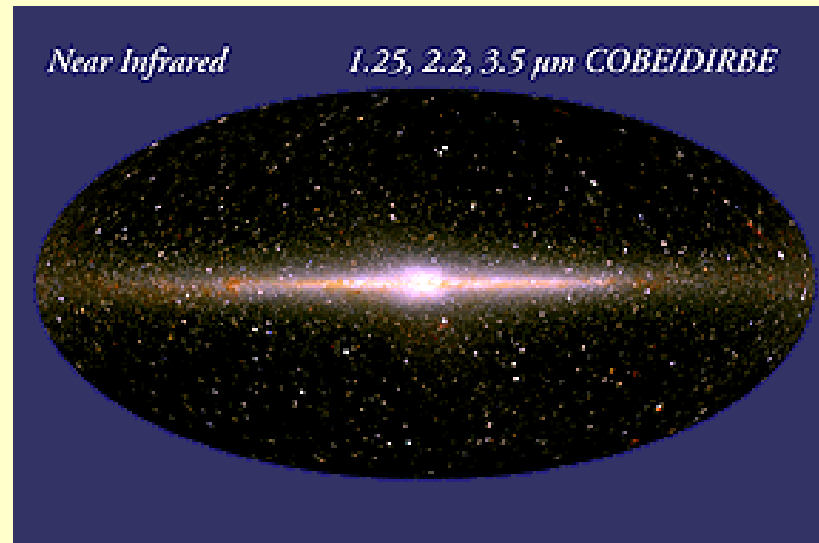
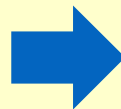
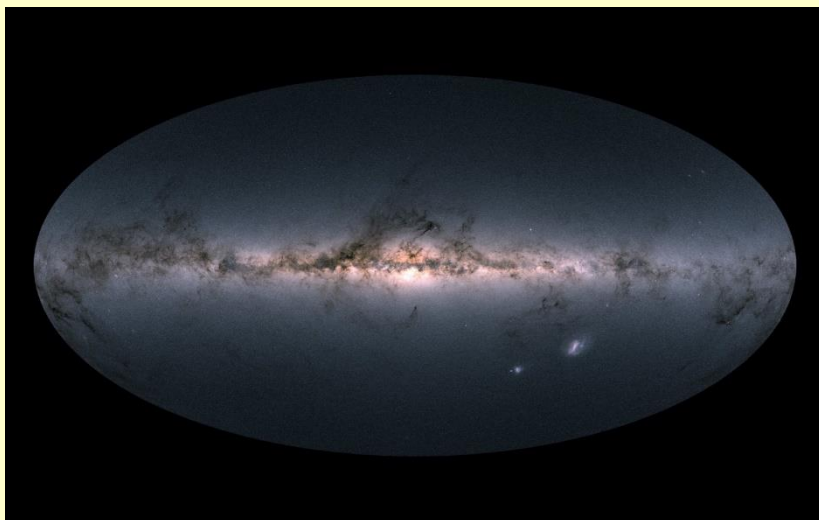
星自体の動きを測定するには 可視光 (かしこう) から 近赤外線 (きんせきがいせん) がちょうど良い

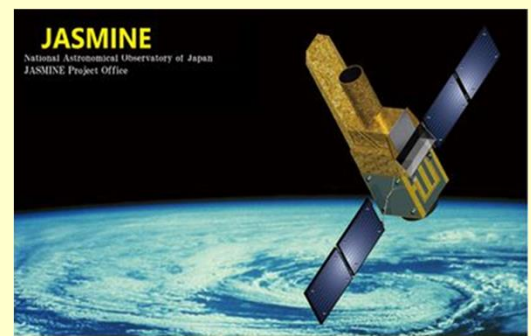


可視光による観測

(塵に覆われて可視光では観測しにくい領域がある)

赤外線による観測例





JASMINE

Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared EXploration

赤外線位置天文観測衛星計画 (けいかく)



赤外線による観測

(波長 (はちょう) : 1.0 ~ 1.6 ミクロン)

JASMINEミッション



こうぼがた こがた けいかく
◎JAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画という
カテゴリーの衛星計画(イプシロンロケットでの打ち上げ)
での実現を目指している。



◎2019年5月、JAXA宇宙科学研究所
により公募型小型3号機に選定された。



Credit: JAXA

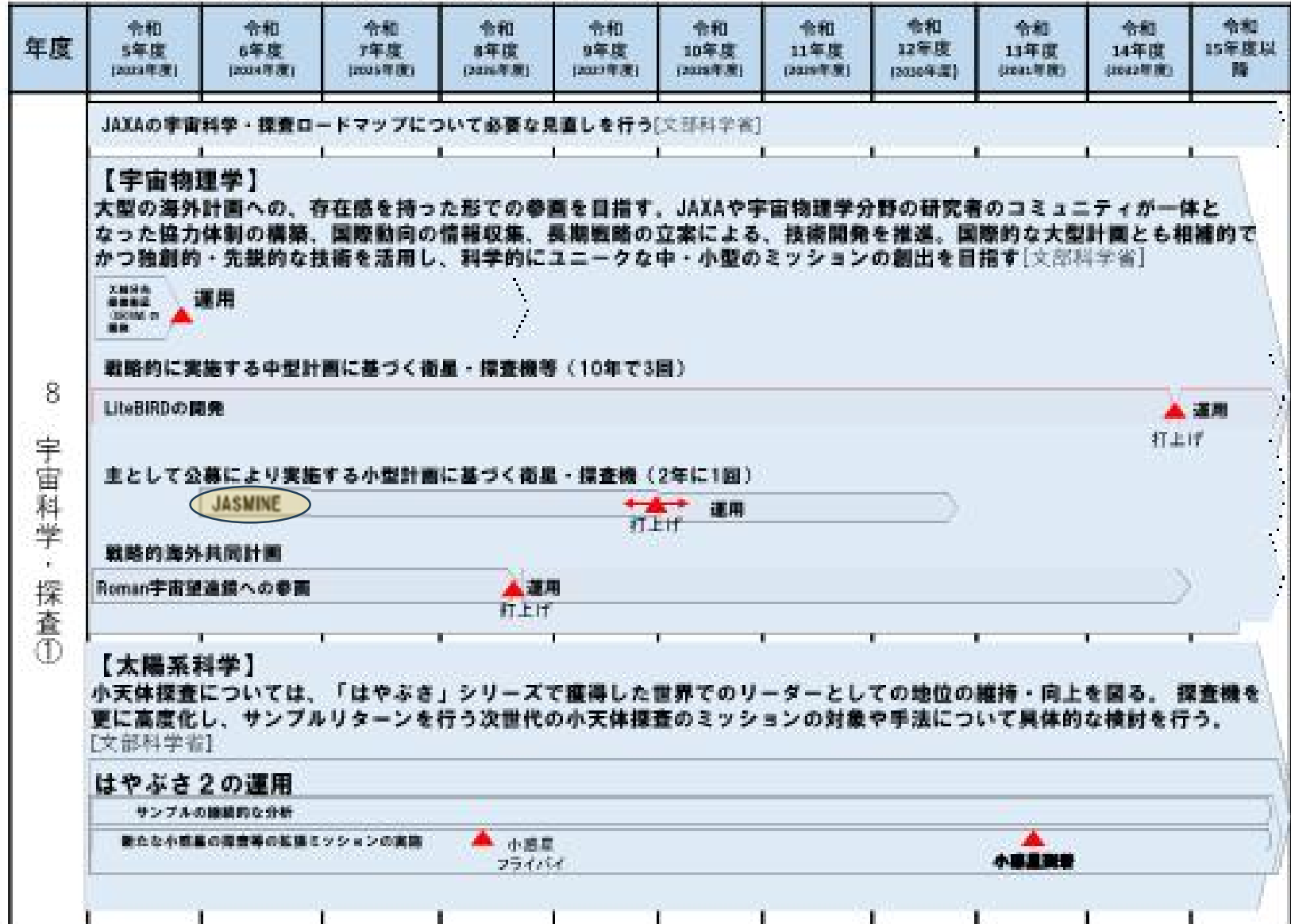
打ち上げ時期は、
現在、内閣府で決定された
宇宙基本計画工程表(2023年12月改訂)では
2028年に位置付けられている。

イプシロンロケットでの打ち上げ(内之浦)

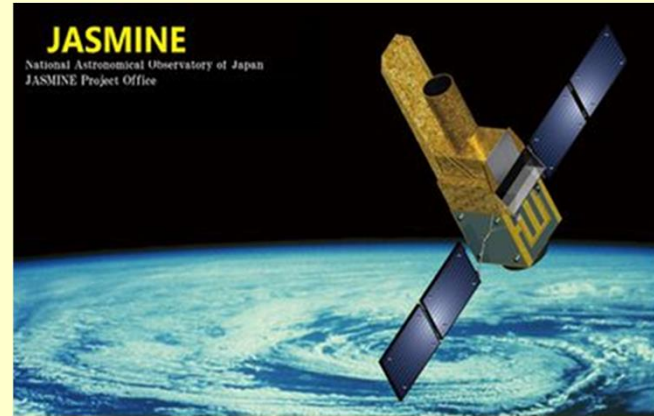
宇宙基本計画工程表(令和5年12月改定案)より抜粋

うちゅう きほん けいかく こうてい ひょう 内閣府宇宙戦略開発本部(首相が本部長)が決定

(3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造



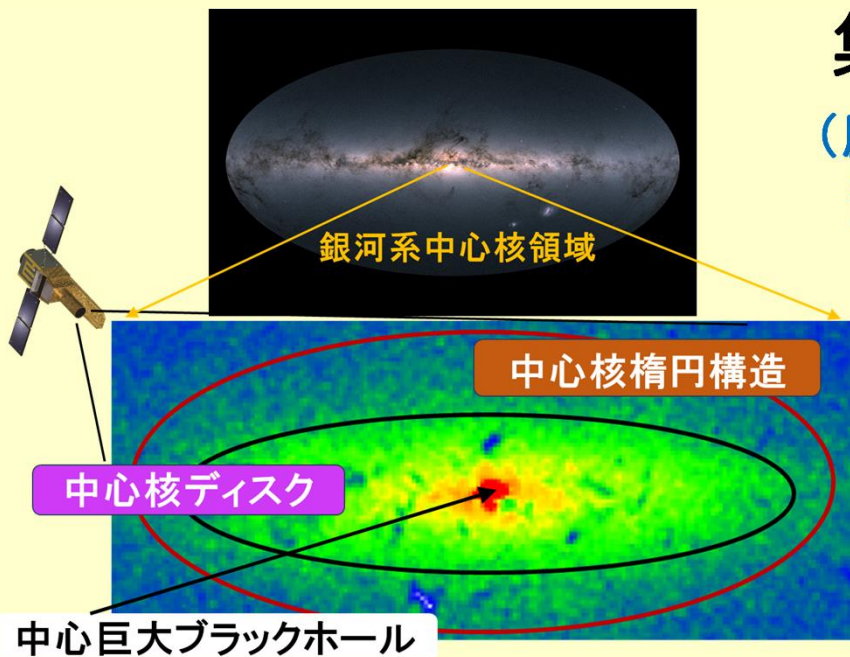
JASMINE衛星！



0.000025秒角 (=1億4千万分の1度角
=0.00000000069度角)クラスの精度！！

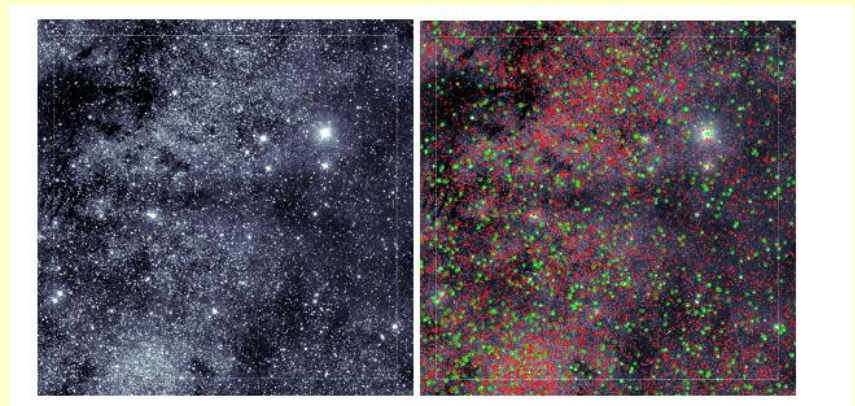
* 100km離れた場所にいる人の髪の毛1本の太さの
5分の1程度の大きさを見込む角度に相当

赤外線による観測

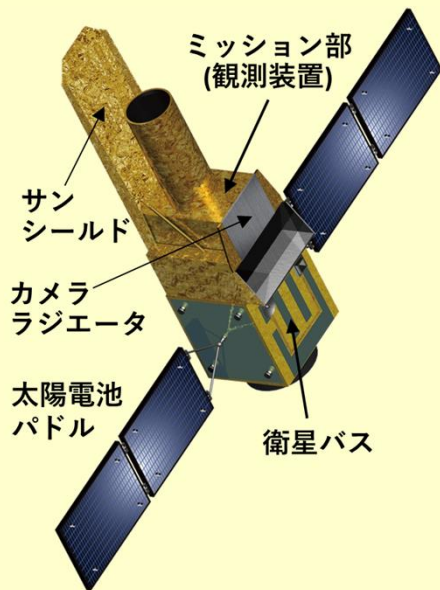


天の川銀河の中心部
(中心核領域)を
集中的に観測

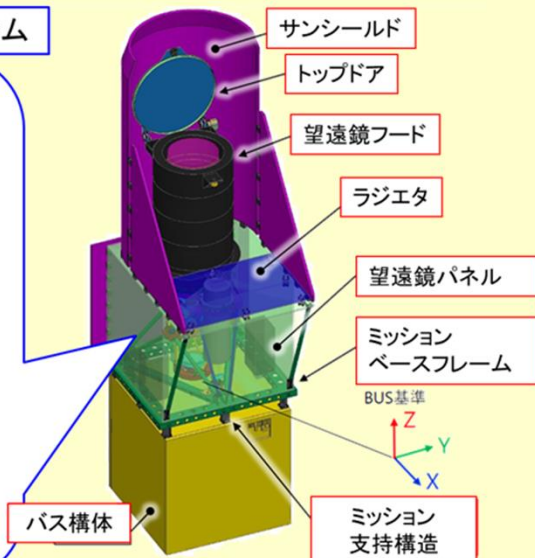
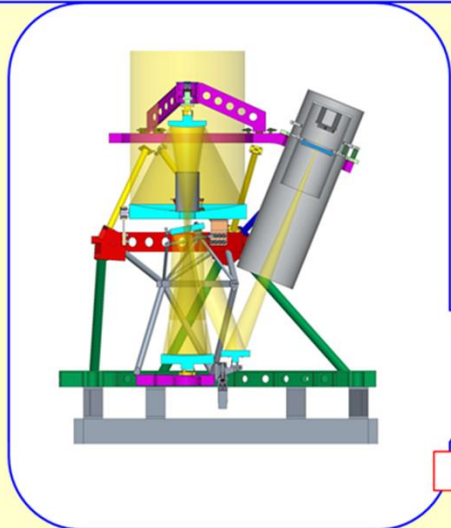
(塵(ちり)に覆(おお)われて可視光では
観測しにくいところ)



JASMINEはどんな観測装置なのか？



望遠鏡魔パネル内の望遠鏡システム



(MELCO提供)

望遠鏡の鏡の直径(もっとも大きいもの)主口径:36cm程度

赤外線カメラ:地上での天文観測用に開発された高性能な国産カメラを宇宙でも使えるように開発中

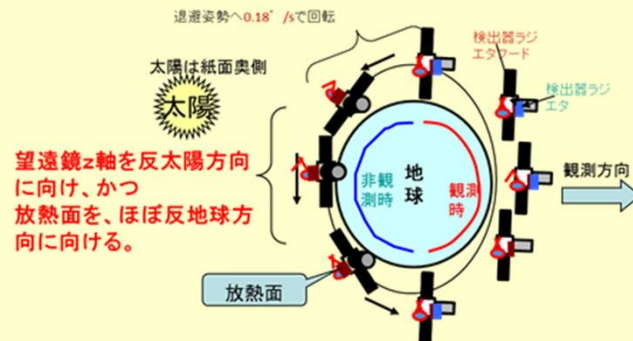


たいよう どうき きどう

昼と夜のさかいめ

軌道:太陽同期軌道(高さ約550km以上)

観測期間:3年間程度

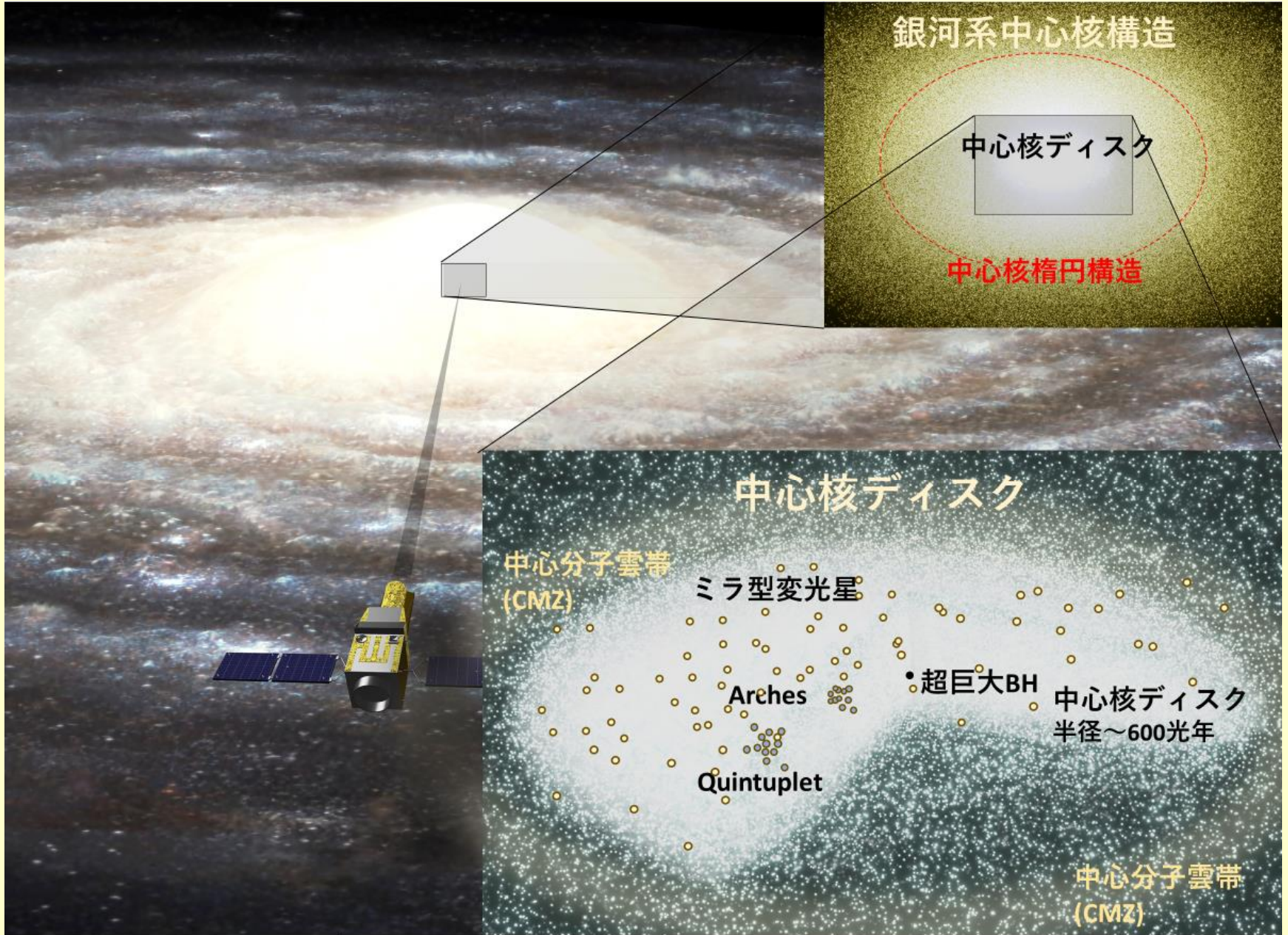


★JASMINEで解き明かす様々な謎

天の川銀河の中心核領域の星の距離と運動を観測

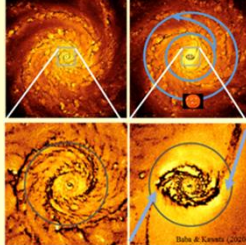


天の川銀河の中心核領域



何が分かるの？

★中心核ディスクの年齢

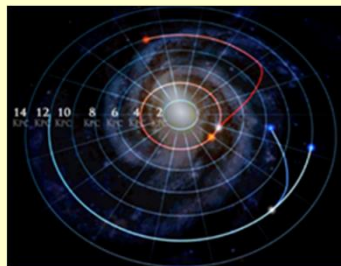


バー構造の形成時期



太陽系の移動解明

内部から外側に
移動を開始 (!?)



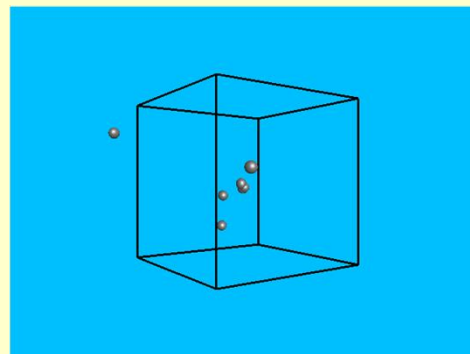
惑星形成
に影響!?

気候変動?
生命進化?
人類誕生?



★100億年以上前の天の川銀河誕生時の様子

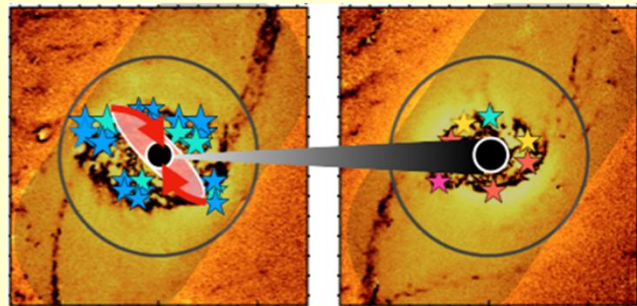
当時に形成された星々の
運動の様子がそのまま残っているかも？



★むかしにいくつかの巨大ブラックホールが
中心領域へ落ち込んできた
名残(なごり)の発見(?)

★中心にある超巨大ブラックホール
の重さが増えてきた理由が
分かるかも

★中心にある**ブラックホール**の探査



★そして、ダークマターの探究

WIMPの探査

* チェレンコフ望遠鏡「MAGIC」@スペイン・カナリア諸島等ラパルマ島による
天の川銀河中心からのガンマ線観測

仮にダークマターを検出しても、その質量、反応のしやすさは、
すぐに分からない

* 一定の時間間隔での検出回数は、
ダークマターの個数密度(質量密度÷質量)、
運動速度、反応のしやすさに依存する。

↓

天の川銀河の中心領域でのダークマターの質量密度、運動速度
の情報が必要！

↓

重力から分かる

↓

星の空間分布、運動分布

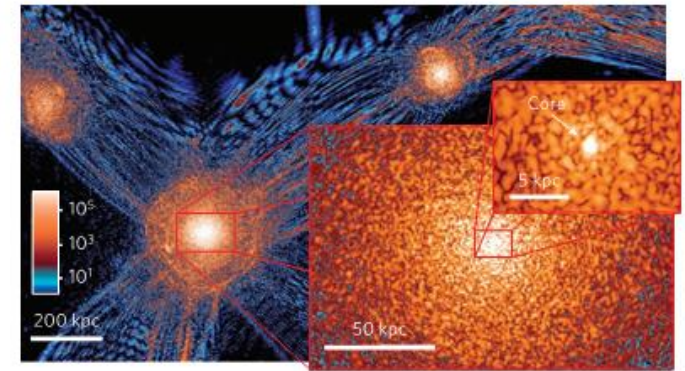
↓

JASMINE

さらに、ファジーダークマター探究

超軽量ダークマターによる構造形成

非常に軽質量のダークマター候補
質量 $\sim 10^{-55}g$



Schive, et al. Nature Physics 2014

○大きなスケール \rightarrow 通常の冷たい
ダークマターと同様のふるまいをする。

○小さなスケール \rightarrow コア構造を形成する。

* 波としてふるまう大きさ(ド・ブロイ波長のサイズ)
 ~ 600 光年 \rightarrow 天の川銀河の中心核領域

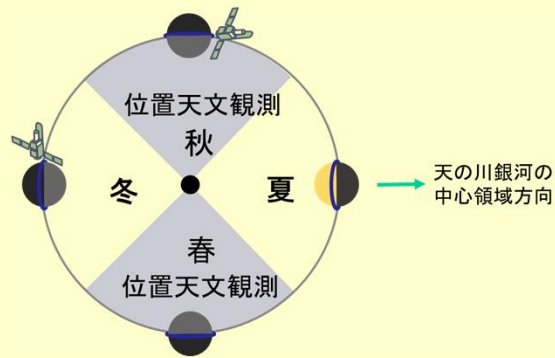
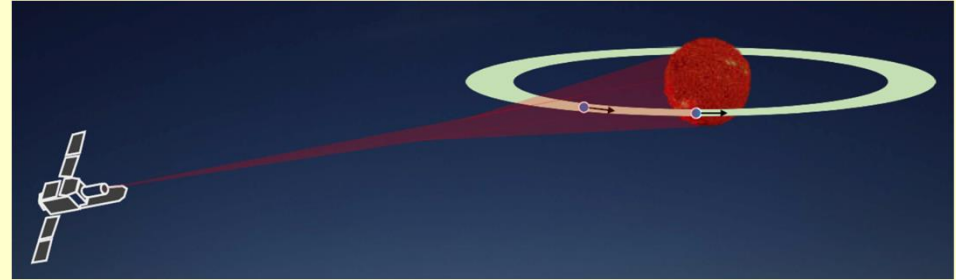


JASMINE

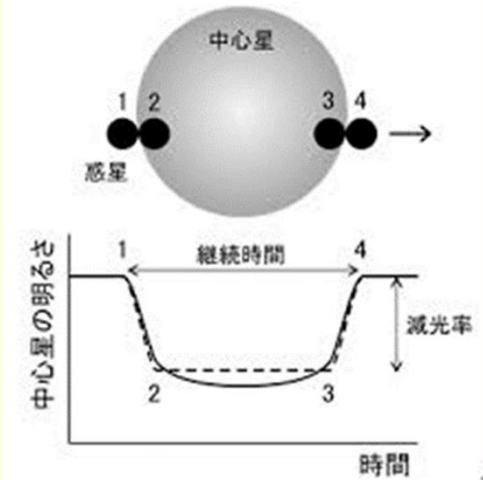
参考：JASMINEによって、生命が住んでいる可能性のある地球に似た惑星がみつかるかも！

春、秋：位置天文観測（天の川中心）

夏、冬：惑星探査（ターゲット星）



太陽より
1/5程度小さく、
温度が低くて赤い星が
ターゲット



Credit:天文普及研究会



Credit:ESO

惑星が星の前をとおると、
星の明るさが、ほんのすこし
暗くなる
→惑星を発見できる！！

今後・・・

たくさんの観測、

実験などの進展

ダークマターの発見！

そして、新しい宇宙像が
見えてくるだろう

* 天体現象の解明だけでなく、物質や力の究極に関する研究の進展が期待できる。

JASMINEの観測データ
=>世界の知的財産
21世紀の銀河鉄道

ジャスミンへの応援も
よろしくお願いします！！

皆さんに少しでも興味をもってもらえれば嬉しいです。

ありがとうございました

Jasmine

