

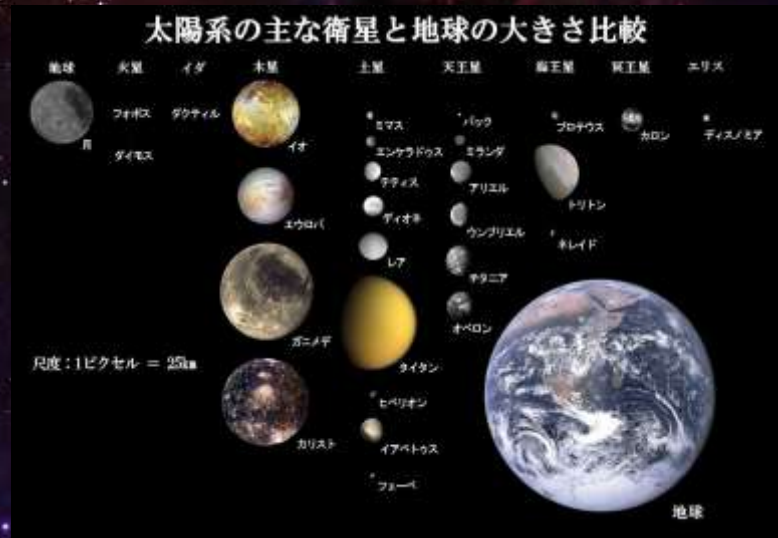
# 宇宙の不思議

未来社会を考える会

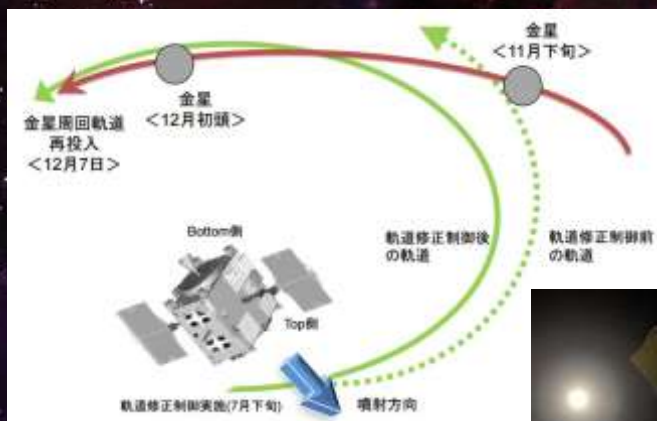
- 宇宙の始まり
- インフレーションとビックバン
- 星のライフサイクル
- 元素の起源
- 系外惑星
- 赤色矮星とアイボールアース
- ダークマター
- ダークエネルギー
- 4つの力
- 超ひも理論
- 人間原理とマルチバース



# 太陽系の衛星の大きさ

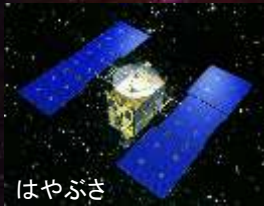


## 金星探査機あかつき



金星探査機「あかつき」15年間の運用終了 昨年からの通信確立できず

## 小惑星イトカワ



はやぶさ

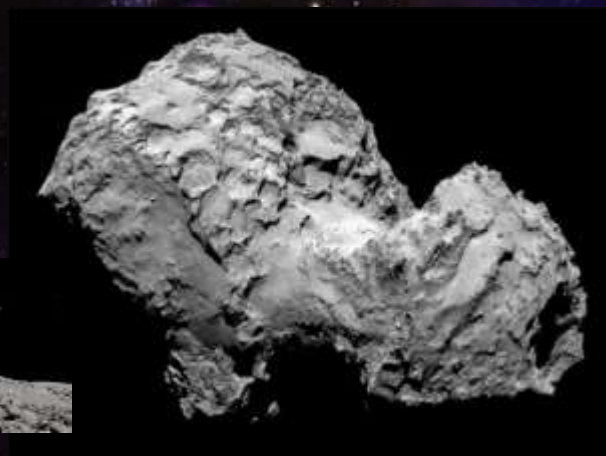
平均半径: 約160m 長径: 500m  
岩石質の小惑星



## チュリュモフゲラシメンコ彗星

- 地球から5億キロ程度離れたところにある
- 最高時速10万キロで太陽の方向に移動している
- 無人探査機ロゼッタが着陸に成功した

ロゼッタ

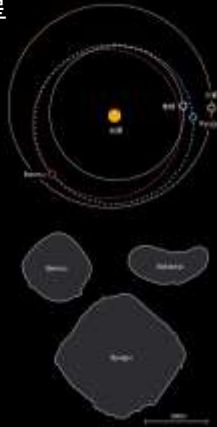






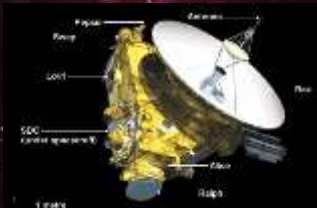
# OSIRIS-REx と Bennu

ガレキの寄せ集めの小惑星



## 冥王星

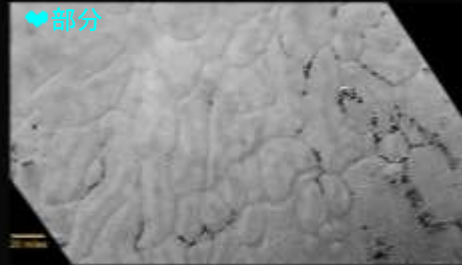
ニューホライズンズ

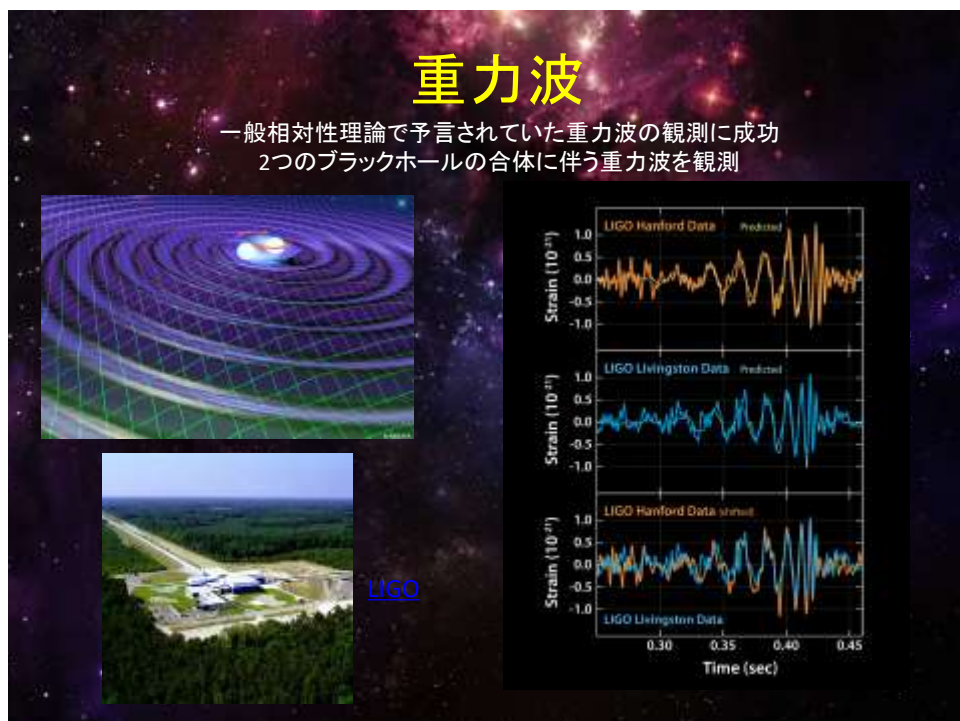
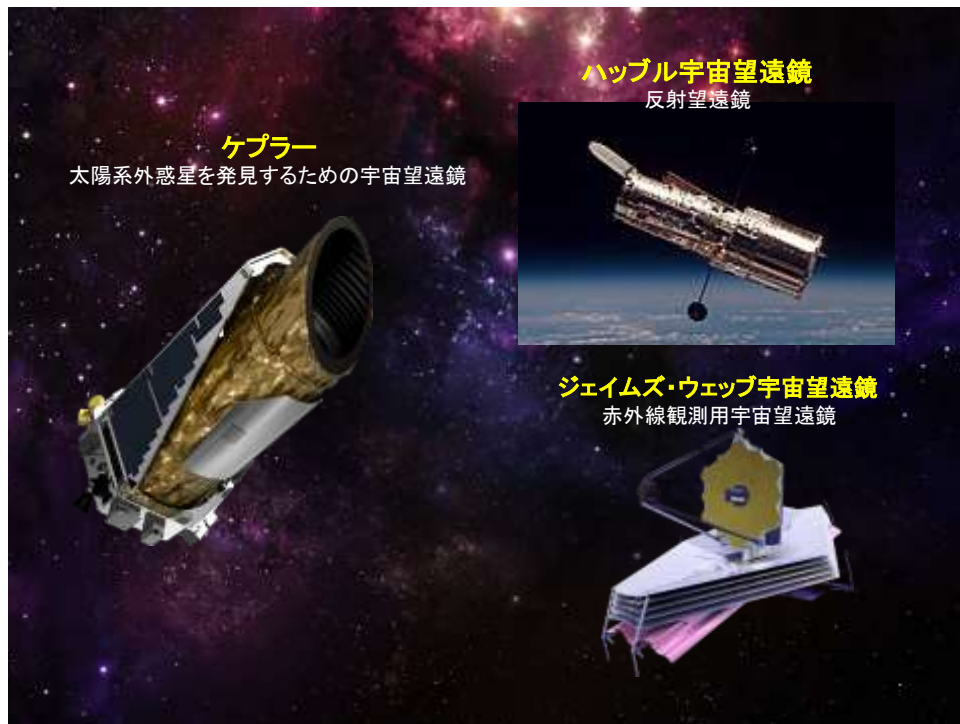


- 離心率が大きく、楕円形の軌道を持ち、黄道面から大きく傾いている
- 直径は2,370kmで地球の月よりも小さい
- 冥王星の衛星カロンは直径が冥王星の半分以上あり、二重天体とみなされることもある



♡部分



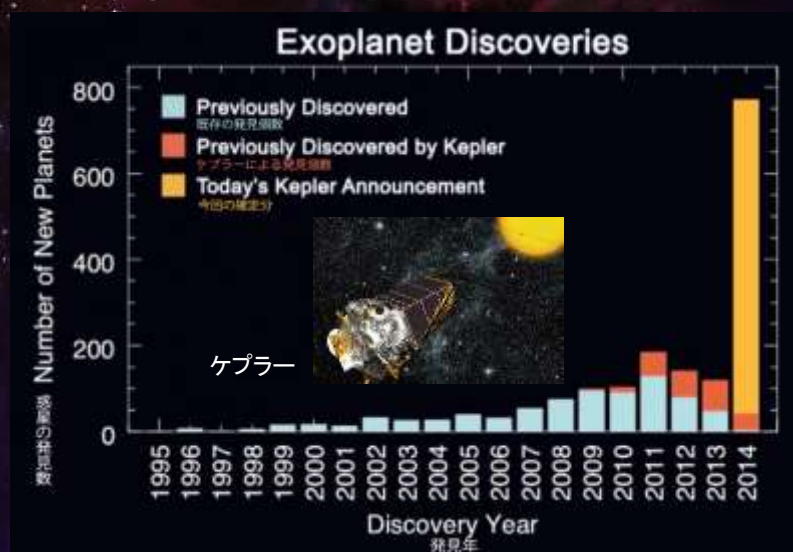




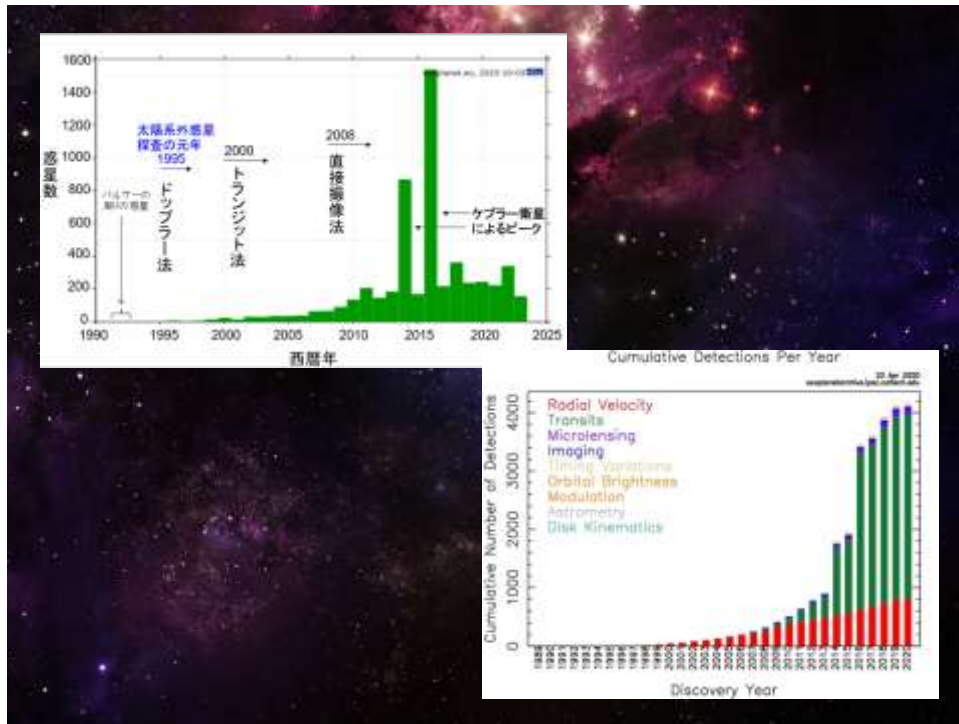
## 系外惑星の探索方法

- 直接観測
  - 画像処理技術の進歩により、2008年に系外惑星の直接観測が可能になった
- 位置天文学法
  - 巨大な惑星によって恒星がふらつく様子を位置天文学的手法により精密観測する方法
- ドップラー法
  - 惑星によって恒星が視線方向にふらついた時に起こるドップラー効果によるスペクトル変化を調べる
- トランジット法
  - 惑星が恒星の前を横切る時の明るさの変化によって惑星を探す方法
- マイクロレンズ法
  - 重力レンズ効果を利用する方法
- パルサー・タイミング法
  - パルサーに惑星が存在する場合、パルスの周期的なズレを観測する

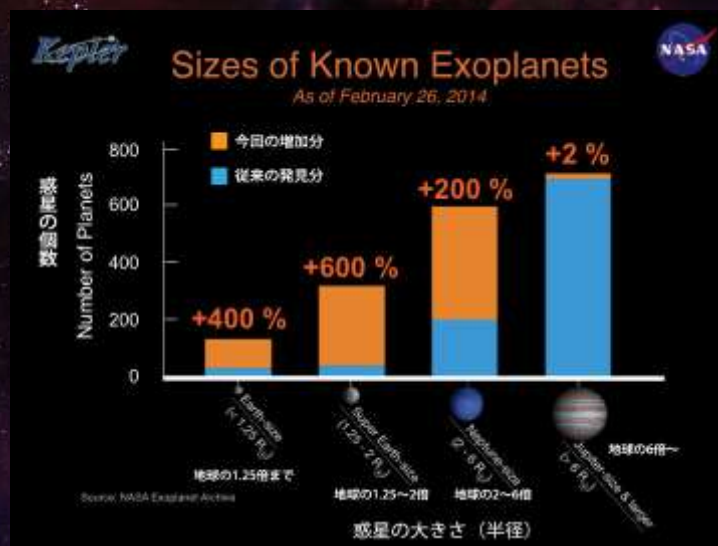
## 系外惑星の発見推移





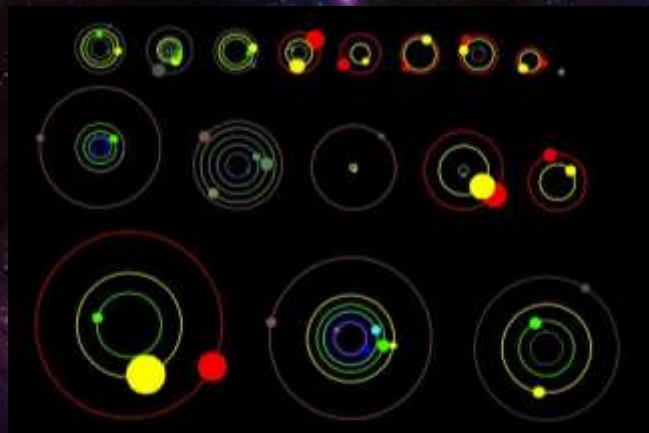


## 発見された系外惑星の大きさ

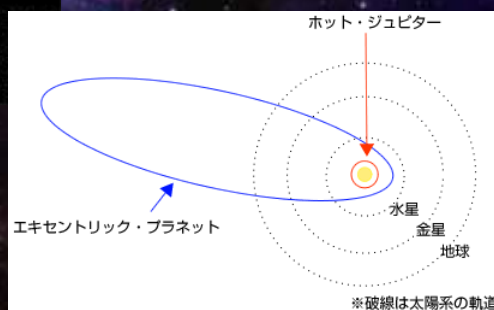


## 様々な系外惑星系

- ケプラーがこれまでに発見した複数の系外惑星を持つ惑星系における惑星の大きさと軌道
- 灰色の天体は、まだ惑星の存在が確認されていないもの



## 奇妙な系外惑星



# ハビタブルゾーンにある系外惑星



## ハビタブルゾーンにある系外惑星の例



## 赤色矮星とアイボール・アース

- 星の寿命
  - ・ 太陽の寿命は約100億年だが、10倍の質量の恒星は太陽の $1/10^3 = 1/1000$ 、つまり1000万年の寿命しかないことになる。逆に太陽の $1/10$ の質量の恒星は太陽の1000倍の10兆年の寿命ということになる。
  - ・ 従って、宇宙にある恒星の大部分は見えない小さな星である。
- 赤色矮星
  - ・ 主系列星(矮星)の中で特に小さく低温な恒星のグループである。
- アイボール・アース
  - ・ 自転と公転の同期が発生しており、それによって地形や構成が眼球に似た空間的特徴を持っている仮説上の惑星である<sup>1)</sup>。これは主に、液体が存在する可能性のある地球型惑星に対して使用される。



## ドレイクの公式

天の川銀河の中であって、われわれと交信可能な地球外文明の数を推定する式

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

- N : 銀河系内で通信が可能な文明の数(10)  
 $R_*$  : 銀河系での1年間における恒星の平均形成率(0.5)  
 $f_p$  : 恒星が惑星を持つ割合(2)  
 $n_e$  : 恒星系ごとに生命が存在可能な惑星の平均数(1)  
 $f_l$  : 生命が実際に発生する割合(0.01)  
 $f_i$  : 発生した生命が知的生命体へ進化する割合(0.01)  
 $f_c$  : 通信可能な技術文明へ発達する割合(0.01)  
 L : 技術文明が通信を行う期間の平均年数(10,000)

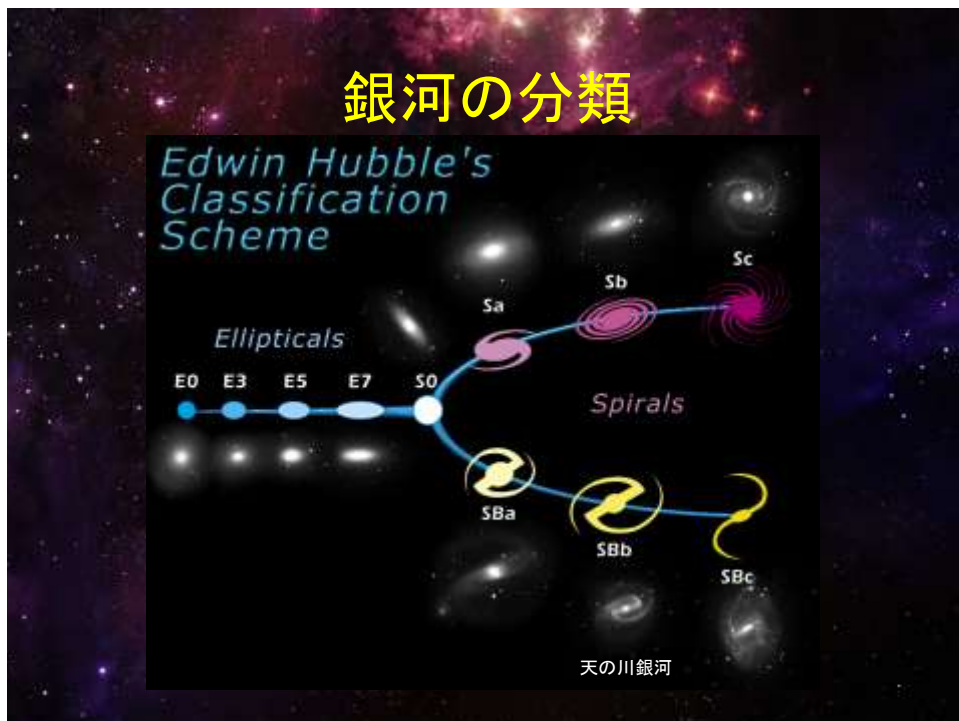
$$N=10$$



# 宇宙の階層構造



## 銀河の分類



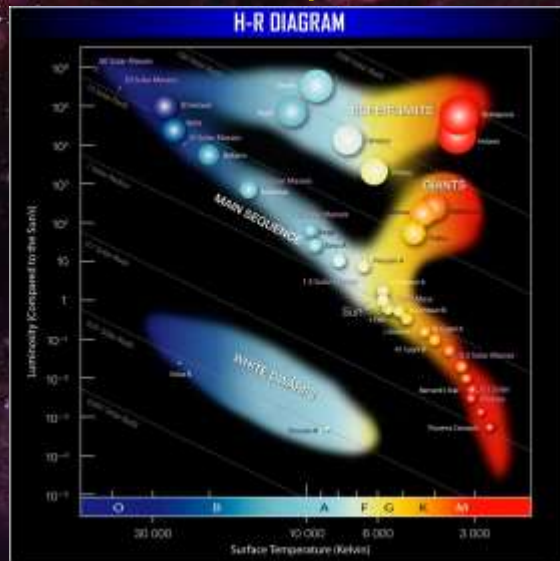
## 宇宙の大規模構造



## HUBBLEによるDeep Fieldの撮影

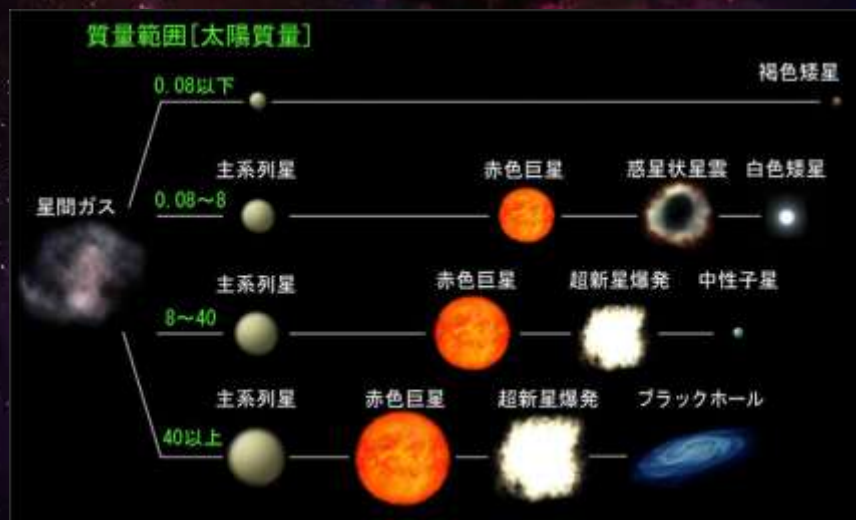


## H-R図



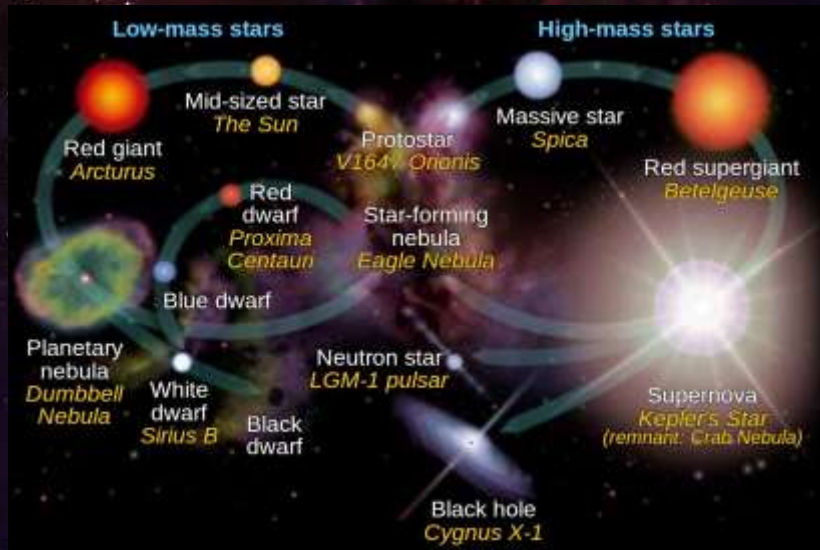
ヘルツシュプルング・ラッセル図

## 星の一生





# 星のライフサイクル



# 星の誕生場所



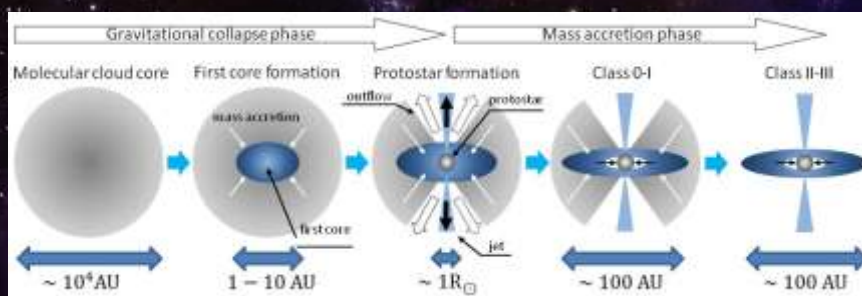
赤い部分



# 星の誕生



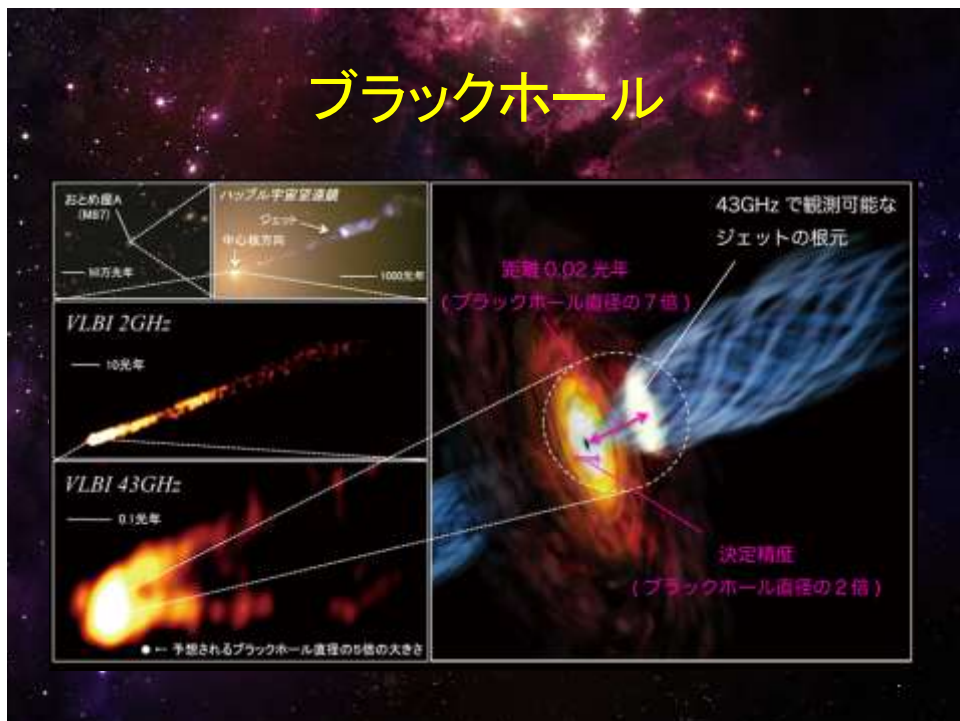
## 中心星と惑星系円盤の形成



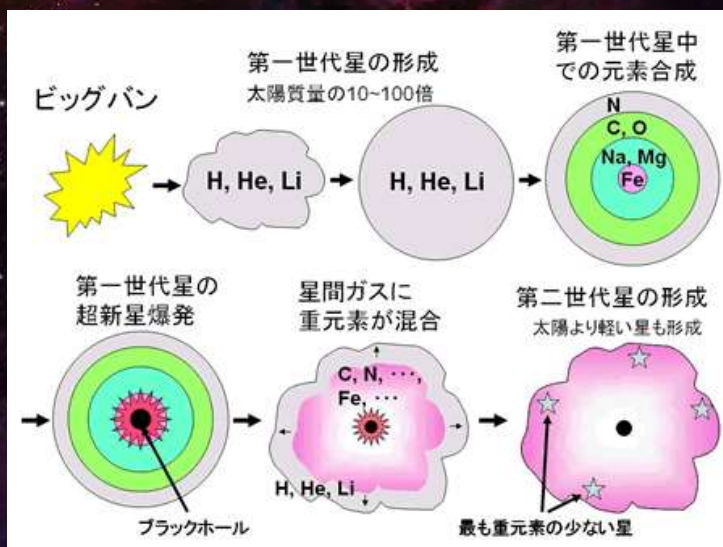
# 星の死



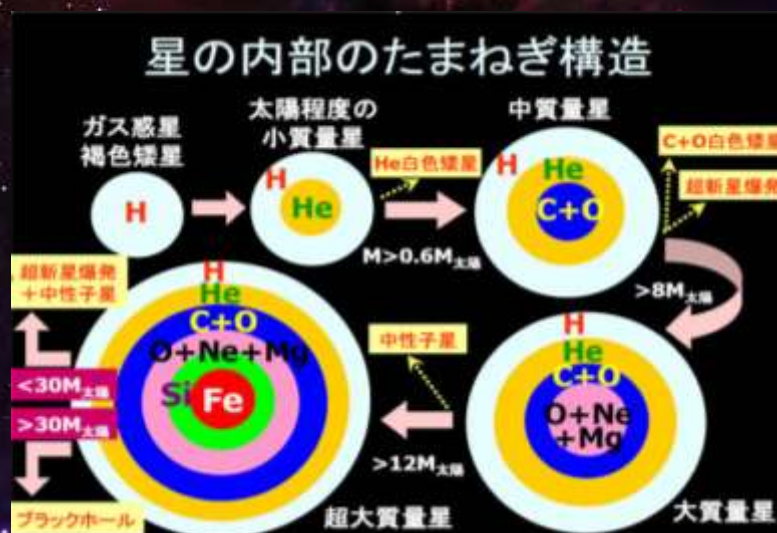
# ブラックホール



# 元素の起源

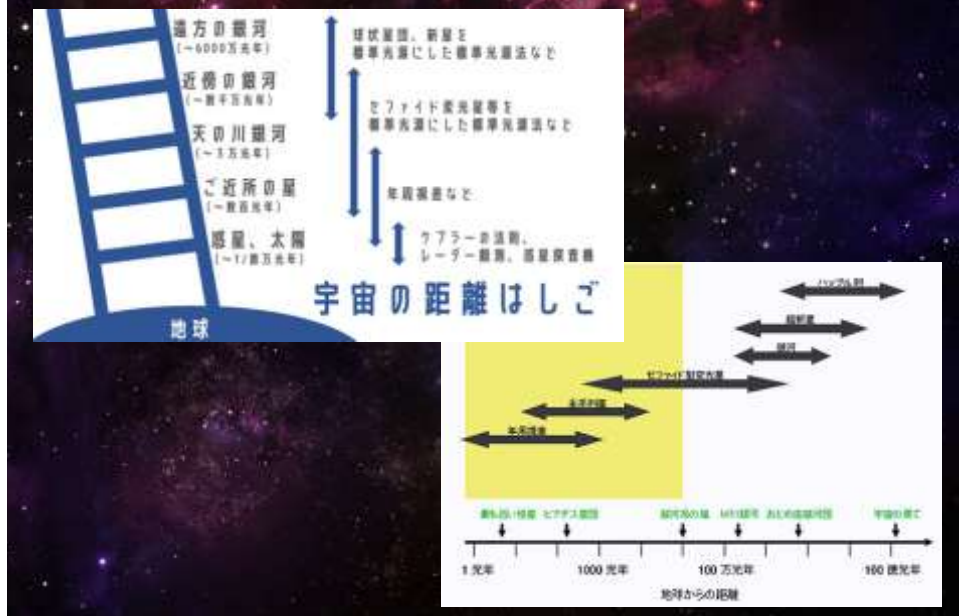


# 星の内部の構造



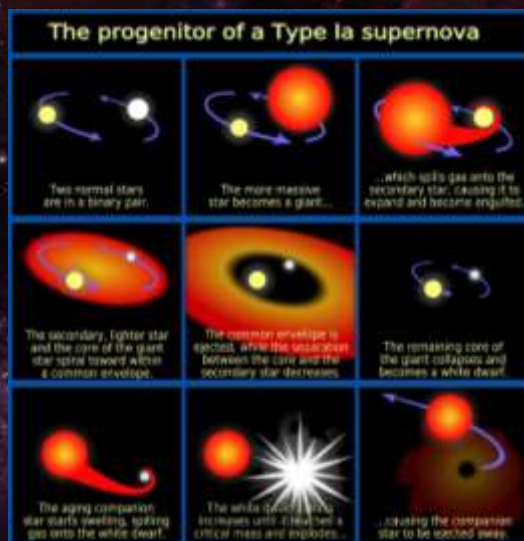


# 宇宙の距離はしご



## Ia型超新星

Progenitor=先祖

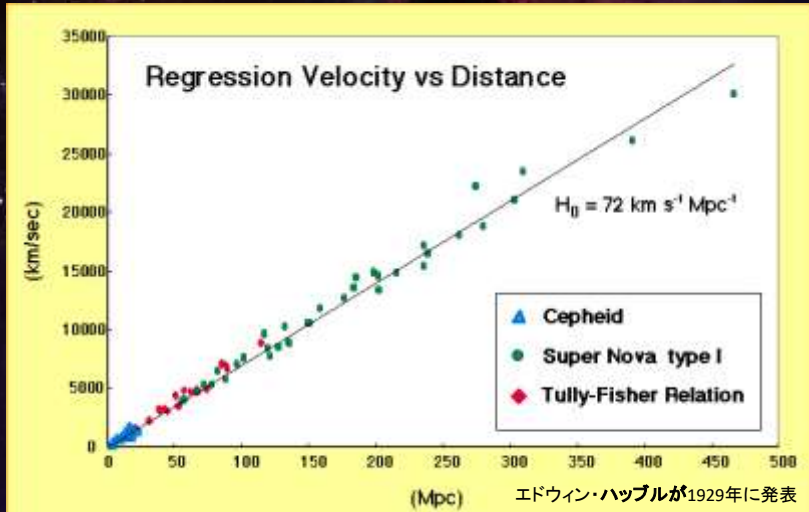


恒星の1/4は連星  
といわれている

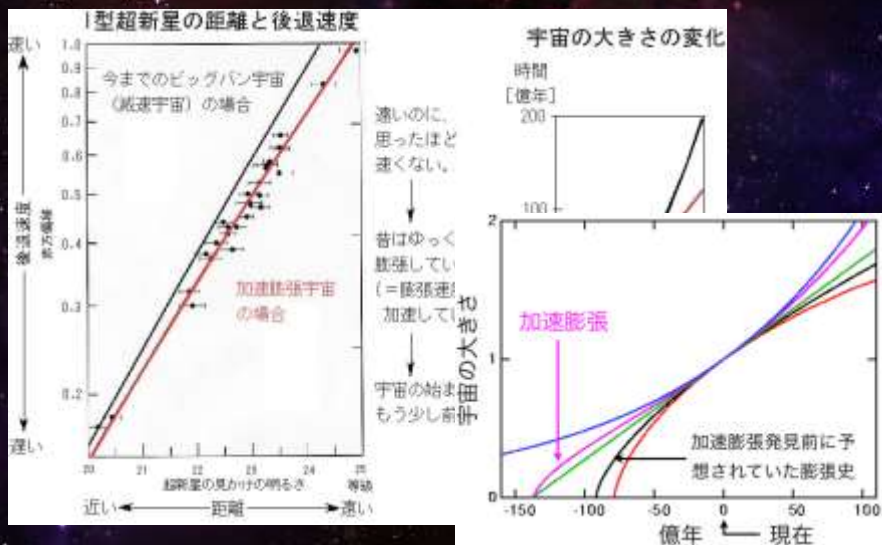


# ハッブル定数

宇宙は膨張している

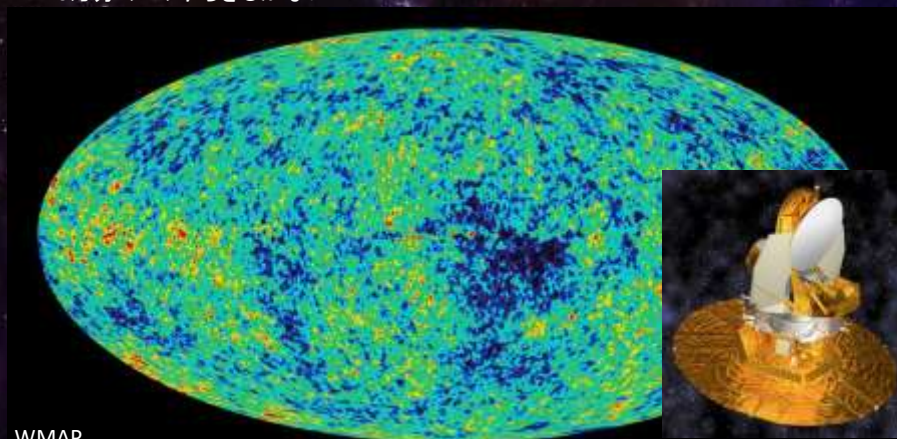


## 1a型超新星による宇宙の膨張速度の計測



## 宇宙背景放射

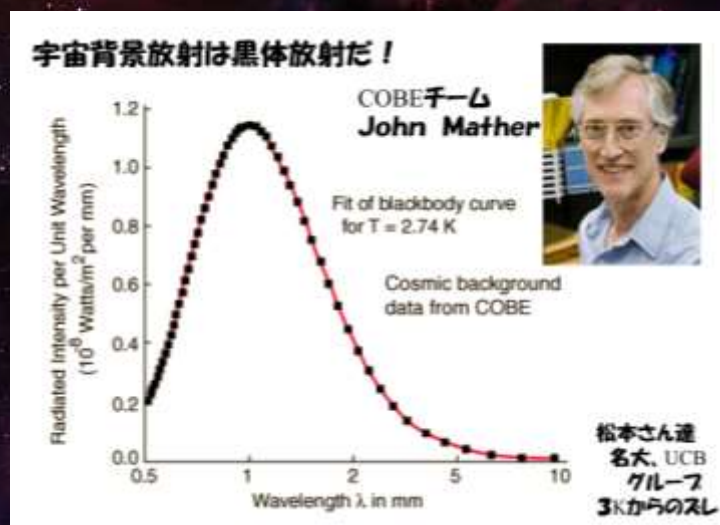
- ビッグバンの残光
- 量子のゆらぎが宇宙サイズに拡大
- 10万分の1のゆらぎしかない



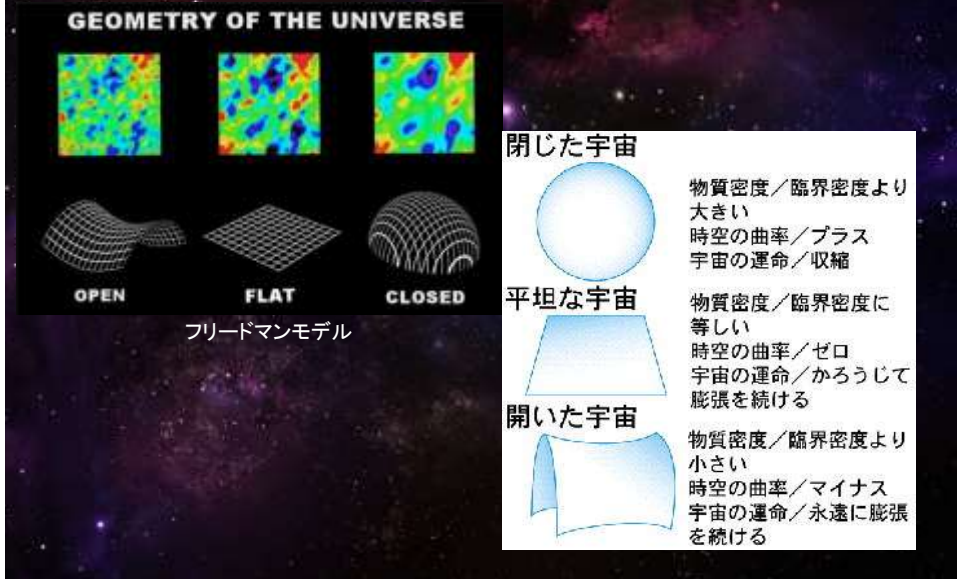
WMAP

ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機

## 黒体放射としての宇宙背景放射

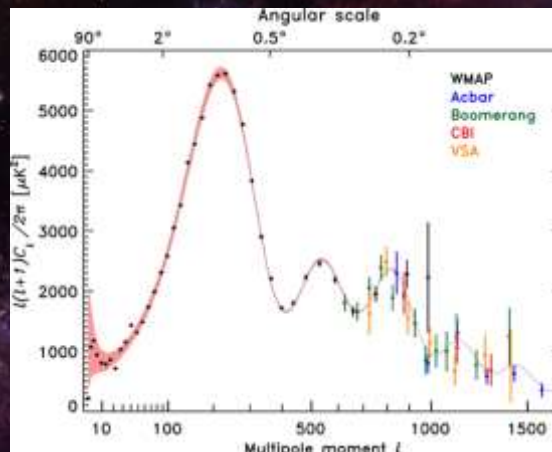


## 時空の曲率



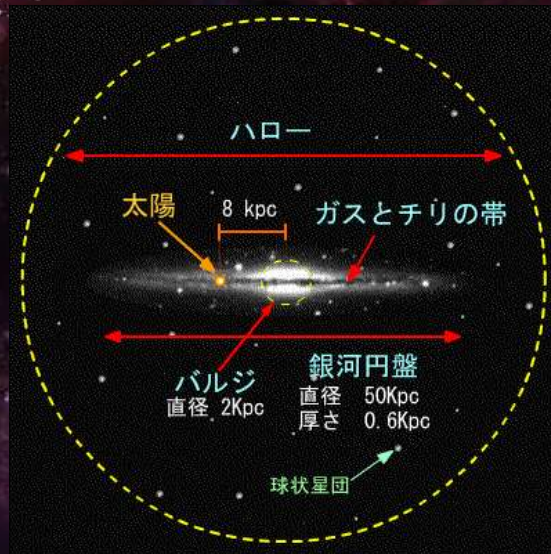
## 背景放射温度のラプラス展開

- $l=220$ の所に第一ピークがあるが、宇宙が平坦な宇宙であることの証明だとのこと
- インフレーション理論が正しいことの証明でもあるらしい

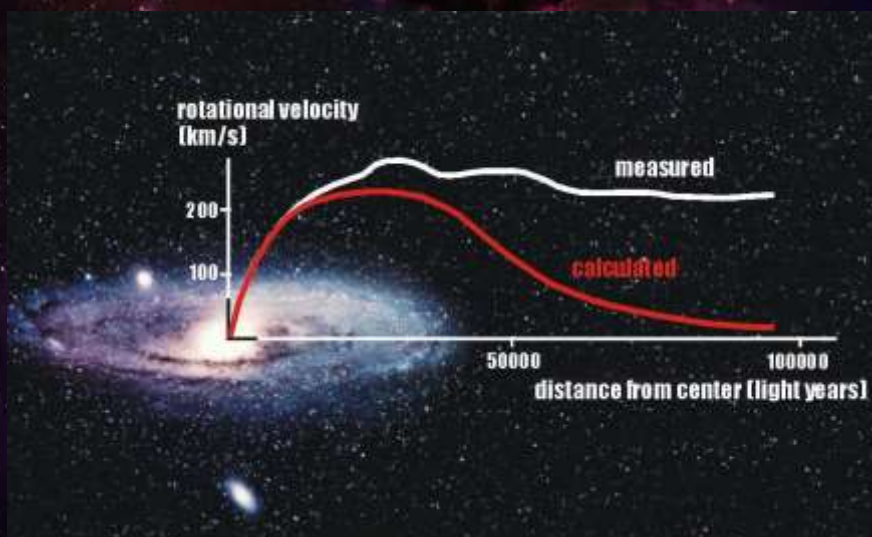




## 銀河の構造

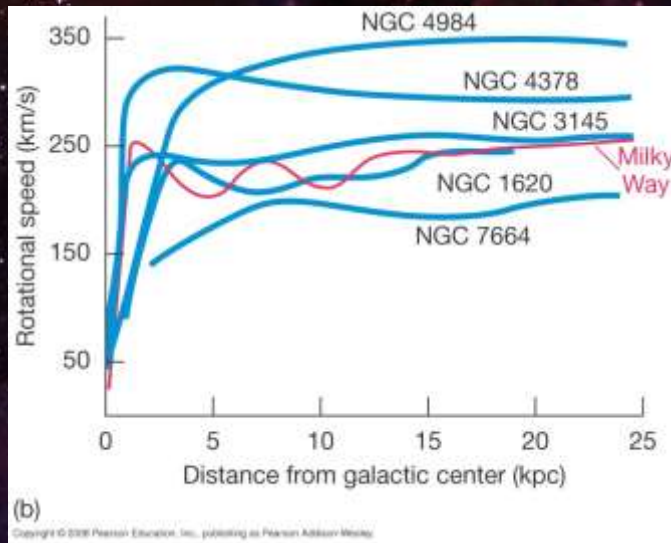


## 銀河の回転速度(理論と観測)のギャップ

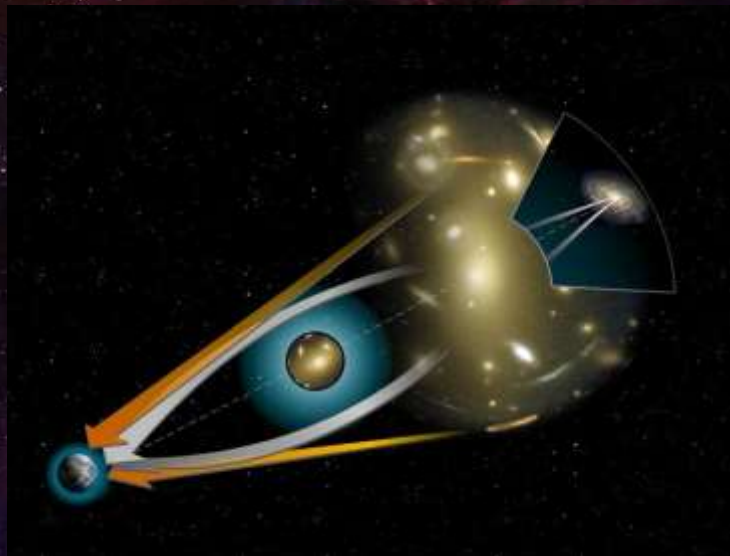




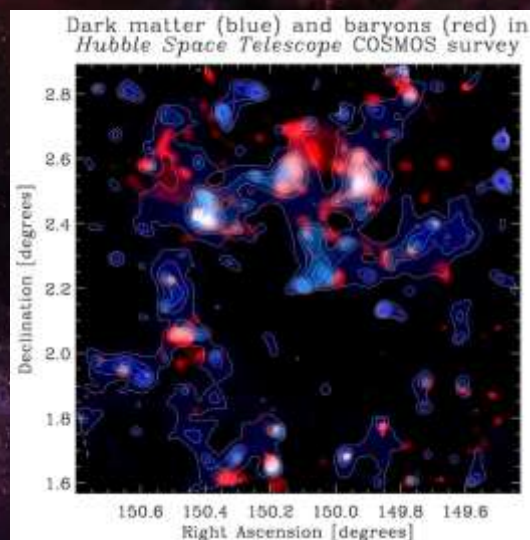
## 様々な銀河の回転速度



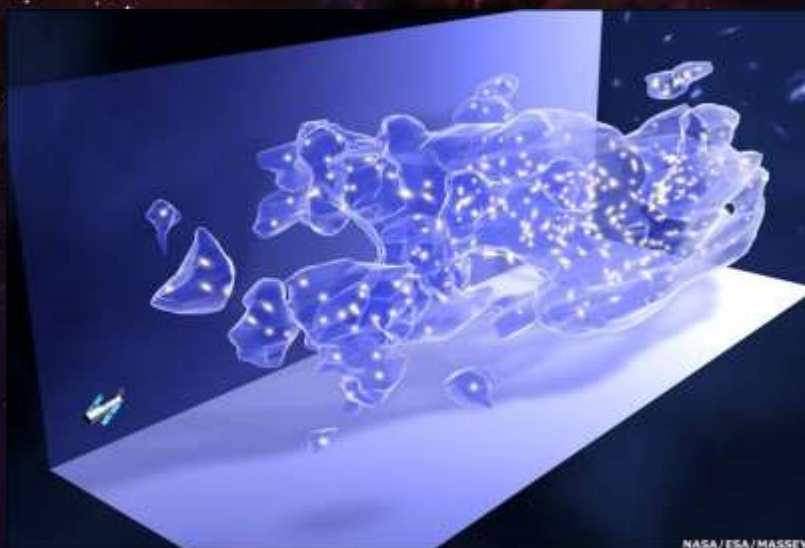
## 重力レンズ



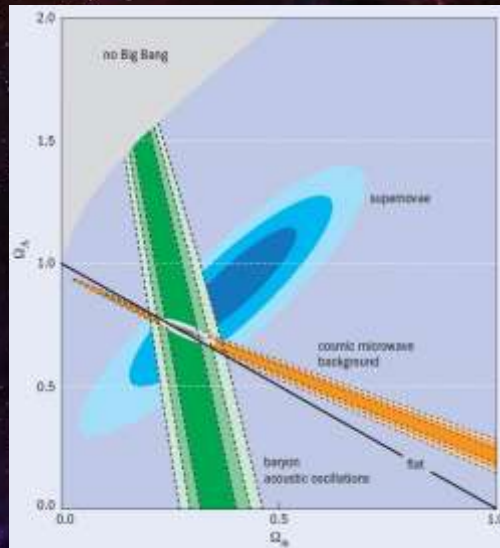
## ダークマターの平面分布



## ダークマターの立体分布

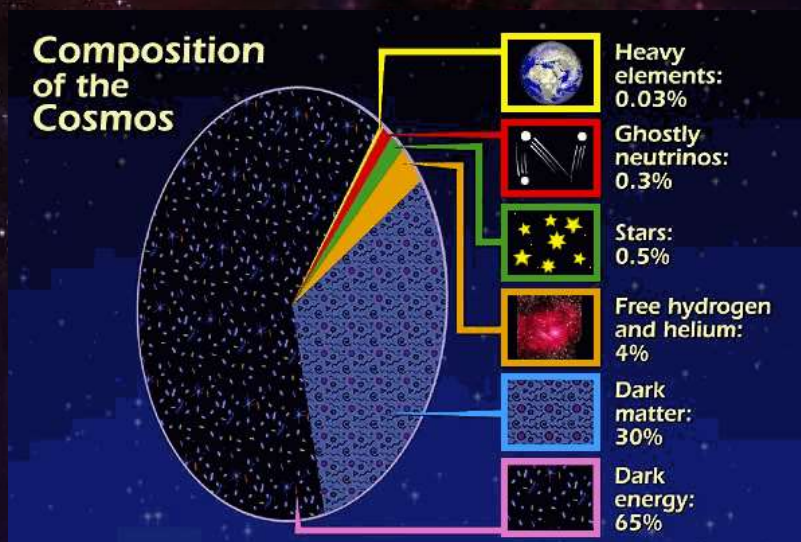


## 3種類の方法による宇宙の密度の測定結果



超新星、CMB (宇宙マイクロ波背景放射)、および BAO (相関関係で見られるくねくねとした特徴) という3つの独立したソースからの総物質量 (通常 + 暗黒、x 軸) および暗黒エネルギー密度 (y 軸) に対する制約大規模構造物)

## 宇宙の構成





## ダークマター

- 暗黒物質は、陽子や中性子のような通常の物質から構成される天体ではなく、宇宙初期に宇宙を満たしていた素粒子の一部？
  - 光らない(電磁相互作用をしない)
  - 質量を持ち重力を感じる
  - 多量に安定に存在する
- ダークマターの候補
  - 超対称性理論で予言されているニュートラリーノ
  - アクシオン

## ダークエネルギー

- 宇宙全体に浸透し、宇宙の拡張を加速していると考えられる仮説上のエネルギー
- 空間固有のエネルギー
- 量子論的な真空エネルギーではない
- スカラー場
- コンパクト化を伴わない高次元モデル
- アインシュタインの宇宙項

The diagram illustrates the transition from the standard Einstein field equations to those including the cosmological constant. It features two boxes connected by a downward arrow labeled '改定' (Revision). The top box contains the equation  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ . To its right, a red arrow points to the text 'このままでは宇宙が収縮して終わりを迎える' (As it is, the universe will contract and reach an end). The bottom box contains the modified equation  $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ . Below this equation, it says '宇宙項または宇宙定数 (斥力=押し出す力)' (Cosmological term or cosmological constant (repulsive force = pushing out force)).

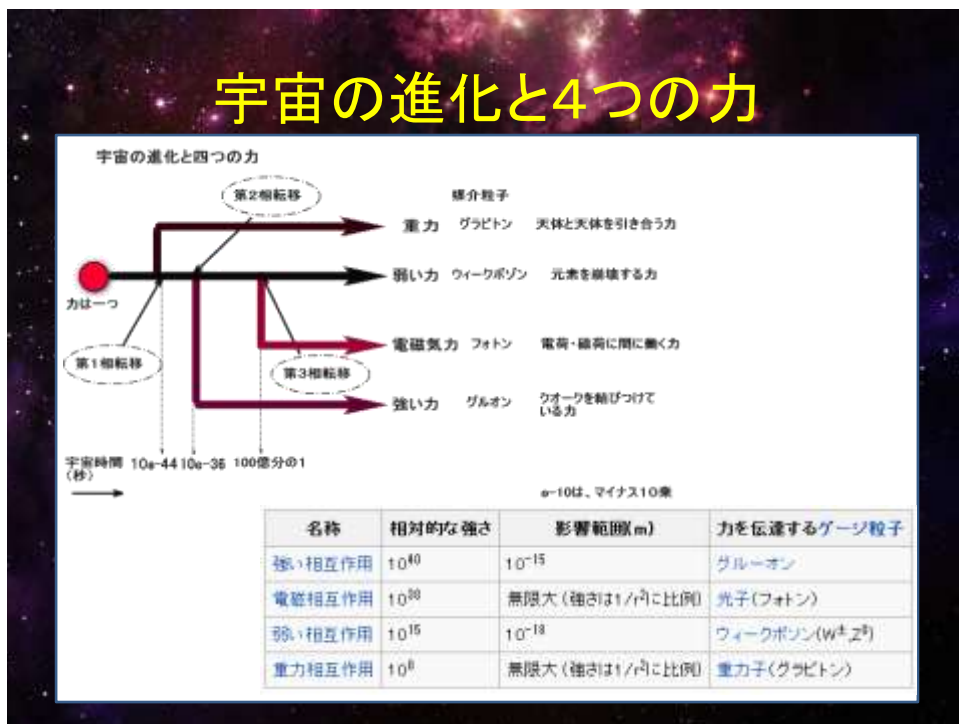
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

改定

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

宇宙項または宇宙定数  
(斥力=押し出す力)

# 宇宙の進化と4つの力



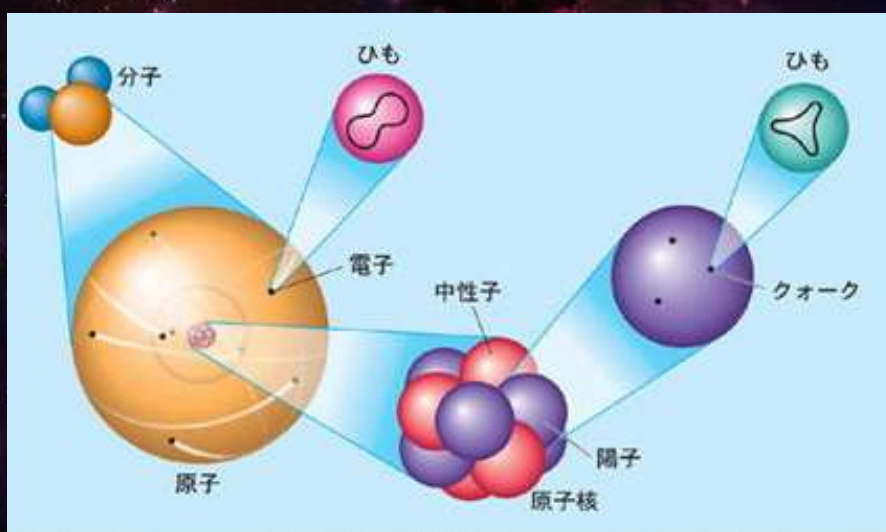
## 宇宙の始まり



# インフレーション理論

- 概要
  - 宇宙は誕生直後の $10^{-36}$ 秒後から $10^{-34}$ 秒後までの間にエネルギーの高い偽の真空から低い真空に相転移した
  - この過程で負の圧力を持つ偽の真空のエネルギー密度によって引き起こされた指数関数的な膨張をした
- ビッグバン宇宙論の難題解決
  - 地平線問題
    - 因果関係がない筈の領域の温度が同じ
  - 平坦性問題
    - 宇宙の曲率が殆ど1である
  - モノポール(磁気単極子)問題
    - モノポールが発見されない

# 物質の最小単位





## 素粒子の分類

	第一世代	第二世代	第三世代	電荷	弱荷	色荷
クォーク	u u u	c c c	t t t	2/3	1/2	あり
	d d d	s s s	b b b	-1/3	-1/2	あり
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	1/2	なし
	e	$\mu$	$\tau$	-1	-1/2	なし

軽い → 重い

**力の媒介粒子**

**強い力**  
g g g g g g  
グルーオン

**弱い力**  
W Z  
W粒子・Z粒子

**電磁気力**  
 $\gamma$   
光子(フォトン)

**重力**  
G  
重力子(グラビトン)

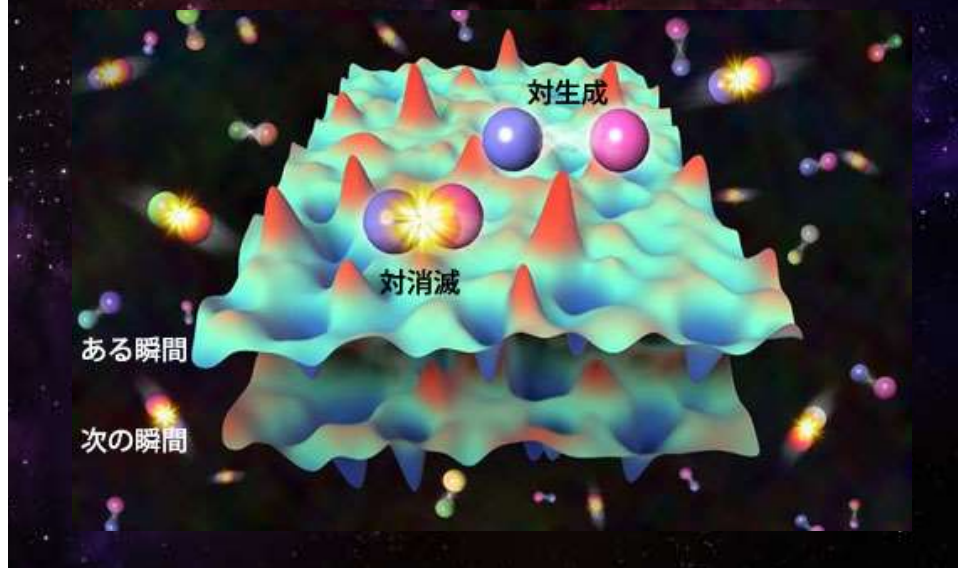
**質量を与える粒子**  
H  
ヒッグス粒子

## 超対称性粒子

- 対称性と対称性の自発的破れの導入が自然理解の鍵になってきた
- 超対称性理論とは、ボース粒子とフェルミ粒子に対して、それぞれ対応するフェルミ粒子とボース粒子が存在すると考える理論仮説
- 超対称性を考えた標準模型や重力理論は、それぞれ超対称標準模型、超重力理論と呼ばれる。超弦理論も超対称性理論の一種



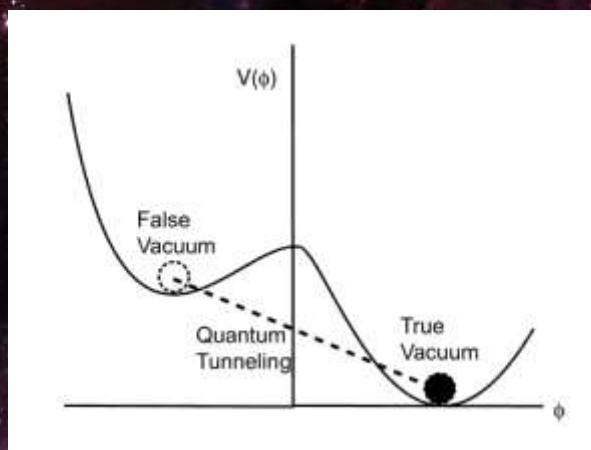
## 量子の対生成・対消滅のイメージ



## 量子の揺らぎからの宇宙誕生のイメージ



## 偽の真空から真空への相転移



インフロン場

## インフレーション理論による宇宙の多重発生イメージ





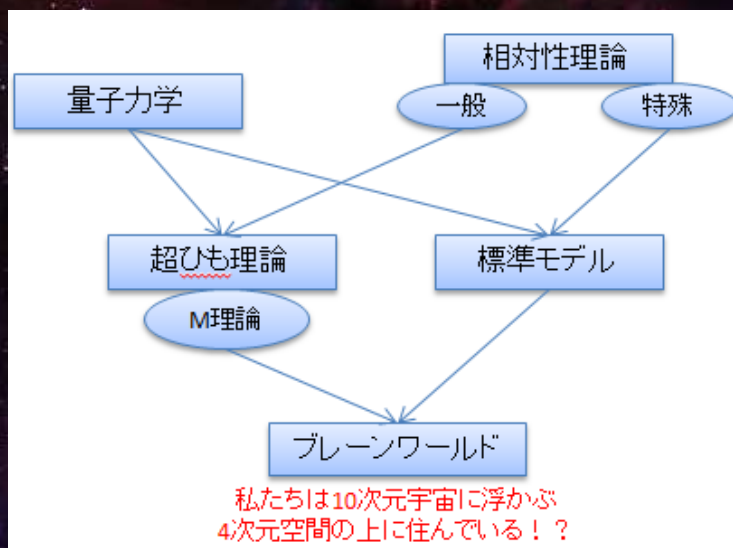
## 人間原理とマルチバース

- この宇宙が存在することの不思議
  - 自然法則の物理定数がごくわずかでも異なる値であれば、生命はもちろん星も銀河も形成されなかった
- 人間原理
  - 人間が存在できるように宇宙の条件が揃えられている
- 平凡原理
  - 地球も太陽も天の川銀河もこの宇宙も宇宙の中心ではない
- マルチバース
  - 無数にある宇宙の中には、たまたま銀河が形成されるようなものもあるということである
- 奇跡中の奇跡
  - この宇宙も人間の存在も、勿論あなた自身も奇跡的存在である

## 多次元・平行宇宙に関する書籍



## 膜宇宙論の背景となった理論



## 超ひも理論

- 物質の最小単位は $10^{-33}\text{cm}$ のひも
- 素粒子をひもの振動パターンで説明
- 超対称性という概念に決定的に依拠
- 一般相対性理論と量子力学の問題を解決
- 重力子の説明、4つの力を統合に成功
- 10次元時空でのみ成立
- 現実の4次元時空を導くためにカルツァ＝クライン理論のアイデアを応用している
- 余剰次元はコンパクト化されている
- 6次元空間の候補の数は $10^{500}$ 個もある



カラビ・ヤウ多様体

## 超ひも理論からM理論へ



## M理論の特徴

- 1次元のひもではなく2次元の膜やより高次元のPブレーンで考える
- 11次元時空で超重力理論と5つの超ひも理論を双対性によって統合できる
- 宇宙は11次元時空のなかの4次元のブレーンかもしれない





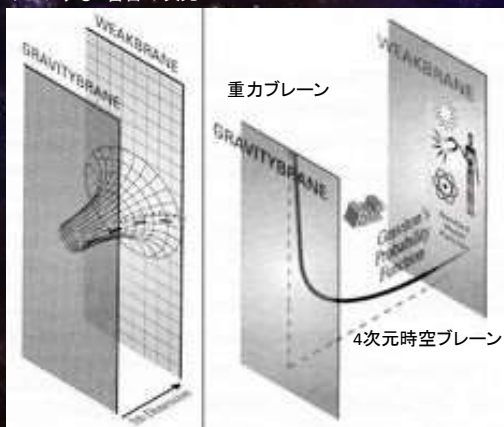
# ワープする宇宙

重力が弱い理由をワープする5番目の次元で説明

ワープする5番目の次元



リサ・ランドール

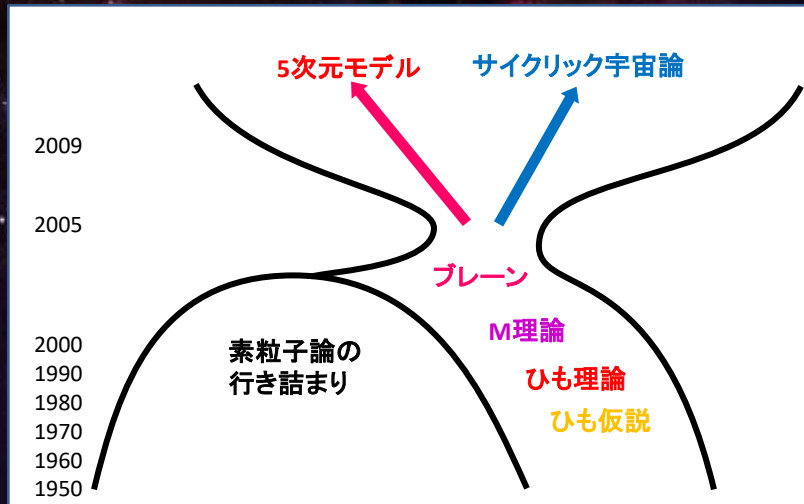


## 異次元の検証実験

- 異次元を計測する
  - 微小距離で重力の逆2乗が破れていないかを計測する
- 大型ハドロン加速器での実験
  - リサ・ランドールが提案する5次元時空にはカルツァ・クライン粒子(KK粒子)が登場する。
  - この本来消えるはずの無いKK粒子が姿を消すことが確認された場合、粒子の姿を消した先が見えない5次元時空であると考えられる

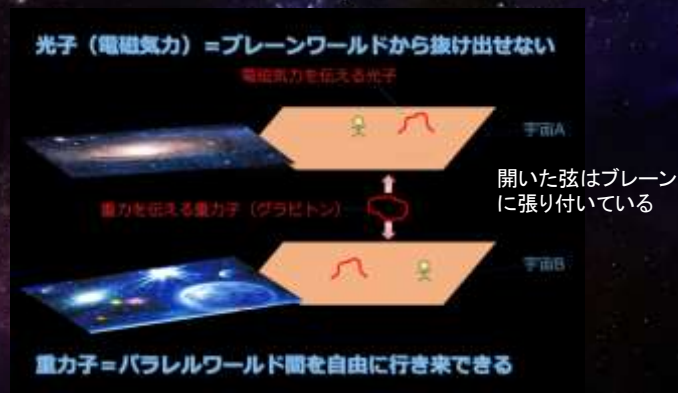


## ブレーンワールドからサイクリック宇宙論へ



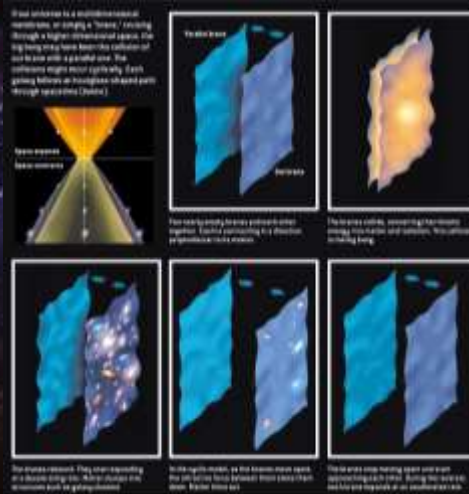
## 余剰次元とブレーン

- M理論から様々なタイプのブレーンの存在が導かれる
- 余剰次元はコンパクト化され通常の低エネルギーの観測手段では見えないとされている
- 余剰次元は小さくはない、低エネルギーの物質や電磁場はブレーン上にのみ存在でき、重力だけは余剰次元にも存在すると考える



## エキピロティック宇宙論

- ヘテロティックM理論をベースにしている
- 2つのブレンワールドの衝突によって新しい宇宙が再生する
- ビッグバン以降の観測結果とは矛盾しない
- インフレーションは必要とされない



宇宙が火から誕生したとする古代ギリシャの考え方「エキピロシス」にちなんだ名前

## サイクリック宇宙論(1)

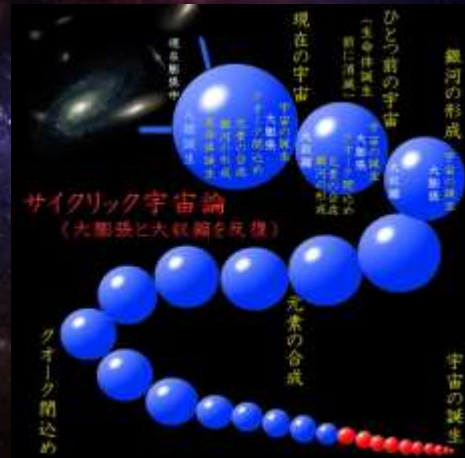
- エキピロティックなサイクリック宇宙論
  - 2つのブレンが1兆年をかけて衝突、跳ね返り、膨張、再接近、再衝突というサイクルを永遠に繰り返す
  - インフレーションモデルと同様に、宇宙の地平線問題、平坦性問題、モノポール問題、宇宙の大規模構造を説明できる
  - インフレーションモデルのようにインフレーションを引き起こすエネルギーは不要で、今日の宇宙の加速膨張を説明するダークエネルギーがありさえすればよい
  - 現在の宇宙は過去50回程度再衝突してできた宇宙である
  - 重力の後押しによってサイクルごとに重力エネルギーが運動エネルギーに変換されて補給されるので、熱力学の第二法則の制約はない



## サイクリック宇宙論(2)

### ● 京都大学の川合教授のサイクリック宇宙論

- 超ひも理論に基づいているが、こちらは2つのブレーンの衝突によるものではない
- M理論の相対性をもとにビックランチがビックバンに実時間で連続するとしている
- 宇宙はビックバンとビッククランチを50回ほど繰り返して大きくなってきた



## インフレーション宇宙論 vs サイクリック宇宙論

### ● インフレーション宇宙論

- 無数の宇宙が存在するというマルチバースの宇宙観がもたらされる
- 現在の宇宙は無数にある宇宙のひとつで、偶然に人間が存在できるような物理定数をもった宇宙である
- 無数にある物理定数の組合せのうちのひとつがこの宇宙をもたらした
- 真空中にインフレーションをもたらすエネルギーの存在を仮定している

### ● エキピロティックサイクリック宇宙論

- 宇宙は2つのブレーンの衝突・跳ね返りを繰り返す
- 2枚のブレーンを定期的に引き寄せるバネ状の力の存在を仮定している
- 無数の宇宙の存在を必要としないので、人間の存在が可能な宇宙を説明するのに人間原理的な考えは必要としない
- 宇宙の加速膨張で知られているダークエネルギーだけあればよい
- 宇宙定数が小さい理由をうまく説明できる

### ● 決着は？

- 宇宙重力波を探索して、それがインフレーションモデルの予測と一致するか否か
- 宇宙背景放射の偏光の中にBモードと呼ばれるパターンがあるか否か

お わ り

ご静聴ありがとうございました