

# 宇宙の起源と進化

**Julieta Fierro, Susana Deustua, Beatriz García**

*International Astronomical Union,*

*Universidad Nacional Autónoma de México, México*

*Space Telescope Science Institute, USA*

*ITeDA and Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*



# 時間・空間全体を考える

空間

物質

エネルギー

時間



宇宙は絶え間なく姿を変えている。  
宇宙に存在する個々の天体は変化する。

私たちの見方・考えもまた変化する。



宇宙を定量的に観測し、科学的に研究することができてから100年足らずである。



ここ数十年間は、情報から研究することができるようになった。かつては推測にすぎなかった。



# かつて、宇宙は もっと素朴に考えられていた

宇宙がどのようなものか、昔の人も考えてきた。以下のように、平たい地面が、いろいろな動物たちに支えられているといった考えがあったかもしれない。動物たちが動いて地震が起こるといった考えがあったかもしれない。



# 素朴な考えの検証

もし地面が巨大な動物たちに支えられているのなら、その影が月食の時にみえるはずだろう。

月食で見える影がいつも丸いことは、その影を作るものが球体ということである。



# 科学による進展の方法

- 振り返り・熟考
- 自然界に対する疑問を立てる
- 実験・観測
- 結果を考察、モデル化や理論化
- 出版を通して新しい知識が共有される。
- 第三者が検証し、結果がより確かになっていく。失敗からも学ぶことが多い。

# ビッグバン標準モデル

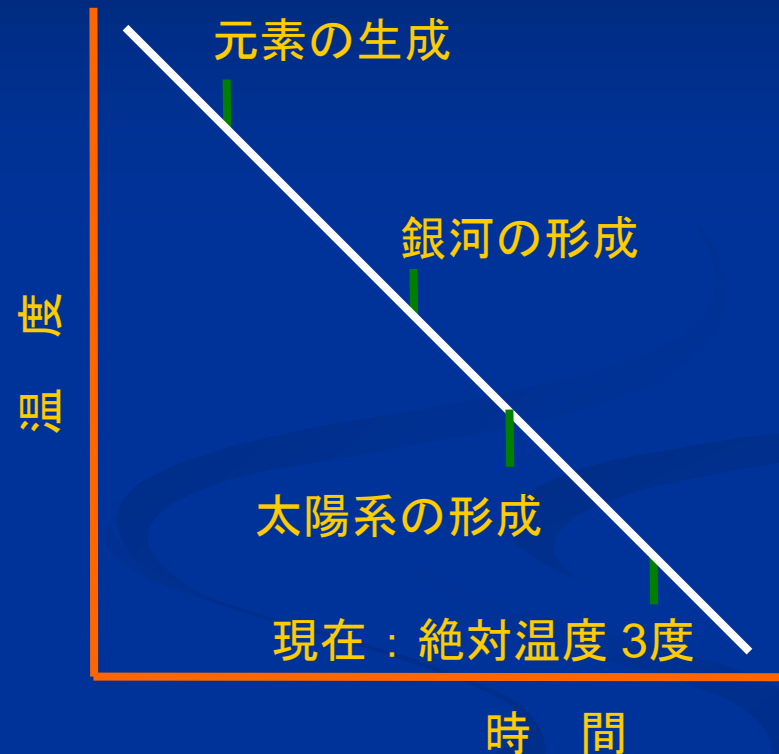
- 以下の観測結果を、最も単純明解に説明するモデルである。
  - 宇宙の膨張
  - 宇宙背景放射
  - 宇宙の元素組成
  - 大きな空間尺度で見た一様性
- ビッグバンに対抗するモデルも提唱されてきた。



- 科学は、真実を得たと主張するより、改訂を繰り返す作業である。

# 宇宙の膨張

- 宇宙は138億年前に誕生した。
- 高温でエネルギーの密度が高い状態から始まったと思われる。
- 宇宙はその後、膨張し、冷えていった。
- その最初の時期、満ちていたエネルギーの一部は、物質に姿を変えていった。



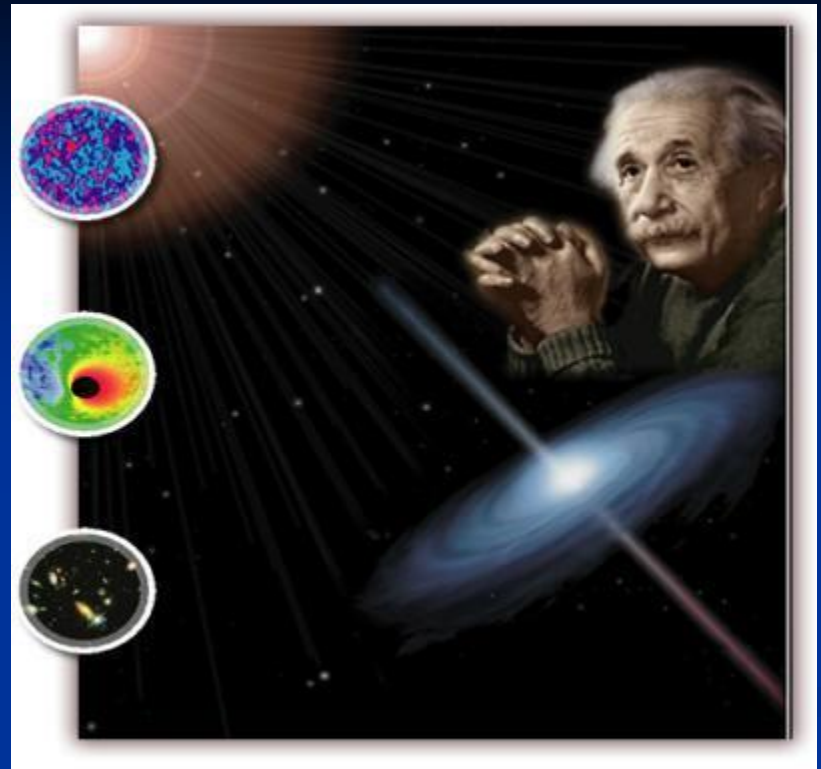
(縮尺までは考慮していない)



地上で研究された物理学を宇宙に応用したものが、宇宙物理学である。

アルバート・アインシュタインは、エネルギーは物質に変換されることを示した。逆もまた同様である。宇宙創成期には、満ちていたエネルギーの一部が物質に変換された。

星の内部では物質がエネルギーに変わって、星は輝くのである。



質量とエネルギーの等価性

$$E = m c^2$$

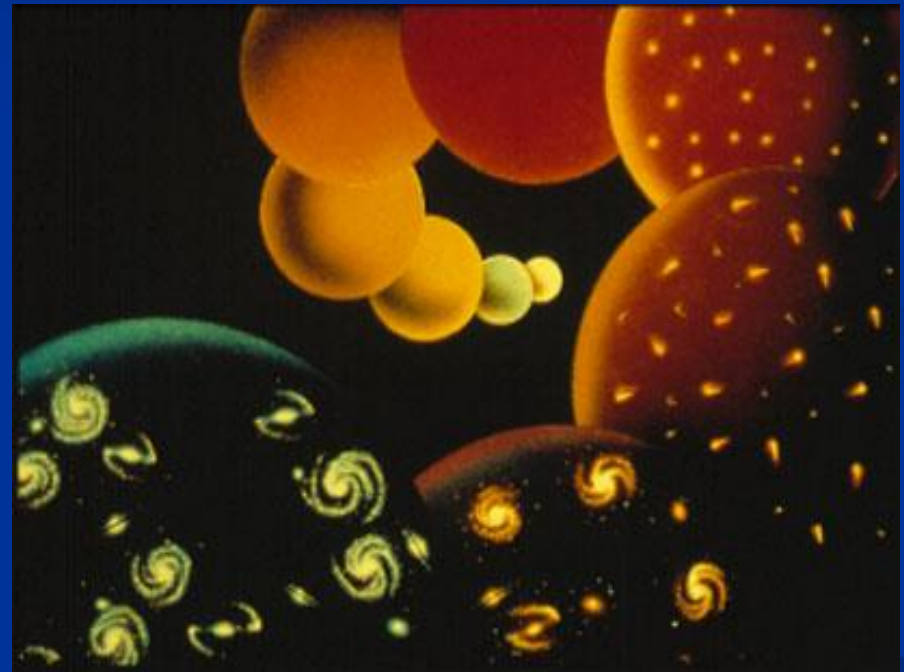
物質として：クォーク、レプトン  
陽子 (p<sup>+</sup>)、中性子 (n)、電子 (e<sup>-</sup>)



# 宇宙の最初の時期 すべての物質は電離していた

電離していたものは再結合して、中性の原子になった。

原子は集まって雲を作り、その雲から最初の星々、そして最初の銀河が作られた。



その後、（地球のような）岩石惑星が形成され、最初の生命が誕生した。

# 化学進化

最初の数分間の内に電子、ニュートリノ、陽子、中性子などが出現し、最も単純な原子（H, He）の原子核が作られていった。

H 原子核は陽子（ $p^+$ ）からできている。

H 原子核4つから種々の反応を経て  $He + 2\nu + 2e^+ + 2\gamma$  へと合成された。  
He 原子核    ニュートリノ    陽電子    ガンマ線光子

- 残りの元素は、核融合によって主に星の内部で徐々に形成された。
- ウランのような非常に重い原子は、超新星爆発や中性子星連星の合体といった極端な高エネルギー環境で形成された。
- ビッグバンのあと、時を経て、水素やヘリウム以外の元素が星の進化によって形成された。



# 物理学と宇宙論

日常生活の物質は、陽子や中性子の構成要素であるクォーク、レプトン（最もよく知られているものの一つが電子）、そして電磁気のような相互作用で説明できる。

族			相互作用
レプトン	電子	ニュートリノ	電磁気力
クォーク	アップ	ダウン	強い力
バリオン	陽子	中性子	弱い力、強い力

モデルが単純であり、初期の宇宙がどのようなだったか、また、エネルギーから物質、物質からエネルギーに、どう変化したのかを理解しやすくなっている。



# 観測によって分かること

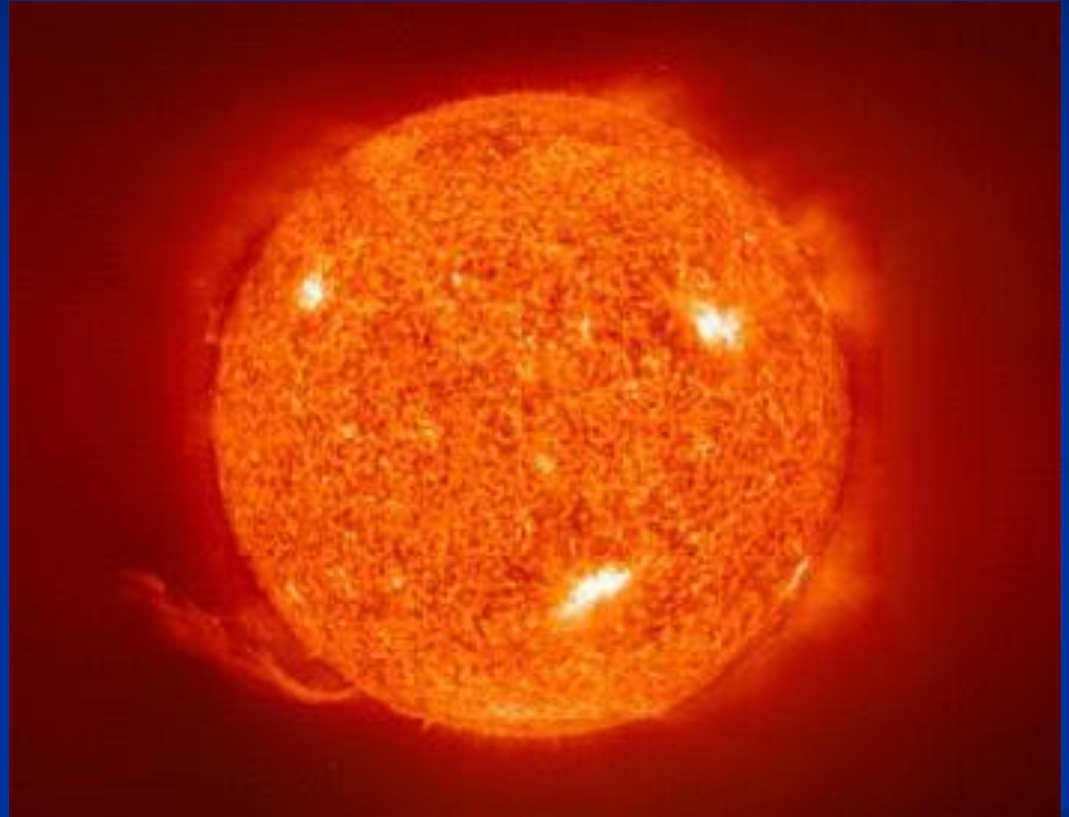
- 天体の物理的性質
- 大きさと距離
- 時間と年齢
- 宇宙の膨張率
- 背景放射の温度
- 元素組成
- 宇宙の構造
- 夜空が暗いわけ
- ダークマターとダークエネルギーの存在



# 太陽

明るく見え、詳しく見える太陽は、よく研究されている天体である。

太陽や他の恒星は、よくわかっている天体の部類である。



# 太陽系外惑星

過去十年間、他の恒星の周りに数千の惑星が発見された。

惑星が光を放っていたから発見されたのではなく、恒星の軌道や光度曲線を乱していたことから、恒星周りの惑星発見に至った。



# 生命



宇宙のもう一つの特性は生命である。しかし、まだ地球外生命体は見つかっていない。

生命が繁栄するためには水が必要であると考えられている。水は、物質の交換や複雑な分子の形成を容易にするからである。



# 星間物質

星の間の空間は真空ではなく、星間物質で満たされている。  
新しい星が形成される材料である。

星はガスや塵の雲の中で生まれる。雲は圧縮され、新しい星になる。新しい星たちは、一生の大部分を、中心核にある水素をヘリウムとエネルギーに変換することに使う。



その後、炭素、窒素、酸素といった、  
私たちのもとになる元素が作られていく。



# 太陽に似た星の一生



星が燃料を使い果たすと、星の中で作られた元素が、周囲の空間に放出される。星が世代を重ねていくと、星間物質には、こういったの元素がいっそう豊富になる。そこから次の世代の星が生まれる。



# 星団

数百から百万個の星が集団となっていることがある。



ジュエルボックス  
散開星団



ケンタウルス座オメガ星団  
球状星団

# 銀河

私たちが住んでいる銀河系のような渦巻銀河は美しい形をしており、1000億個以上の星が集まっている。それぞれの星に、惑星、衛星、彗星、ガス、塵を伴っている場合がある。銀河の質量の大部分は、いわゆるダークマターと思われる。

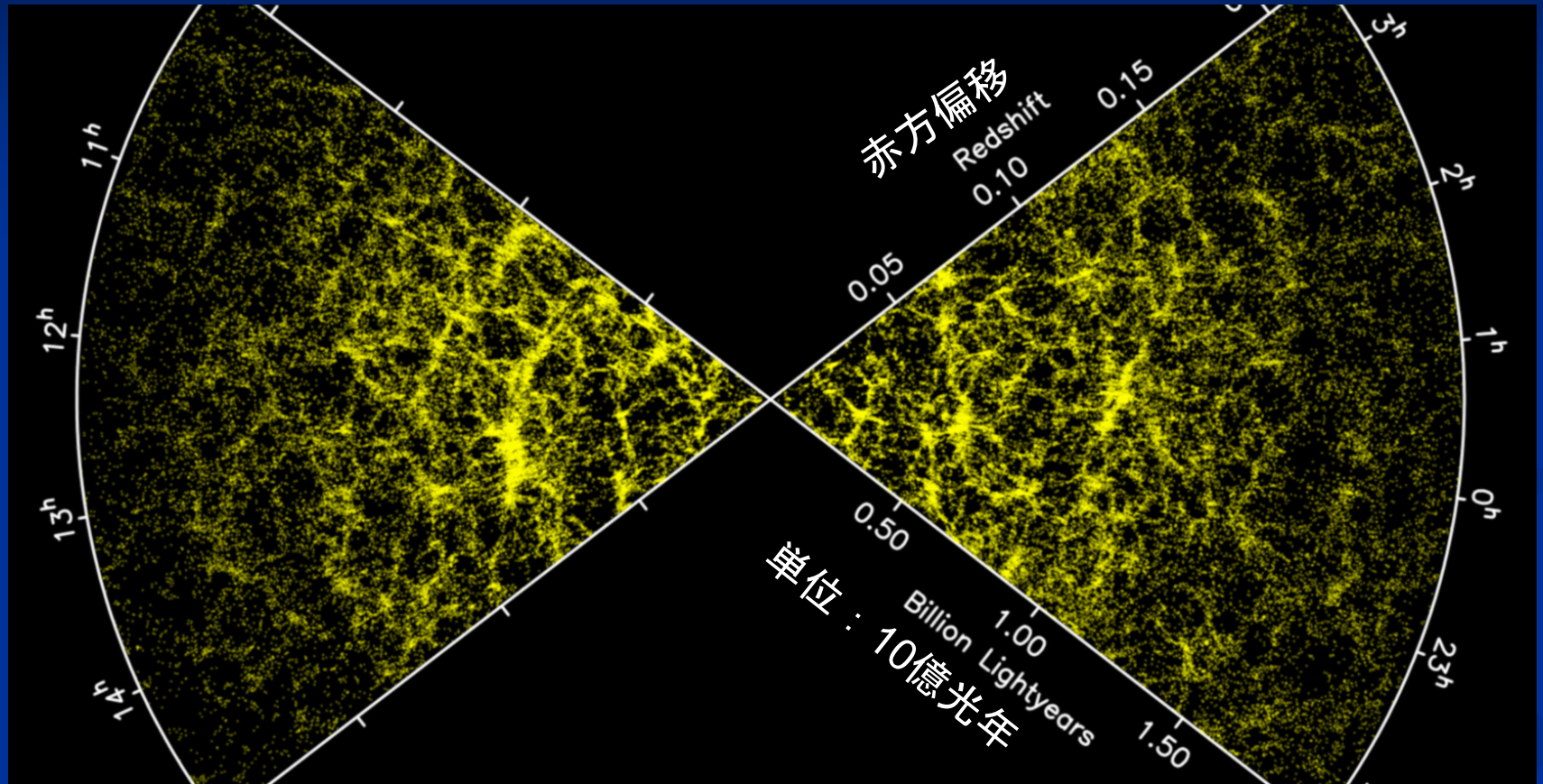


子持ち銀河

出典：ハッブル宇宙望遠鏡



# 宇宙の大規模構造



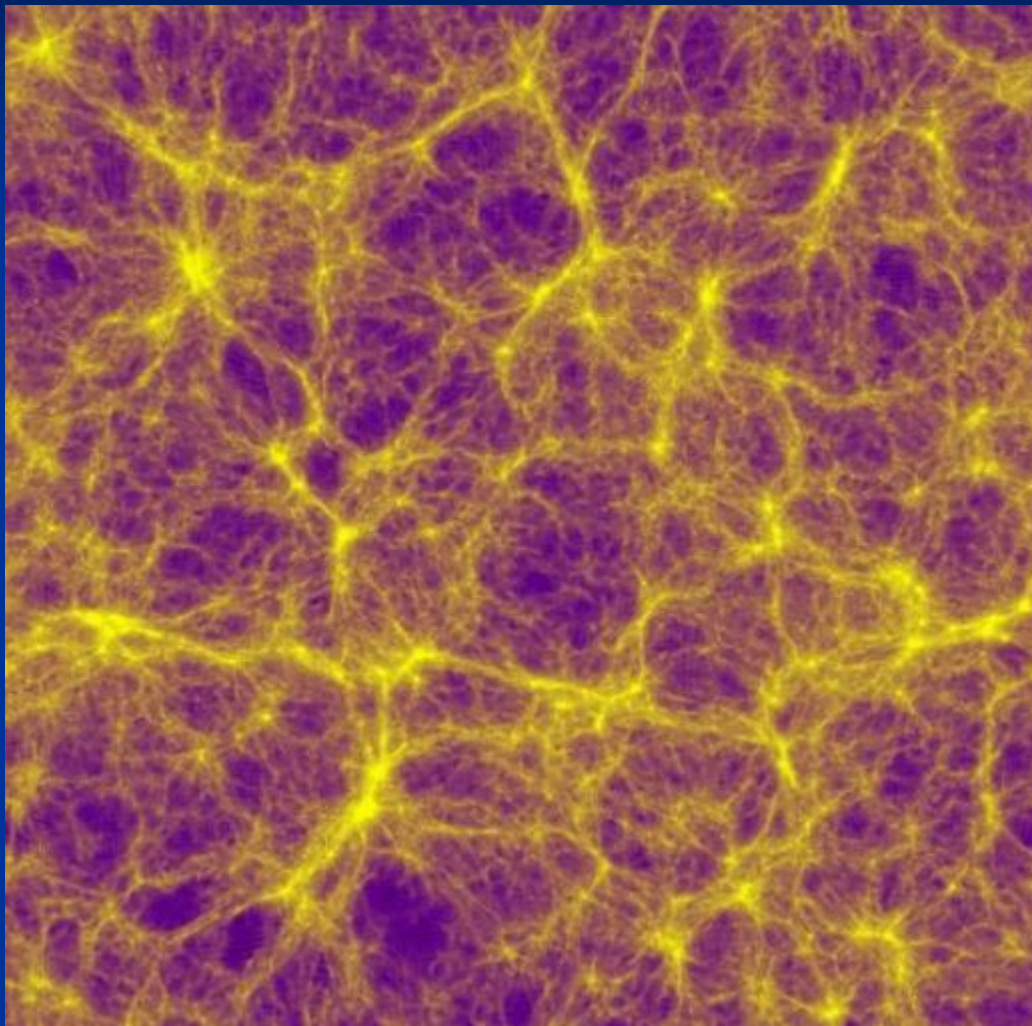
銀河の集団は、宇宙の大規模（泡状）構造と呼ばれる構造をなしている。

泡のお風呂を想像してみよう。銀河は泡の空洞を取り囲むかのように分布している。時間が経つにつれて、空洞の領域が増える。



宇宙が拡大するにつれて、銀河団の間も広がっていき、宇宙はどんどん希薄になっていく。

# 宇宙のフィラメント構造のモデル



銀河団と超銀河団は、泡の表面にいるかのように、フィラメント構造を作っている。

このような構造をモデルの中で計算して作ることもできている。

出典：Millennium Project  
マックスプランク研究所



# 宇宙の構造：階層

- 星は群をなしている。
- 星の群れは銀河の中にある。
- 銀河も群れを成している。群れは、小規模なものから大規模なものまで、ある。
- 宇宙の最大の構造は、銀河団と超銀河団によって形成されたフィラメント構造である（宇宙の大規模構造）。





# 宇宙の大きさ

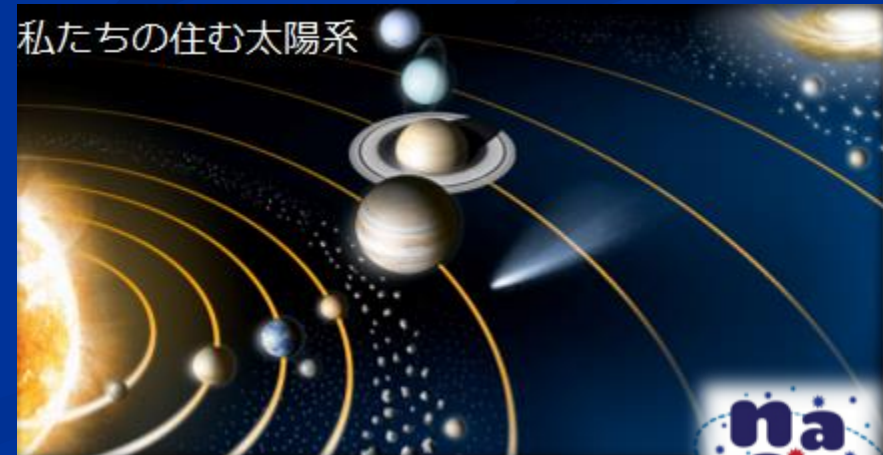
1メートルの長さは、  
子どもの身長くらい。  
1000倍すれば 1 km になる...



...その1000倍の 1000 km  
程度ならば、飛行機を使っ  
て数時間で横断することが  
できる。

月に行くには3日間、  
太陽と木星の間に行くには、  
数年が必要。

近くの星までの距離は、それ  
よりずっと遠く離れている。



# 宇宙の歴史年表

ビッグバン	138億年前
銀河形成	130億年前
太陽系形成	46億年前
地球上で生命誕生	38億年前
複雑な生物の出現	5億年前
恐竜の出現	3億5000万年前
白亜紀末の絶滅	6500万年前
現生人類の登場	12万年前

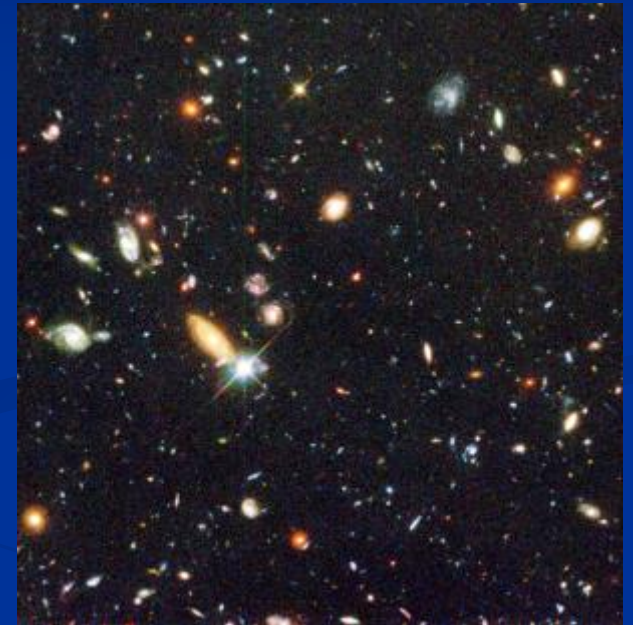
人類の出現は非常に最近である。



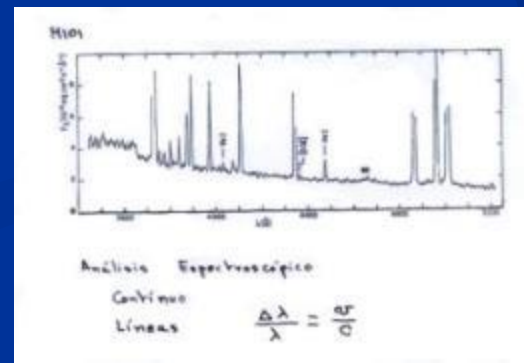
# 宇宙の観測

恒星の位置やようす、明るさを測定するために画像を撮影する。

スペクトルは恒星の移動速度を決定することができる。光のドップラー効果として知られているものである。恒星や銀河からの光を分析することで、その天体の性質について知ることができる。



(ドップラー効果)



# 標準モデルの柱

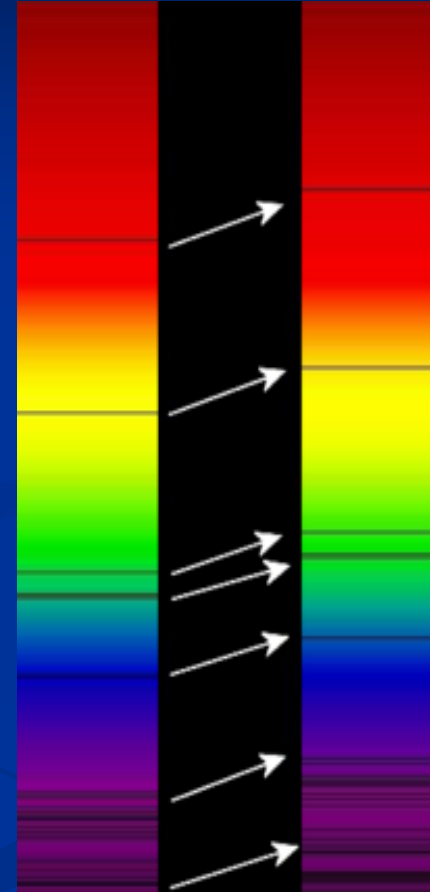
## 宇宙膨張

赤方偏移は空間膨張を示す(星が観測者に近づく場合、観測者が受け取る光は青い方へ、遠ざかる場合は赤い方へずれてしまう)。

銀河の群れは互いに遠ざかりつつあり、遠くにあるほど、より速く遠ざかりあっている。

## 宇宙における元素組成

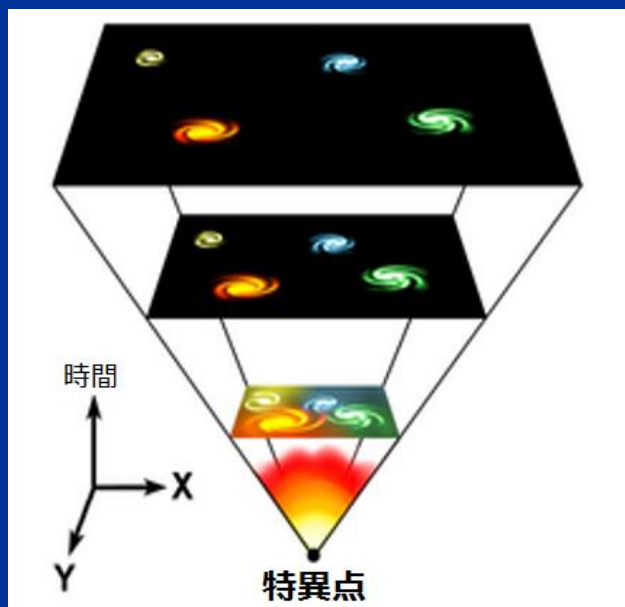
宇宙の最初の数分で、HとHeのみが形成された。宇宙が膨張していたので、それ以上の元素合成は行われなかった。温度と密度が低下し、満たされていたエネルギーから陽子や中性子に変換していくことができなくなった。星の中では、C, N, Oが作られ、星が死んだ時に星間物質と混ざり合った。



# 宇宙膨張



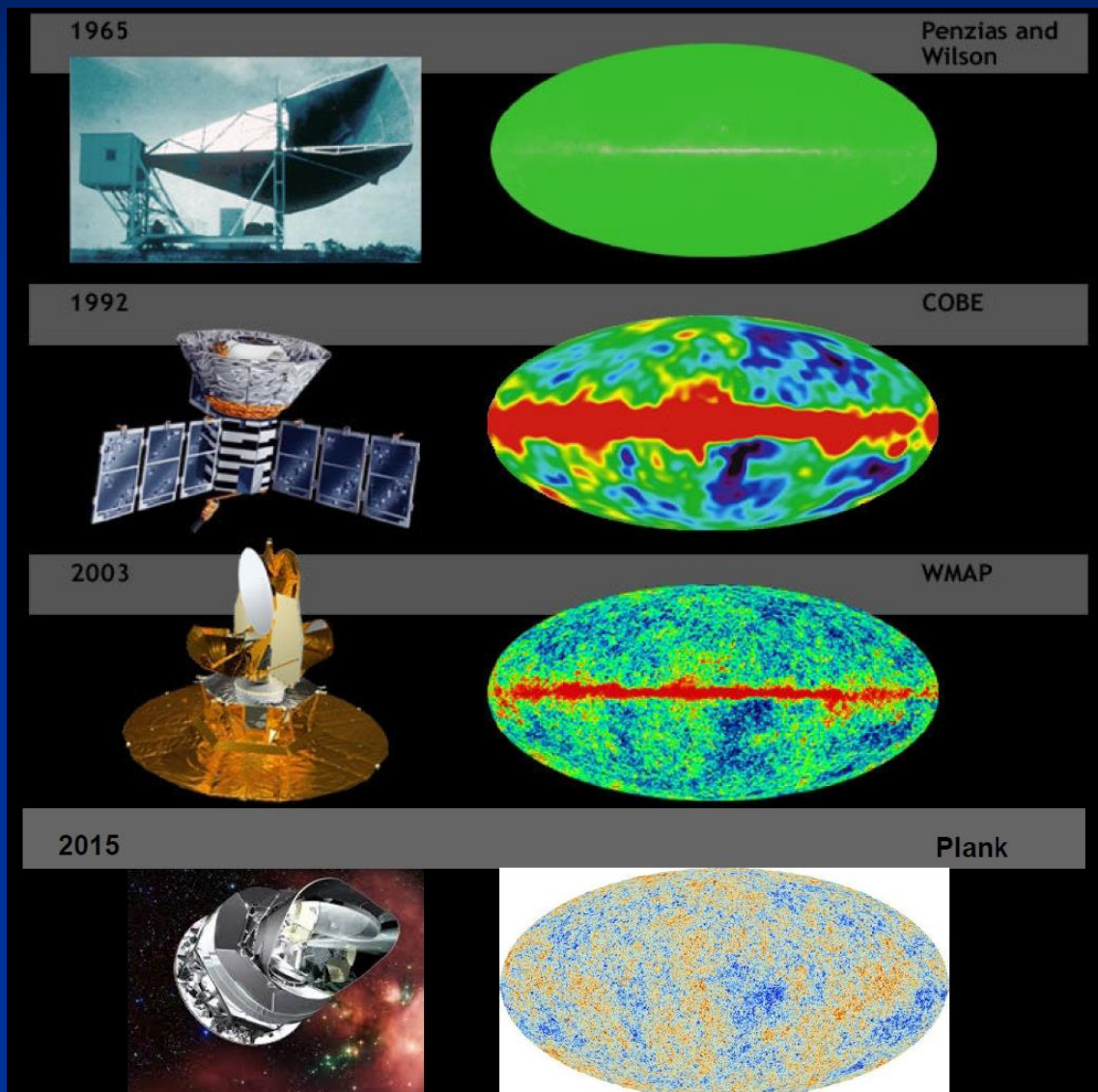
宇宙は広がり、放射された光子の波長も引き伸ばされる。過去の短い波長の電磁波も、今日、波長がずっと伸びて観測される。



宇宙膨張を測定することなどから、宇宙の年齢は138億年と算出される。もちろん、最も古い星の測定値よりも古いはずである。

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

- COBE、WMAP、Planck の各科学衛星は、宇宙マイクロ波背景放射の天球図を作成するための科学衛星である。代を重ねるごとに、より詳細に宇宙マイクロ波背景放射の天球図を作成した。そして、銀河を形成し始める物質の塊と見えるような小さなゆらぎを検出した。



# 宇宙の中心



宇宙が膨張しているということは、ビッグバン宇宙論の中核をなすもののひとつである。そうすると、膨張の中心があるのだろうか。

宇宙の中心というものを考えることはできないのである。

# 重力は宇宙で卓越したままか？



宇宙には質量が含まれている。質量は互いに重力で引き付け合っている。

ビッグバンによる膨張は、この重力によるブレーキと競いあっている。

しかし観測によると、宇宙膨張は加速している。その加速を担っているエネルギー源は、まだよく知られていない。



遠くの銀河を観測すれば、その銀河の過去の姿を見ていることになる。遠方の銀河は近傍の銀河と異なった姿をしている。



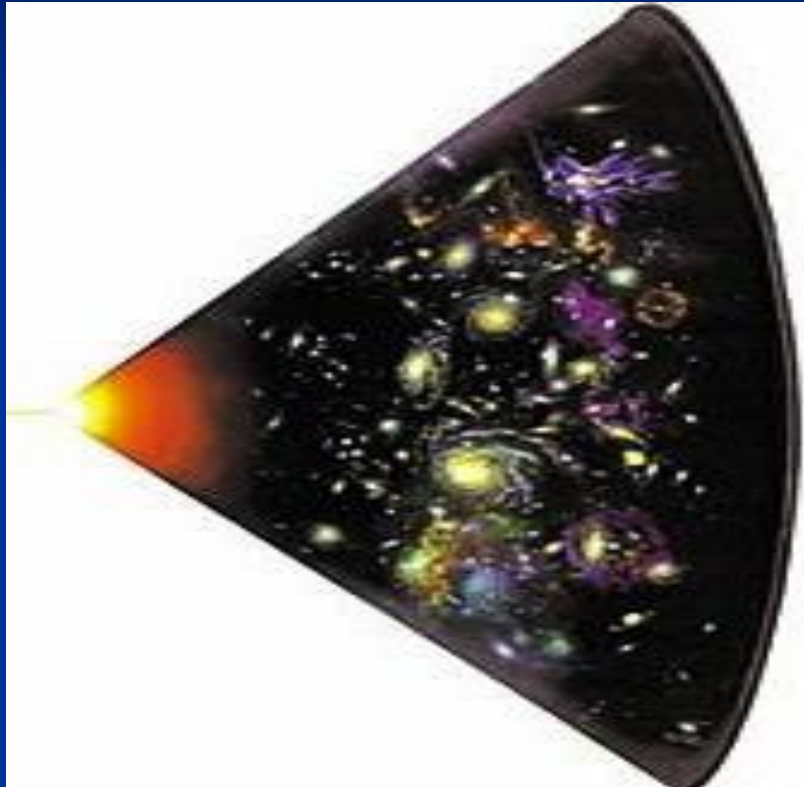
近傍の渦巻銀河



遠方の銀河は、  
小さく、不規則形状



# 進化



私たちにとって、これより外の情報を持ちえない、という限界が存在する。私たちは、光が届くまでに138億年以上かかる天体を観測することはできない。

宇宙は私たちの観測可能な範囲を越えて広がっているだろう。もし宇宙が無限のような大きな存在であれば、私たちが見ることができる宇宙は、その中で本当に小さいものということになる。



宇宙の質量・エネルギーの 95% は目に見えないダークマターとダークエネルギーである。ダークマターは目に見える物質に働く重力によって、ダークエネルギーは宇宙の加速膨張によって存在が示唆されている。

それがどんなものなのか、  
まだよくわからない



# 海面



私たちは、海の表面しか見ていない海洋生物学者のようだ。

# 海底

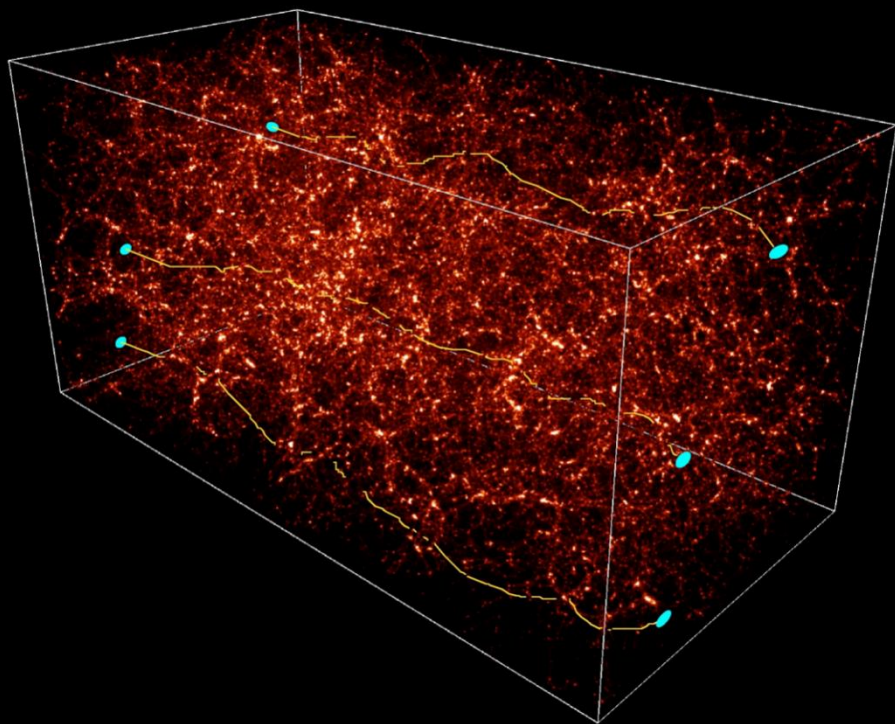


もっと近づいて見てみるならば、偉大な多様性を発見することができるだろう。

# ダークマター（暗黒物質）

どのような天体にも、見かけ以上に大量の質量が含まれていることだけはわかっている。

DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES



SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.

ダークマターは宇宙の大規模構造に沿ってフィラメント状に分布していると考えられている（訳注：ダークマターの分布によって、見える物質の分布が支配されていると表現したほうがいいだろう）。青い部分は遠方にある銀河である。黄色の線は、銀河によって放射された光の経路である。ダークマターの存在がなければ、それらは直線になるだろう（訳注：ダークマターによる重力レンズ効果を示しており、そこからダークマターの分布がわかるという説明にもなっている）。

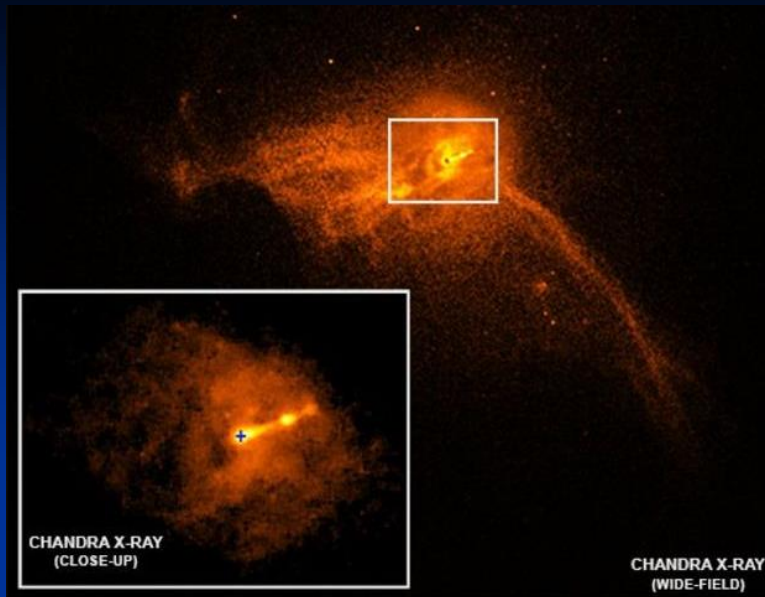


恒星が銀河の中心の周りを回っているのは、銀河の質量が恒星を引き付けるからである。銀河団は、銀河どうしが重力で引き付けあっている系である。

ダークマターは目に見えないが、ダークマターが及ぼす重力によって、存在を検出することができる。



私たちが見ることができないものの周りを動く天体がある。例えば、ブラックホールの周りで運動する恒星などである。



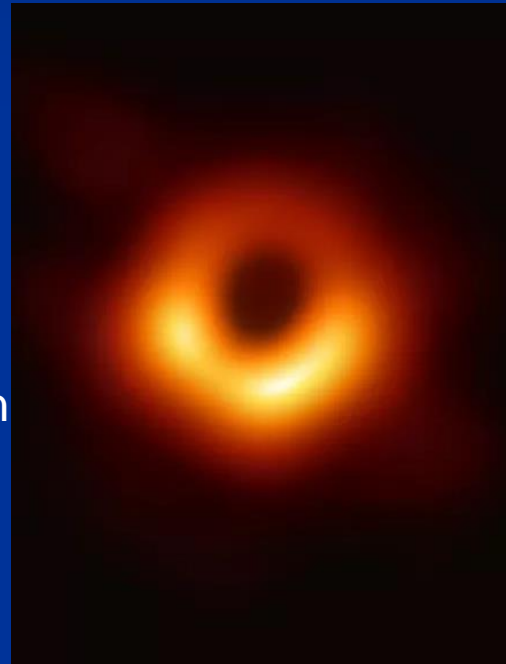
6大陸18ヶ国の、60機関200名以上の研究者グループによるイベント・ホライズン望遠鏡：地球上の8つの電波天文台の結合

太陽から5350万光年先の銀河M 87 の中心部

出典：  
NASA/CXC/Villanova University/J. Neilsen

M 87 中心核にある超巨大ブラックホールの、太陽の65億倍の質量が作る重力レンズの効果による「影」

出典：Event Horizon Telescope



2019年4月10日、超巨大ブラックホールによる「影」の初めての画像が記者発表となった。

訳注：直接見ることができないブラックホールであっても、重力レンズ効果によって検出することができた例。

# 宇宙の進化

長い時間で見えていくと、私たちの宇宙は膨張し続けているだけでなく、膨張の速度が時間とともに増加し、加速しているようである。この加速を引き起こしているエネルギーは、まだ分かっていない。私たちはそれを、当面、ダークエネルギーと名づけている。

遠い将来、星間物質がすべて消費され、星形成が止まるだろう。

さらに遠い将来、陽子が崩壊し、ブラックホールは蒸発するだろう。

遠い遠い将来、私たちの宇宙は、正体不明の物質と低エネルギーの電波で満たされているかもしれない。





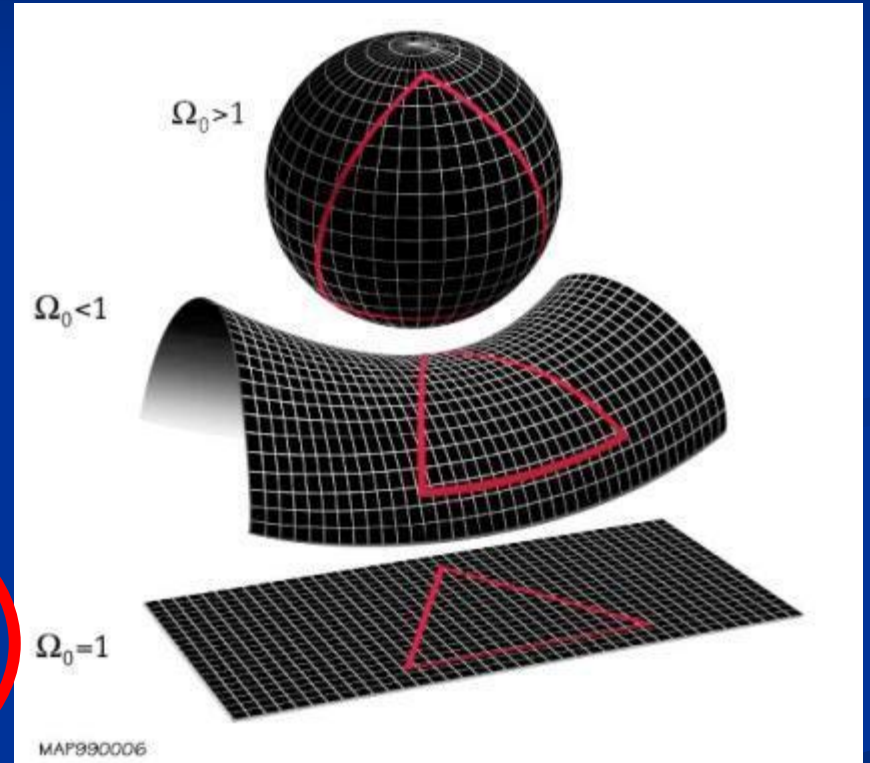
# 宇宙の幾何学は宇宙論定数で規定される

閉じた宇宙  $\rightarrow \Omega > 1$

開いた宇宙  $\rightarrow \Omega < 1$

平坦な宇宙  $\rightarrow \Omega = 1$

インフレーション理論  
によって予測され、  
観測と合わせた考え



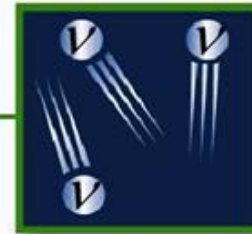
# 宇宙進化は宇宙の内容物に依存する

密度パラメーター

$$\Omega_{\text{total}} = 1.0$$



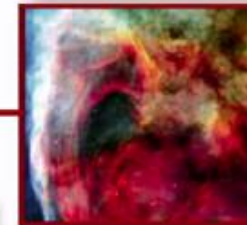
重元素  
0.03%



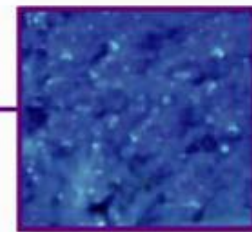
ニュートリノ  
0.47%



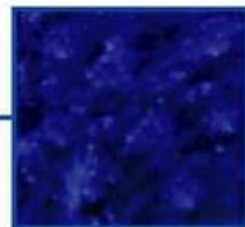
星  
0.5%



宇宙空間  
に漂う  
HとHe  
4%



ダークマター  
25%



ダークエネルギー  
70%

# 成功したモデル：ビッグバン (予測 - 検証)

- 膨張：  
20世紀の初めにバツブルらによって検証された。
- 宇宙背景放射：  
20世紀にペンジアスとウィルソンにより発見された。
- 元素組成：  
20世紀に示された。
- 大規模構造：  
20世紀末に発見された。



# 宇宙の最終運命

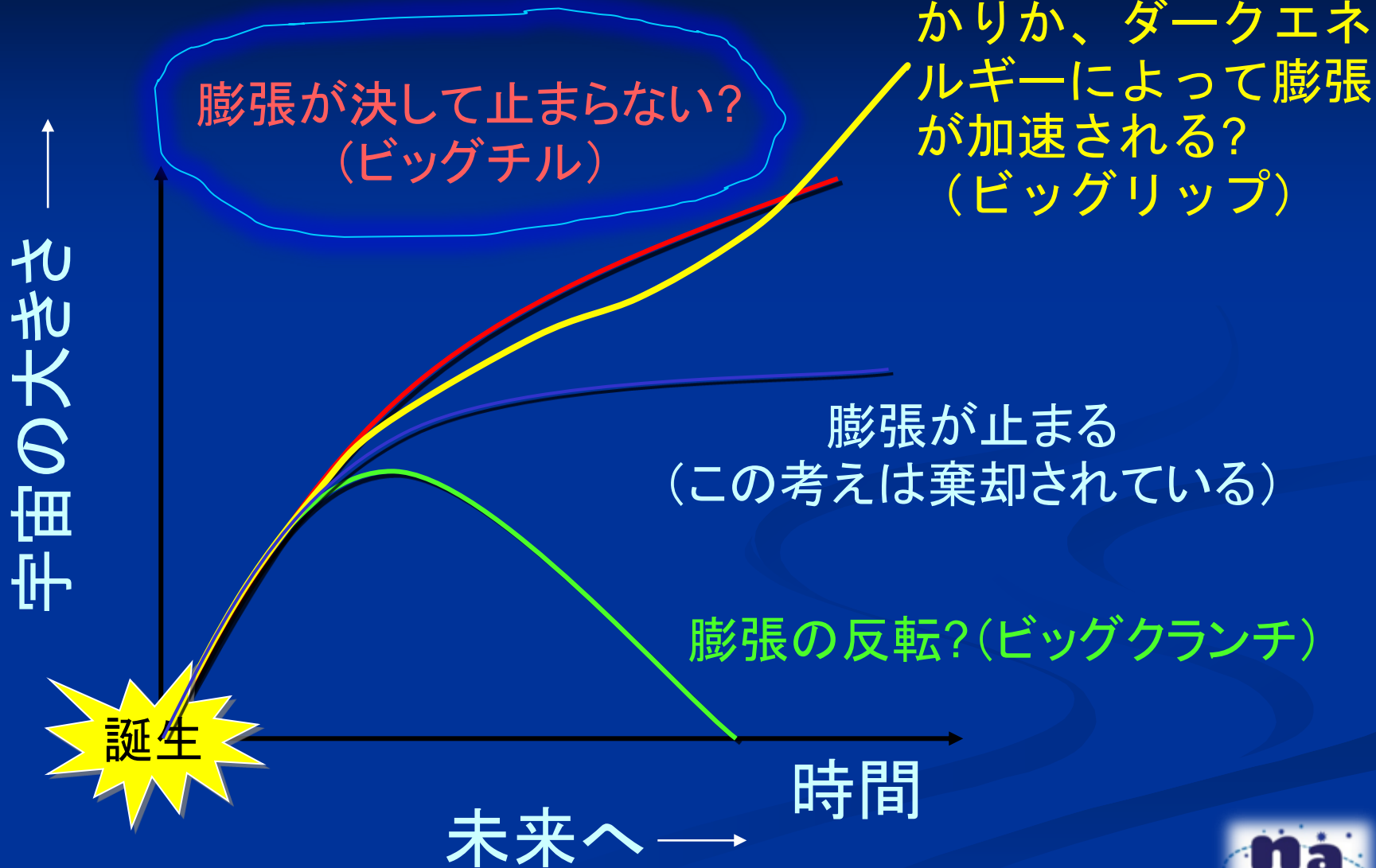
(考えられるシナリオ)

- ビッグ・クランチ (膨張の反転)
- ビッグ・チル (永久膨張)
- ビッグ・リップ (大いなる引き裂かれ)
- 膨張が止まる (かつて考えられたが棄却)

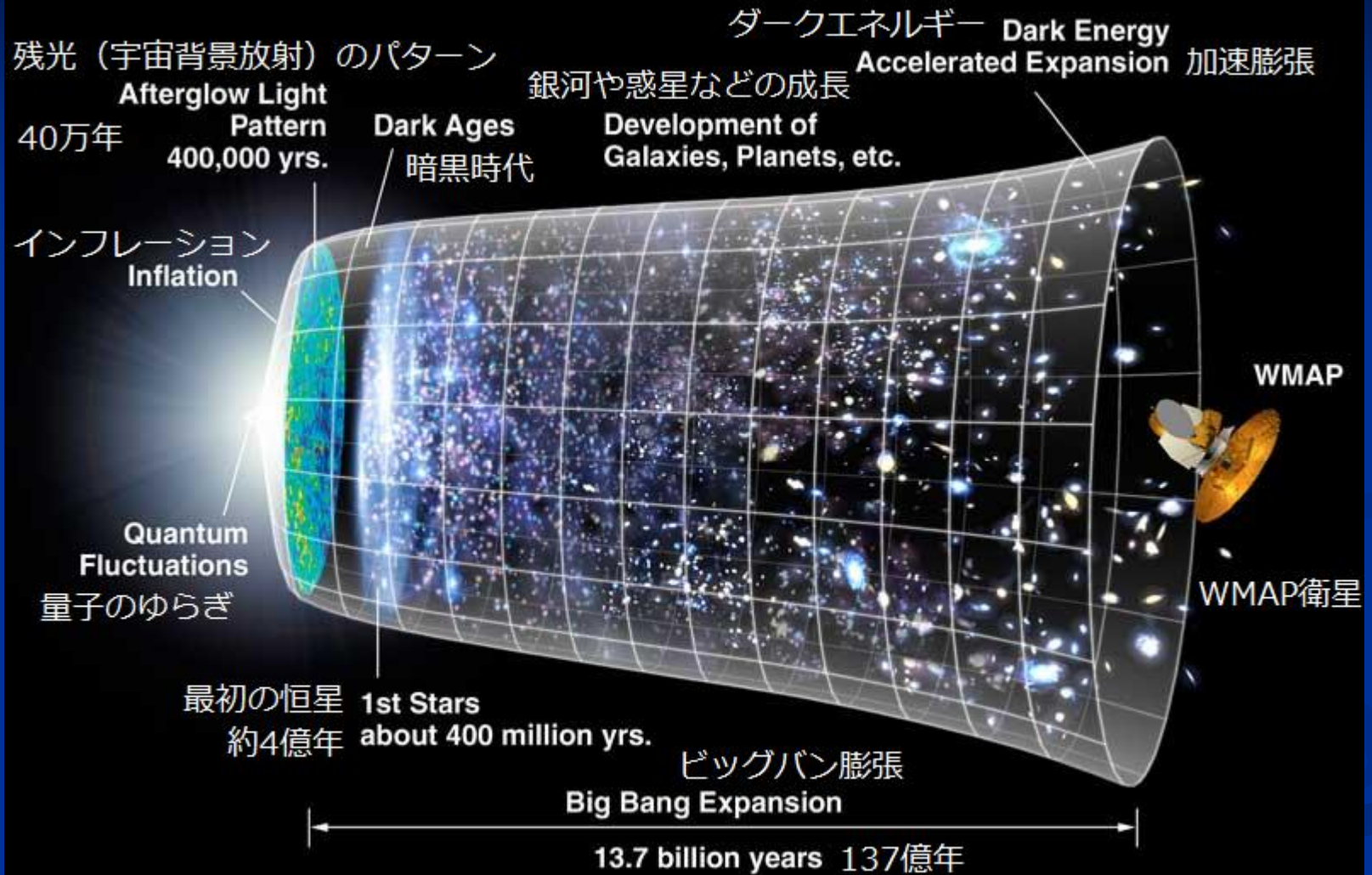
上記のシナリオのどれになるか、  
宇宙の内容物にかかっており、  
臨界密度に対してどうか、また、  
ダークエネルギーの存在などに依存する。



# 宇宙の形状と運命

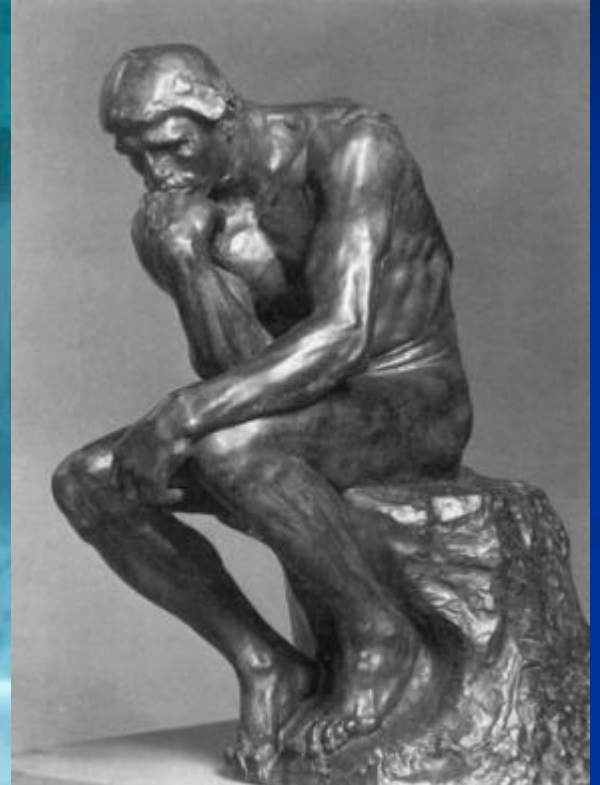


# 宇宙の歴史



# エピローグ

私たちは、物理法則を使って宇宙について考えることができる、特別な時代に生きている。



時間が経つにつれて私たちの考えが変わるだろうが、それこそが科学のあり方である。

ありがとうございました