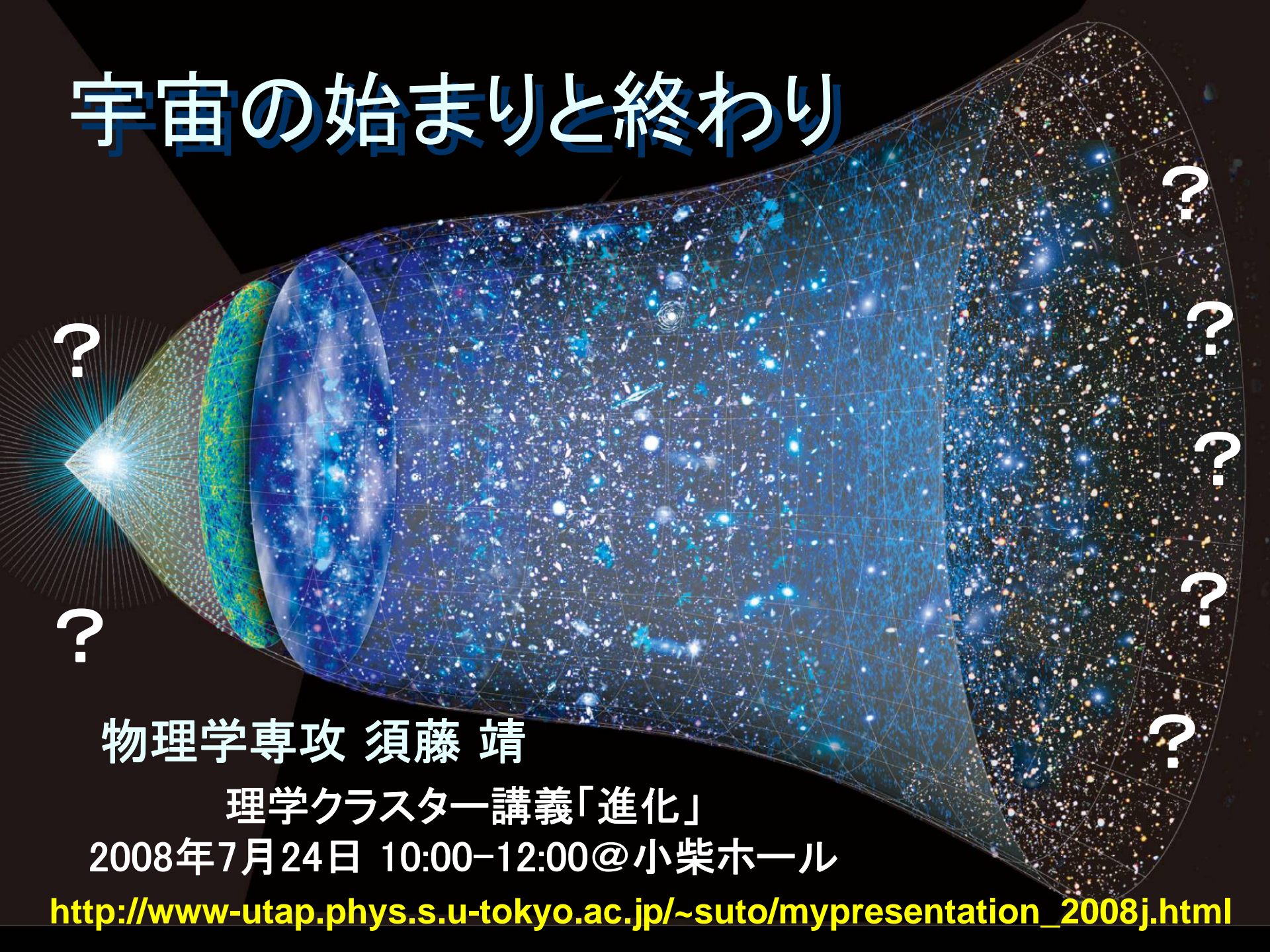


宇宙の始まりと終わり



物理学専攻 須藤 靖

理学クラスター講義「進化」

2008年7月24日 10:00-12:00@小柴ホール

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2008j.html

本講義の内容

- I. 宇宙に始まりがあると考えられる理由
- II. 宇宙はなぜ進化するか
- III. 宇宙の進化と物質世界の進化
- IV. 宇宙の未来
- V. 宇宙論の進化

I 宇宙に始まりがあると 考えられる理由

let there be light

■ 旧約聖書 創世記 天地創造

- 初めに、神は天地を創造された。
- 地は混沌であって、闇が深淵の面にあり、神の霊が水の面を動いていた。
- 神は言われた。「光あれ。」こうして、光があった。



カリフォルニア大学
バークレー校のロゴ

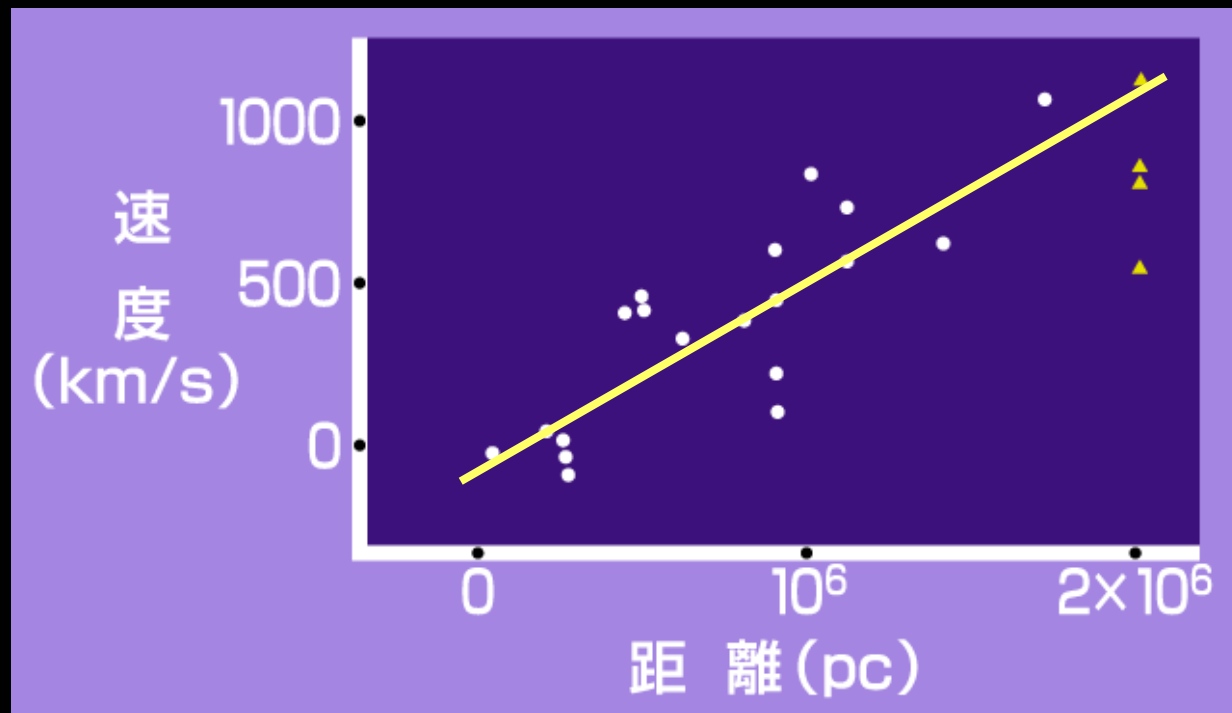
宇宙に始まりはあるか？

- 全く自明ではない基本的な問いかけ
 - 始まりがあるとすると
 - なぜ始まったのかと聞きたくなる
 - その前は何だったのかと聞きたくなる
 - 「神様なしで」このような禅問答を避けるには、
 - 始まりも終わりもなくずっと同じ状態のまま
 - 無限に輪廻転生を繰り返す
- のどちらかだと考えたほうがずっとすっきりする
- つまり、**哲学的・宗教的には「宇宙に始まりはない」あるいは「創造主がいる」ことにしないと面倒**
 - **にもかかわらず「始まりはある」ことになっている**

天文観測：宇宙膨張の発見

■ エドウィン ハッブル (1889-1953)

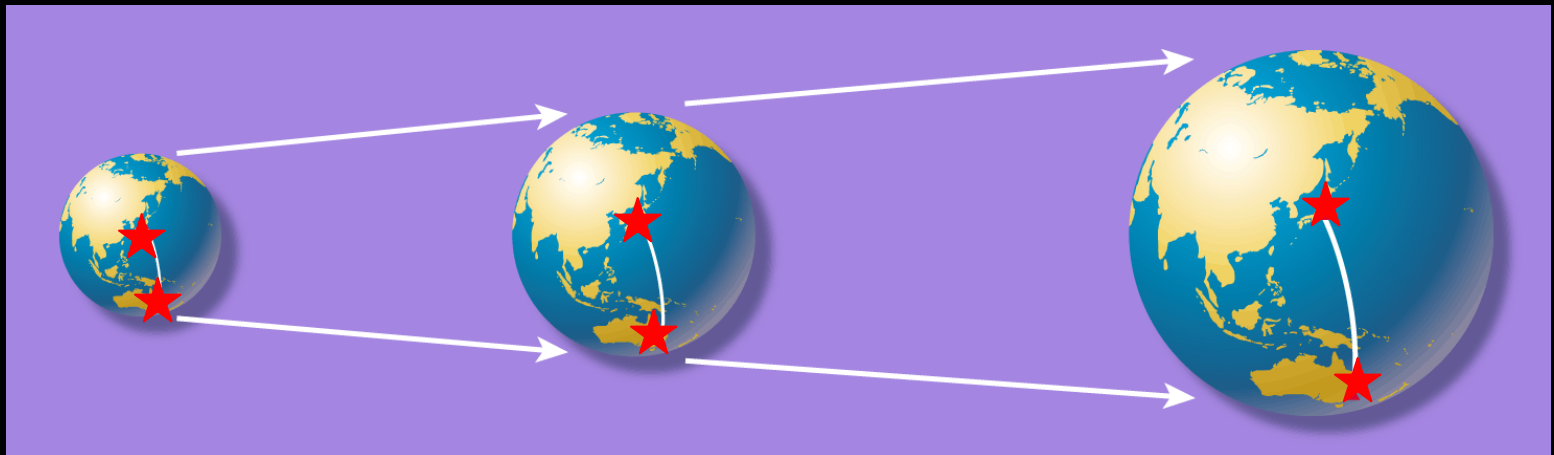
- 遠方の銀河はその距離に比例した速度で遠ざかっていることを発見 (1929年)



ハッブルの法則の民主的解釈

- ハッブルの法則は、我々の銀河系を中心とした場合に限らず宇宙のどこでも成り立つ

この法則は、単に個々の銀河の運動ではなく、宇宙があらゆる場所で全体として一様等方に膨張している結果



ハッブルの法則と宇宙年齢

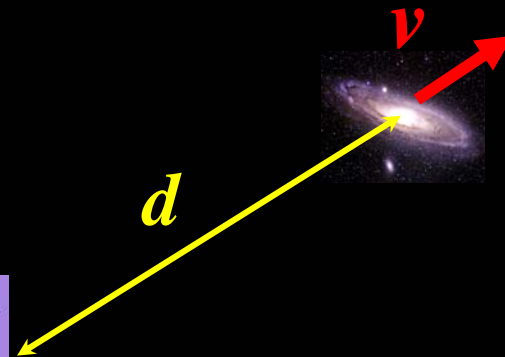
- ハッブル定数の逆数は宇宙年齢の目安

$$H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc}$$
$$\approx 1/(100h^{-1} \text{ 億年})$$



$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

$$h = 0.7 \text{ の場合 } t_H \approx 140 \text{ 億年}$$



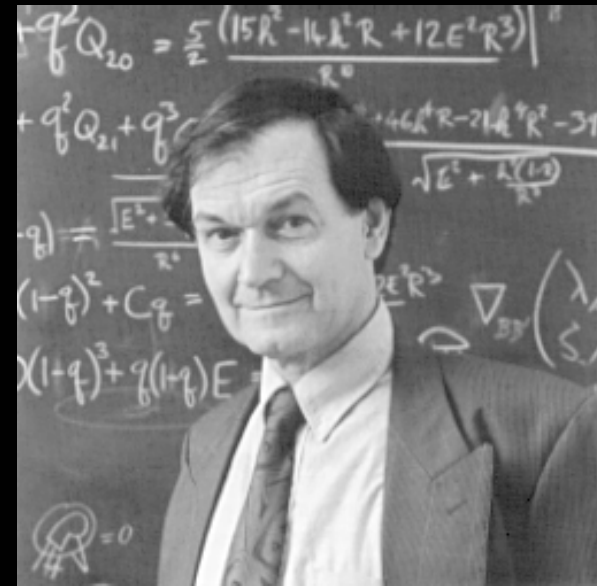
後退速度が一定ならば、 d/v だけ過去に遡れば宇宙全体が一点に集まる



宇宙には始まりがある！



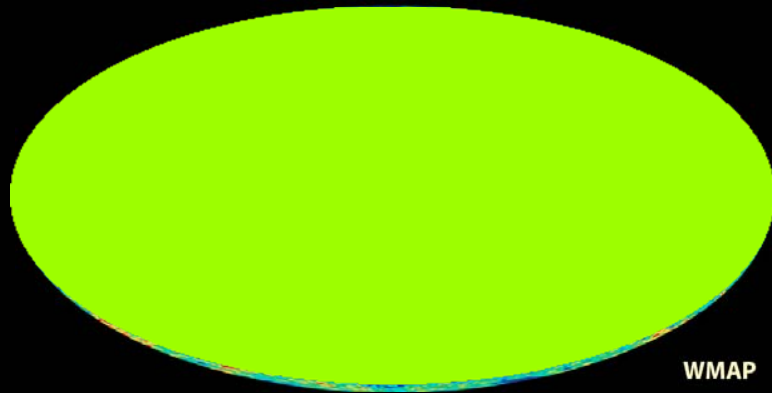
ではその前は？ ～特異点定理と 古典論の限界～



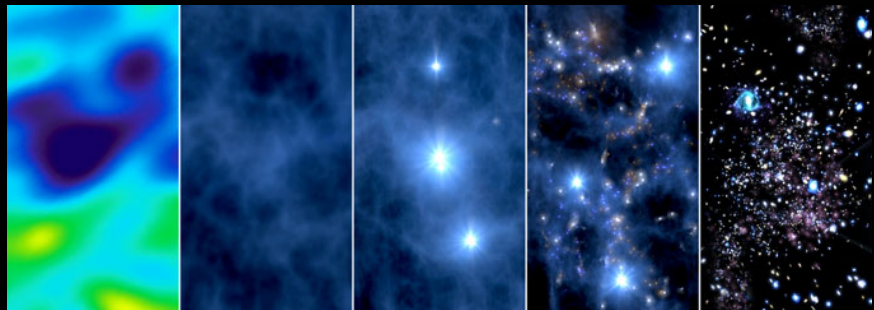
- 英国のロジャー・ペンローズとスティーブン・ホーキングによって、一般相対論によれば**初期特異点(宇宙の始まり)**が必然的に存在することが証明された(1970年)。
 - 強いエネルギー条件($\rho + 3P > 0$)が満たされている限り過去に $R(t) = 0$ となる点が存在する
 - あくまで古典論の結果であり、量子論を考慮すれば物理的には厳密な特異点は存在しないだろうと期待されている
- 量子重力理論の完成を待たなくては、宇宙の誕生の瞬間を理解することはできない

Ⅱ 宇宙はなぜ進化する

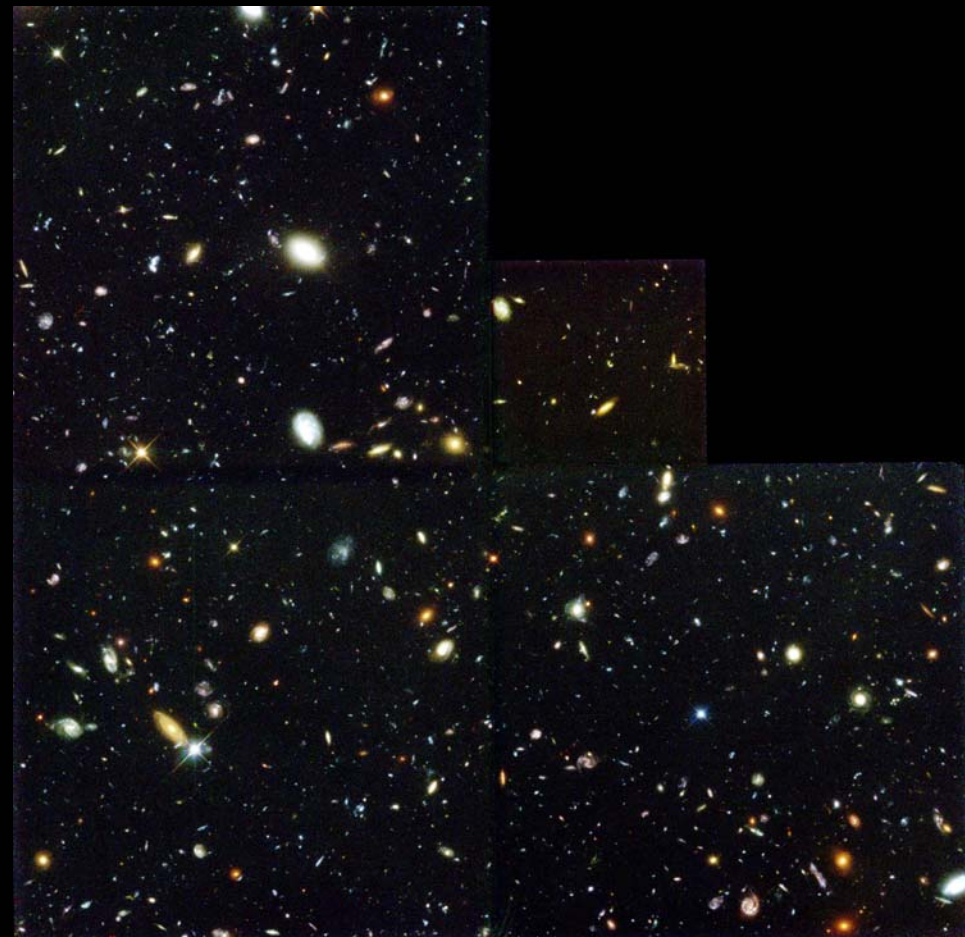
38万年



時間⇒⇒⇒



数十億年後



Hubble Deep Field
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

宇宙の進化 ≠ 生物の進化

- 世代交代によってDNAが変化し、生物種が変わることが進化ならば、**一世代限りの時間発展を進化と呼ぶべきではない？**
 - 「嫌われ松子の一生」、「我が子の成長」であって「嫌われ松子の**進化**」、「我が子の**進化**」ではない
 - しかしながら、「宇宙の成長 (growth of the universe)」ではダサいので「宇宙の進化 (evolution of the universe)」と呼ぶ慣わしになっている
- さらに、(物理法則が決まっていれば)「宇宙の進化」は必然的であり、偶然によるところの多い「生物の進化」とは意味が異なる

生命の誕生と進化

- 究極的には物理法則から説明し得ることを疑っている人はいない(だろう)
- しかし、どこかに地球とまったく同じ惑星が存在するとして、そこでも生命が必然的に誕生するかどうかは自明ではない
 - 何らかの偶然(外的要因)の存在が本質的
 - 地球における生物の進化・多様性を「予言」することは不可能(だと思う)
 - ただし、それらをダーウィンの「あとづけ」の理屈で、ある程度理解することは可能

宇宙の誕生と進化

- 宇宙の誕生もまた「物理法則」によってすべて説明できるはずと考えている人は多い
 - これは(現在我々が正しく理解しているかどうかは別として)物理法則さえ与えられれば、宇宙の創生を物理学で記述でき、その後の進化も予言できるという「信念」
 - しかしながら物理法則自体が実は偶然の産物かも知れない
 - 超弦理論のランドスケープと人間原理
- 宇宙の「誕生」は別としても、「進化」に関する限りこの信念は正しいらしい
 - ビッグバンモデルに基づく観測的宇宙論の成功
 - 宇宙の進化は偶然に左右されることはほとんどないからこそ、現在の観測データから宇宙の初期条件を再構築できた

そもそもなぜ宇宙は進化できる？

- **熱力学第二法則**: エントロピーは増大し、やがてエントロピー極大の熱平衡状態に達する
 - 宇宙初期はすでに熱平衡に近い一様等方状態(宇宙マイクロ波背景放射が観測的に証明)
 - これ以上エントロピーは増やせない? 構造(秩序、情報)を形成するとエントロピーが減少する? (宇宙の熱的死)
- **宇宙が必然的に進化する要因**
 - 重力相互作用の存在(自己重力系の比熱は負)
 - 急速な宇宙膨張による到達すべき熱平衡状態の変化に追いつけず、非平衡状態が維持されるという階層を形成
 - 膨張によって生み出された膨大な空間にエントロピーを捨てることで、自身のエントロピーを下げ秩序を形成する領域の誕生(ただし全系のエントロピーは増える)
(詳しくは 杉本大一郎著 『いまさらエントロピー?』 を参照)

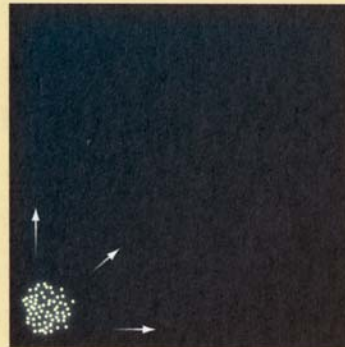
非平衡重力系としての膨張宇宙のエントロピー

低エントロピー

高エントロピー

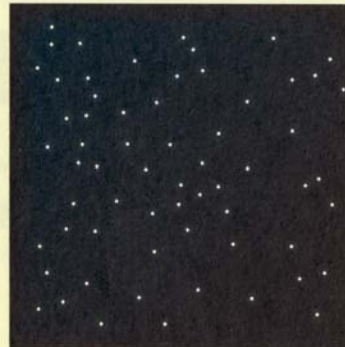
重力なし，体積一定

重力が無視できるとき，箱の中の気体は，箱の隅に集まっているときにエントロピーが小さく，ばらばらに広がっているときにエントロピーが大きい。だから，時間とともに気体は一様に広がる傾向にある。



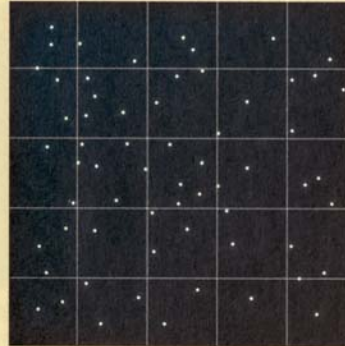
重力あり，体積一定

重力の効果が重要になると，状況が一変する。気体が重力で引き合って1か所に集まり，ブラックホールになったときにエントロピー最大だ。事実，重力が働いている気体は集まろうとする。ブラックホールが周りの気体と平衡状態になると，いつまでもそのままの状態である。



重力あり，体積膨張

箱のサイズが膨張している場合，気体は集まってブラックホールになるが，やがて蒸発して消滅する。残った気体は薄く拡散していき，エントロピーはいつまでも増え続ける。

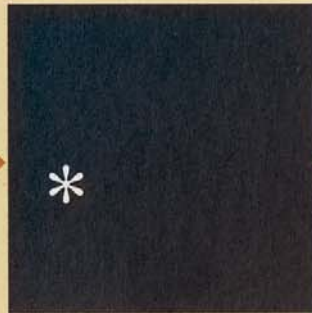


宇宙の進化とエントロピー

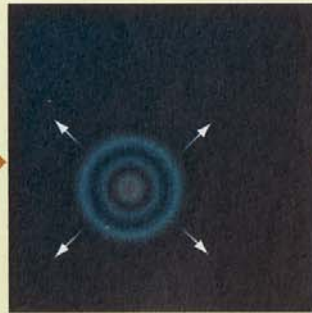
私たちの宇宙の誕生前



空間にほとんど何も無い



ある領域で量子場が揺らぐ



その領域がインフレーションを起こす



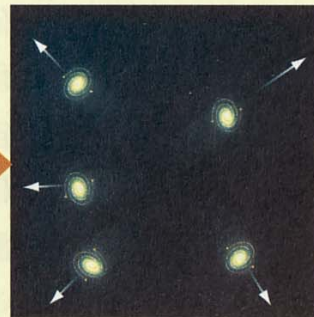
インフレーションが終わり、空間はほぼ一様なガスで満たされる



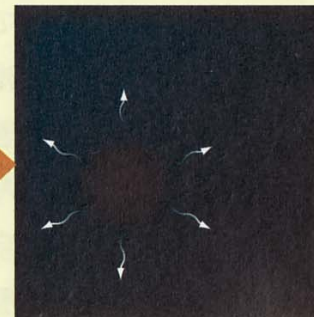
ガスが寄り集まって銀河が形成される



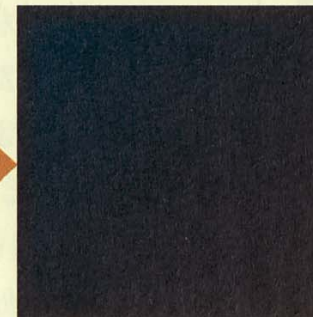
現在の宇宙



宇宙の加速膨張で銀河どうしが引き離される



銀河が重力でつぶれてブラックホールになり、やがて蒸発する

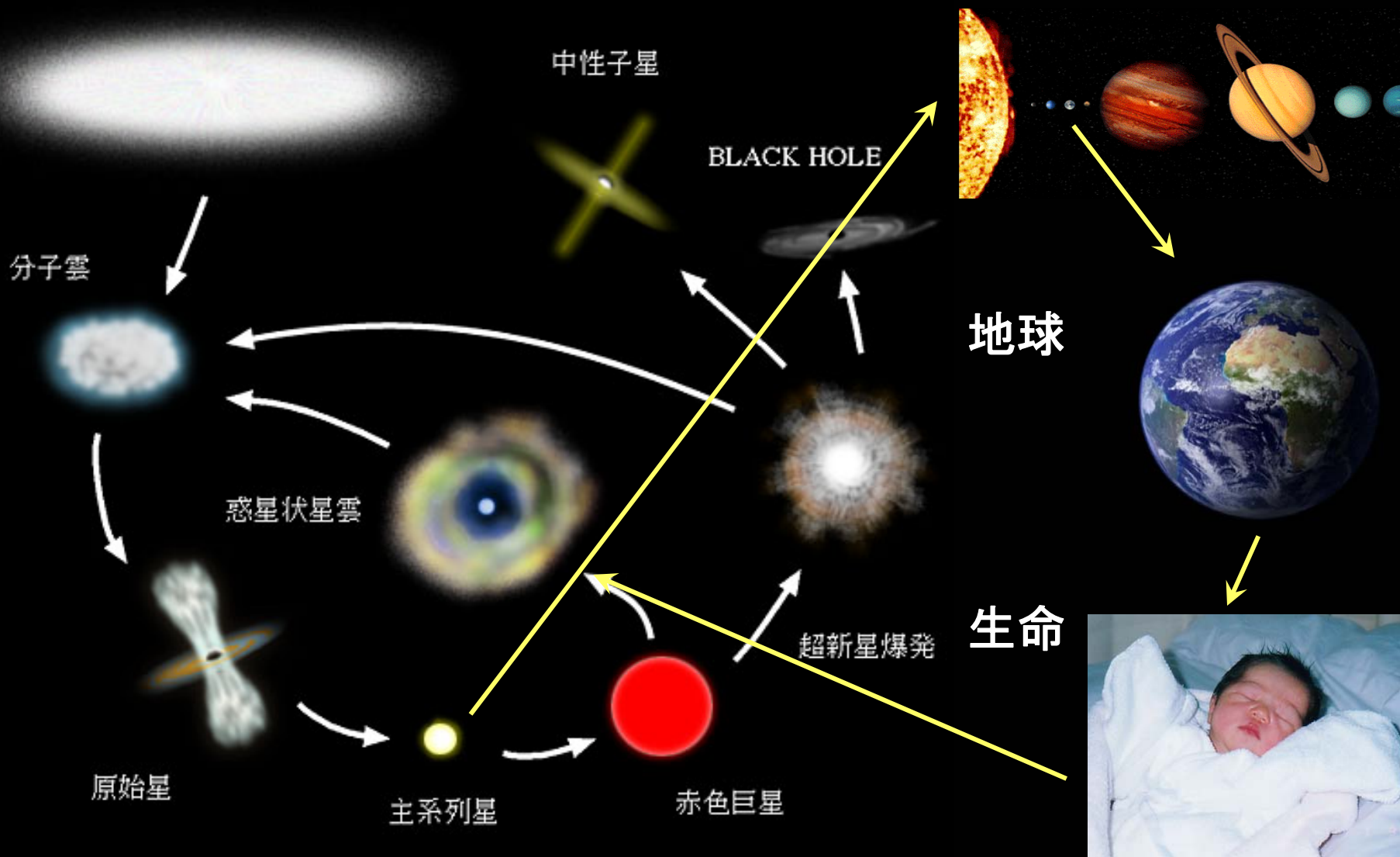


空間にほとんど何も無い

Ⅲ 宇宙の進化と物質世界の進化

BIG BANG

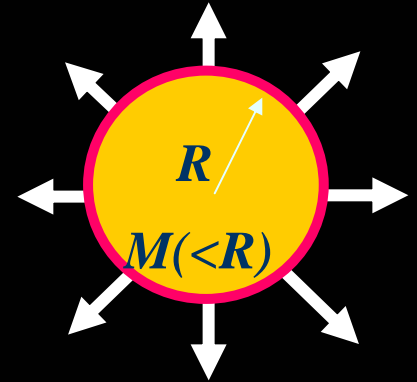
太陽系



膨張宇宙の力学

■ ニュートン力学によるテスト粒子の運動

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = - \frac{GmM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$



- 遠心力と重力を釣り合わせるケプラー運動だけが安定な軌道
⇒ 球対称性を破る(角運動量が0でない)
- 球対称性を保ったまま(半径Rの球殻を考え動径方向の運動しか許さない)だと、安定軌道はない ⇒ 膨張あるいは収縮
- 星のような天体の場合は、圧力勾配によって安定化

■ 一般相対論による宇宙の力学もこれと同じ

- 宇宙は膨張するか収縮するか、静的モデルは不安定

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = - \frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

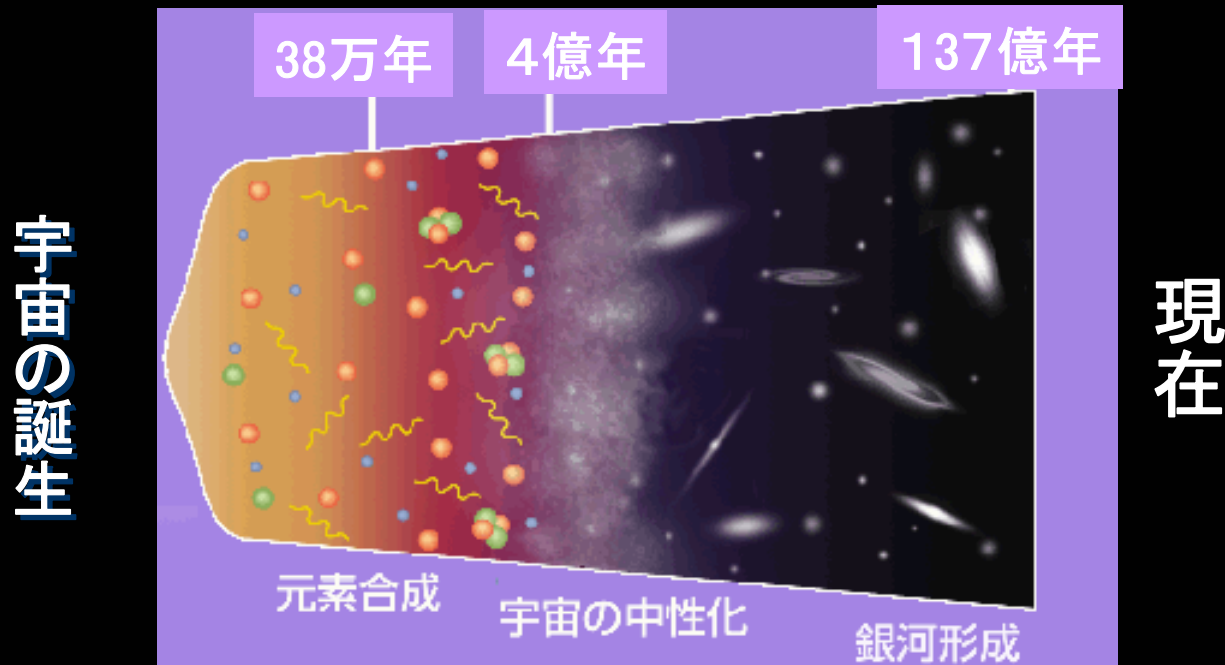
質量密度 圧力

宇宙定数
(ダークエネルギー)

フリードマン方程式

宇宙膨張と物質世界の進化

- 宇宙膨張によって密度と温度が下がる
 - 光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へ
- $t \doteq 3$ 分: 軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年: 電離した宇宙が中性化 (陽子+電子 から 水素原子)
- $t \doteq 4$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \doteq 10$ 億年 ~ 137億年: 星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成



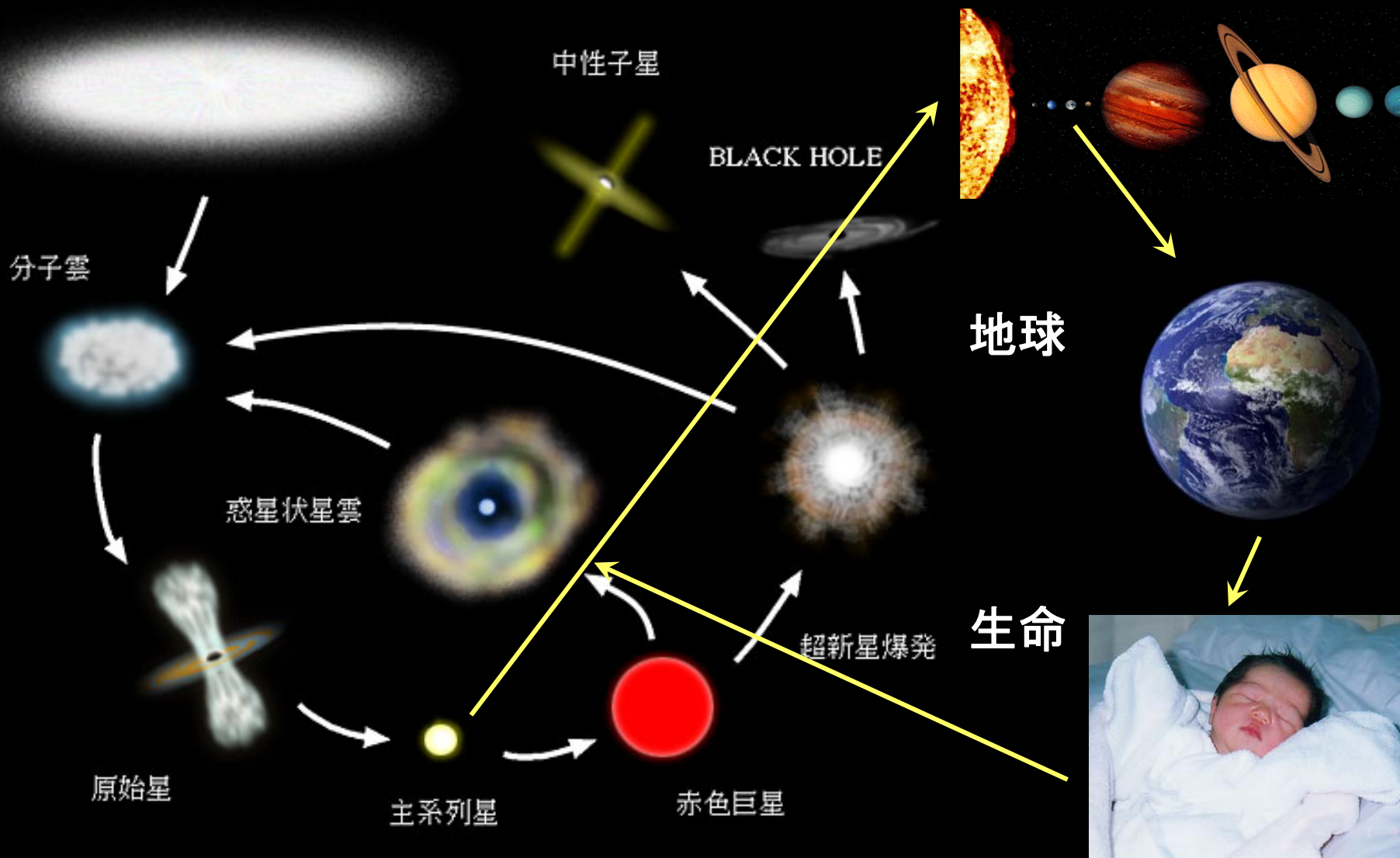
我々は星の子供：宇宙の元素循環

- ビッグバン後、最初の3分間で合成された軽元素から、数億年後に**第一世代の星**が誕生
- **星の内部で重元素が合成**され、それが星の進化の最終段階で宇宙にばらまかれる
- それを材料として**次の世代の天体**が誕生
- この過程の繰り返しが宇宙での元素循環
- **我々は、かつて宇宙のどこかで生まれた星の内部で合成された重元素、さらには宇宙最初の3分間で合成されたヘリウムを材料としている！**

ビッグバン、天体形成史、元素循環

BIG BANG

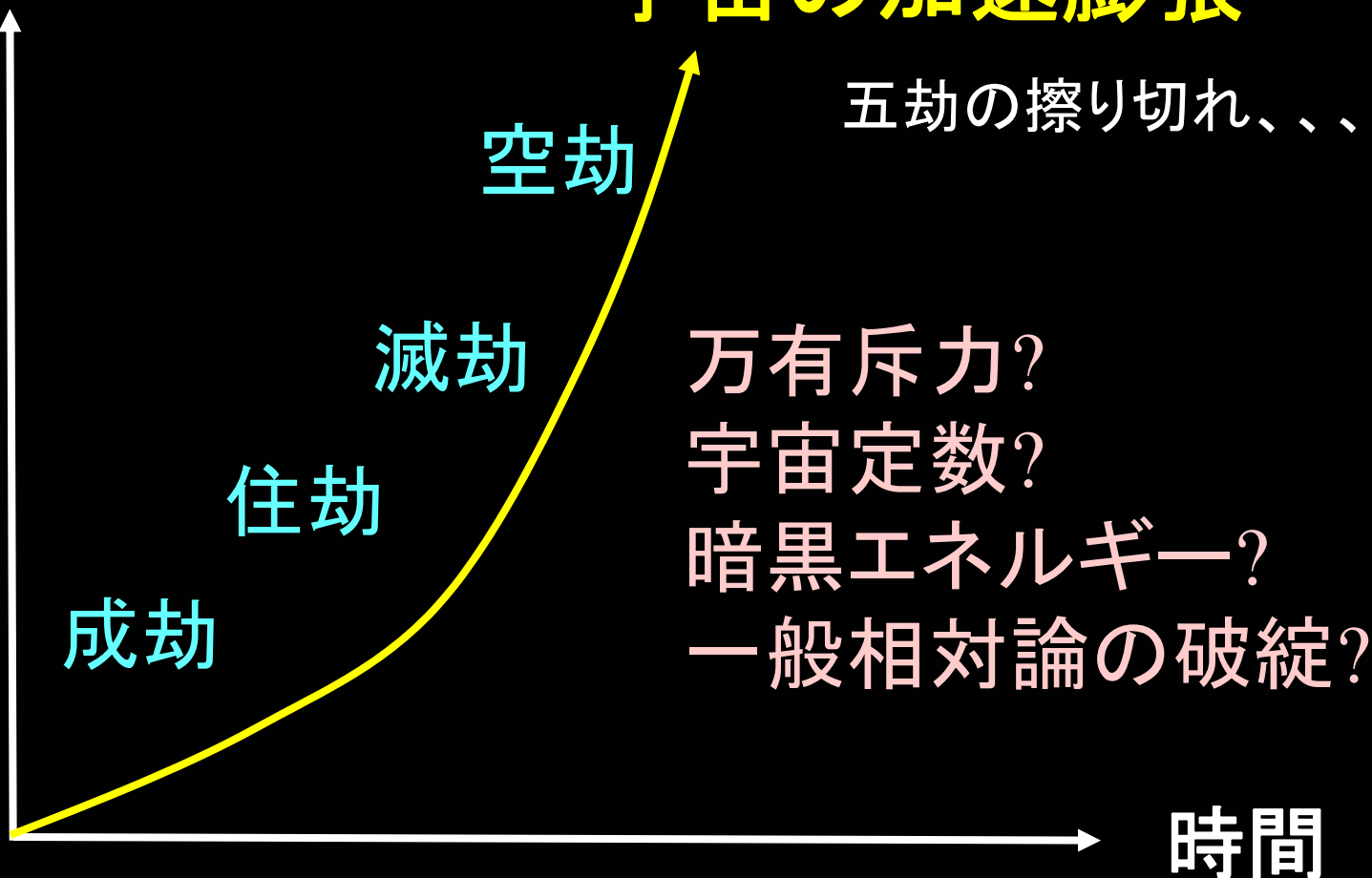
太陽系



IV 宇宙の未来

宇宙のサイズ

宇宙の加速膨張

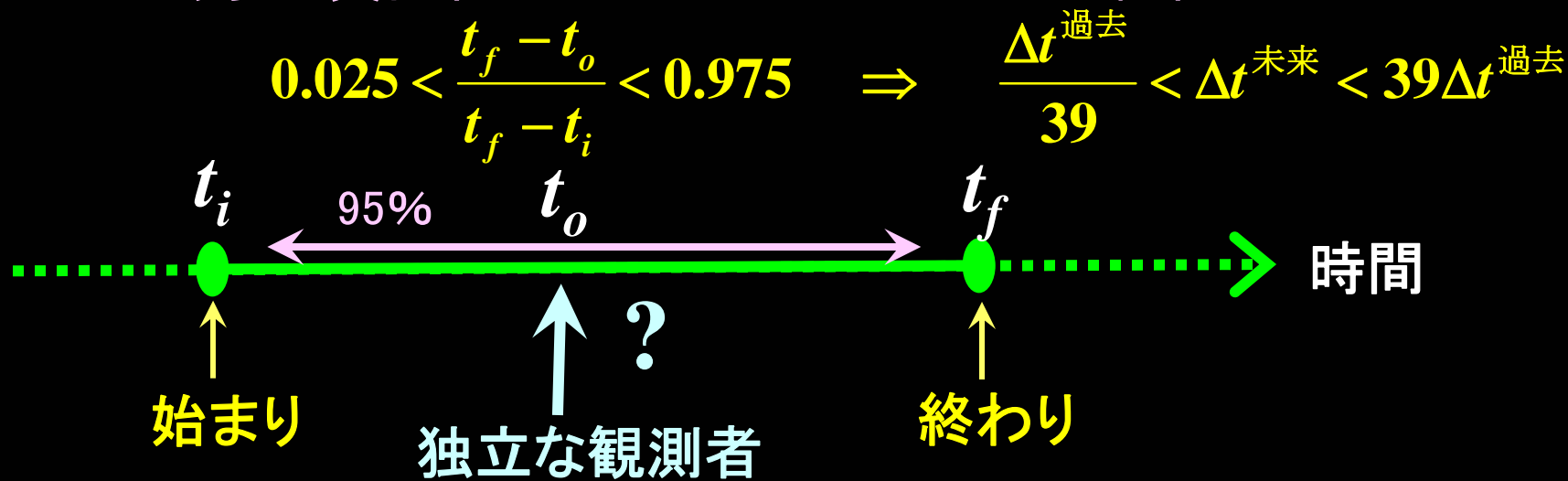


宇宙に終わりはあるか？

- 「始まり」があるのならば、「終わり」もあるはず
 - **地球の終わり**: 50億年後には、太陽は地球の公転軌道ほどのサイズの赤色巨星になり、地球は飲み込まれる
 - **文明の終わり**: 人類(文明)はそれよりはるか以前に、疫病、核戦争、資源の枯渇などによって実質的に消滅しているであろう
 - **宇宙の終わり**: 宇宙膨張の力学がすべてを決める
 - 無限に膨張を続ける \Leftrightarrow 宇宙の密度が0に漸近する空虚な宇宙？
 - やがて収縮に転じる \Leftrightarrow 初期特異点のように密度が発散し、それ以後の時間発展が記述できない宇宙？

物事の余命を予言できるか？

- 物事に明確な始まりと終わりがあることだけ分かっている場合、終わりの時期をどうやって予想する？
 - 我々が特別な存在でない限り、我々自身は平均値
 - つまり、始まりから今までの時間と、これから終わりまでの時間はほぼ等しいはず
 - もう少し真面目にやると95パーセントの確率で



“Implications of the Copernican principle for our future prospects”

J.R.Gott Nature 363(1993)315

我々の文明の余命を予測する

- 地球が誕生して約46億年。約50億年以内に、膨張した太陽に飲み込まれる
- 去年できたベンチャー企業が次の年つぶれても驚くには値しないが、江戸時代から続いた老舗が来年つぶれる可能性は低い
- 毎年無数のラーメンが発売されては消えていくが、チキンラーメンやチャルメラのような昔ながらの銘柄はずっと生き残っている
- 私は昭和33年生まれであるが、昭和は64年で終わった
- 文明が誕生してから $\Delta t^{\text{過去}} \doteq 2000$ 年とすれば、我々の文明が終わるまでの時間は95パーセントの確率で

$$\frac{\Delta t^{\text{過去}}}{39} < \Delta t^{\text{未来}} < 39 \Delta t^{\text{過去}}$$



$$50 \text{年} < \Delta t^{\text{未来}} < 8 \text{万年}$$

宇宙の未来

宇宙の歴史が消える日

加速を続ける宇宙膨張によって
宇宙そのものの起源を示す証拠が
いずれ消し去られてしまう

L. M. クラウス (ケース・ウェスタン・リザーブ大学)
R. J. シェラー (ハンダービルト大学)

宇宙が膨張，視界は狭く

宇宙は無限かもしれないが、私たちの周りの宇宙(紫の球)と、そのうちで私たちから観測可能な宇宙(内側の黄色の球)で何が起るかを考えよう。空間が膨張するにつれ、銀河(オレンジ色の点)は散り散りになる。時とともに遠くからの光が届くようになるから、地球上にいる私たち(あるいは私たちの祖先や子孫)から見える範囲は着実に広がっていくが、それよりも銀河が散り散りになるペースが速い。いまから約60億年前に宇宙膨張は加速し始め、遠方の銀河は光速を超えるスピードで私たちから遠ざかるようになった。

④ ついには、私たちから見えるのは自分たちがいる1つの超大型銀河と、何も無い虚空だけになる。

銀河
観測可能な領域
その外側に広がる空間

- ① 加速膨張が始まったときには、最も多くの銀河が見えた。
- ② 観測可能な領域が拡大するが、宇宙全体がそれを上回るスピードで膨張する。この結果、私たちから見えるものは少なくなる。
- ③ 遠方の銀河(私たちの銀河と重力で結びついていない銀河)は視界の外に出てしまう。一方で、近くの銀河は重力で引き合っって合体する。

注：宇宙は等方的に膨張しているので、天の川とは別の銀河にいるエイリアンにとっても、宇宙の見え方はこれと同じになる。

宇宙の未来

日経サイエンス
2008年6月号

The End of Cosmology ?
L.M.Krauss & R.J.Scherrer



現在 夜空に伸びるぼんやりした光の帯は、天の川銀河の銀河円盤。アンドロメダ銀河やマゼラン雲など、いくつかの近傍銀河は肉眼で見える。望遠鏡を使えば数十億個もの銀河が見える。



50億年後 アンドロメダ銀河が近づいてきた結果、夜空いっぱいに見える。太陽は赤色巨星に膨れあがった後に燃え尽き、地球は酷寒の世界となる。

- 50億年前 宇宙の加速膨張始まる
- 50億年後 太陽が一生を終え、地球を飲み込む
天の川銀河とアンドロメダ銀河が衝突
- 1000億年後 超銀河形成、他の銀河は視界から消える
- 100兆年後 恒星が燃料を使い果たして消失
- 10^{37} 年後 物質を構成している陽子が崩壊

1000億年後 天の川銀河は球状の超銀河になり、地球はその外縁部を“見捨てられた天体”として浮遊しているかもしれない。他の銀河はすでに視界から消え去った。

100兆年後 消灯の時。最後の恒星が燃え尽きる。ぼんやりと光るブラックホールと、どこかの文明がともした人工照明を除き、宇宙は暗闇となる。最後に、銀河が崩壊してブラックホールとなる。

仏教的宇宙史観：四劫と億劫

- 四劫：世界の成立から破滅に至るサイクル
 - **成劫**：世界の成立から、人間が住み、地獄から色界天までが成立する期間
 - **住劫**：人類が世界に安穩に存在する期間
 - **壊劫**：世界の破滅に至る期間
 - **空劫**：次の世界が成立するまでの何もない期間
- 一劫は43億2000万年に対応（注：別の説もあり）
 - 宇宙の年齢137億年から考えると、**現在は壊劫の終わりから空劫の初め**に対応！
 - 「**億劫**」とは、 4.3×10^{21} 年かかるほど大変という途方もない意味！（五劫の擦り切れも半端じゃない長さ）

宇宙膨張の未来とダークエネルギー

- 宇宙は膨張している(ハッブルの法則、1929年)
- 将来はどうなるか?
 - 宇宙膨張の加速度の符号を観測する
- 負の加速度、つまり減速する?
 - 重力は常に引力なのであたりまえ
 - やがて密度が十分小さくなり、加速度が0の等速膨張
 - 膨張が遅くなりやがて収縮に転ずる
- 正の加速度、つまり膨張がさらに加速する?
 - 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
 - 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な可能性
 - にもかかわらず観測的に証明されている
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)の存在

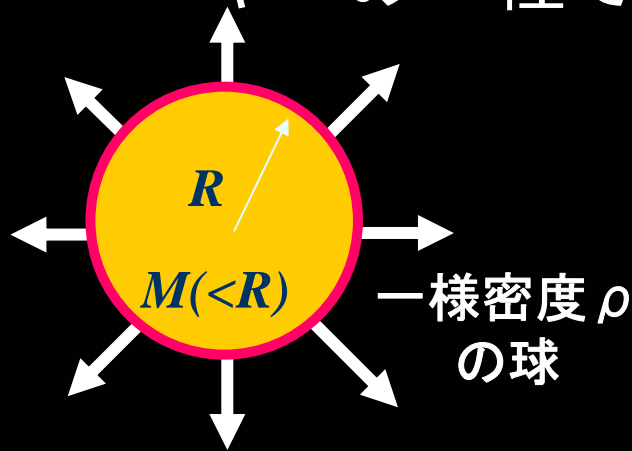
宇宙膨張の方程式

■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」(Λ : ダークエネルギーの一種でその有力候補) が存在し得る

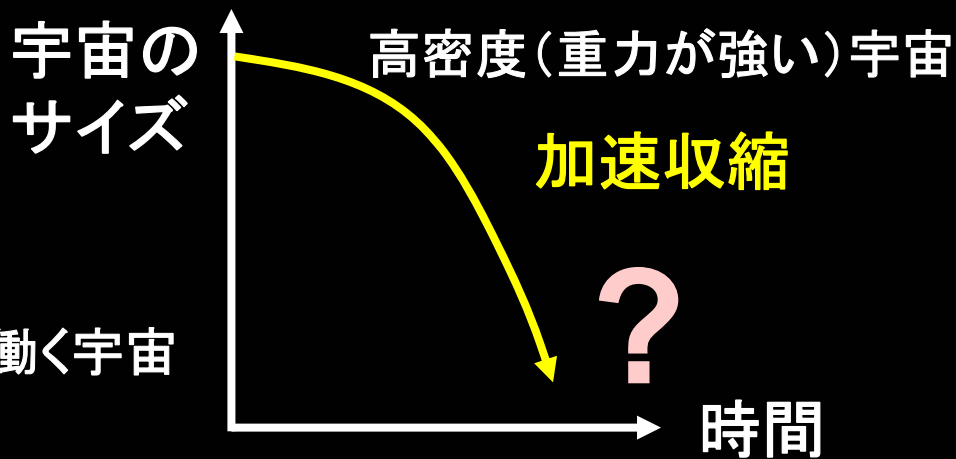
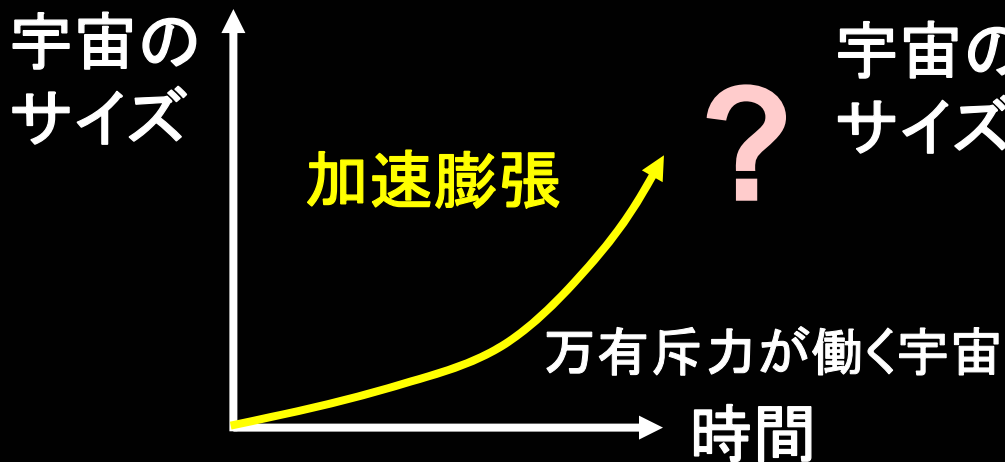
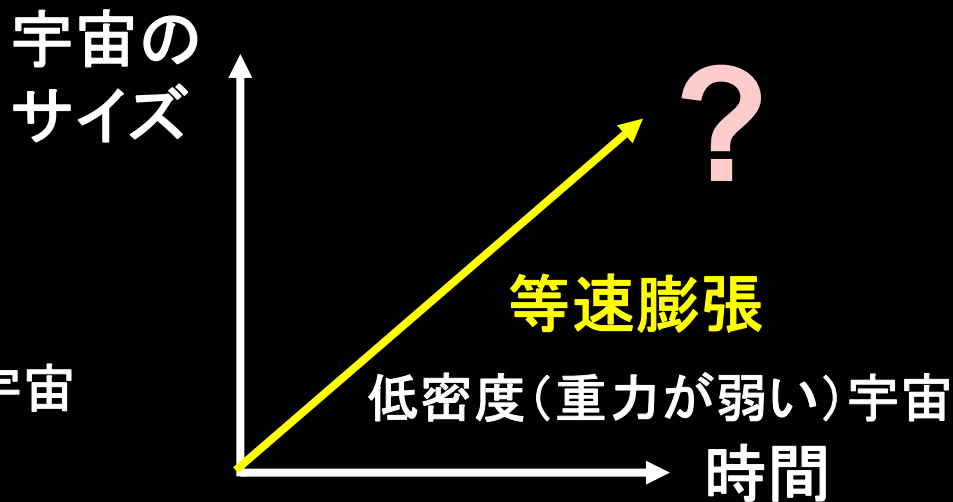
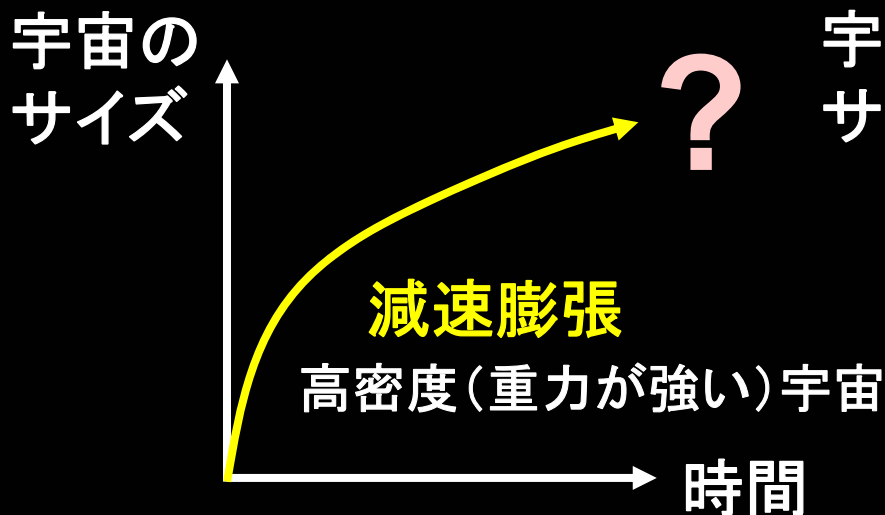


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙の構造と進化の観測を通じて、宇宙の組成を決定する ⇒ 宇宙の未来もわかる

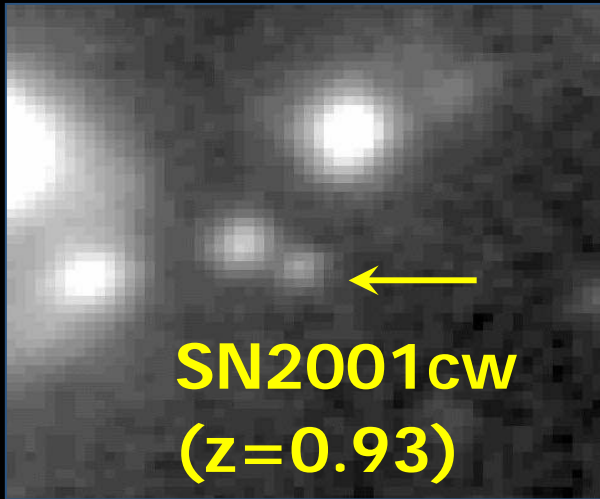


標準光源: Ia型超新星

見かけの明るさ: F

真の明るさ: L

Ia型超新星



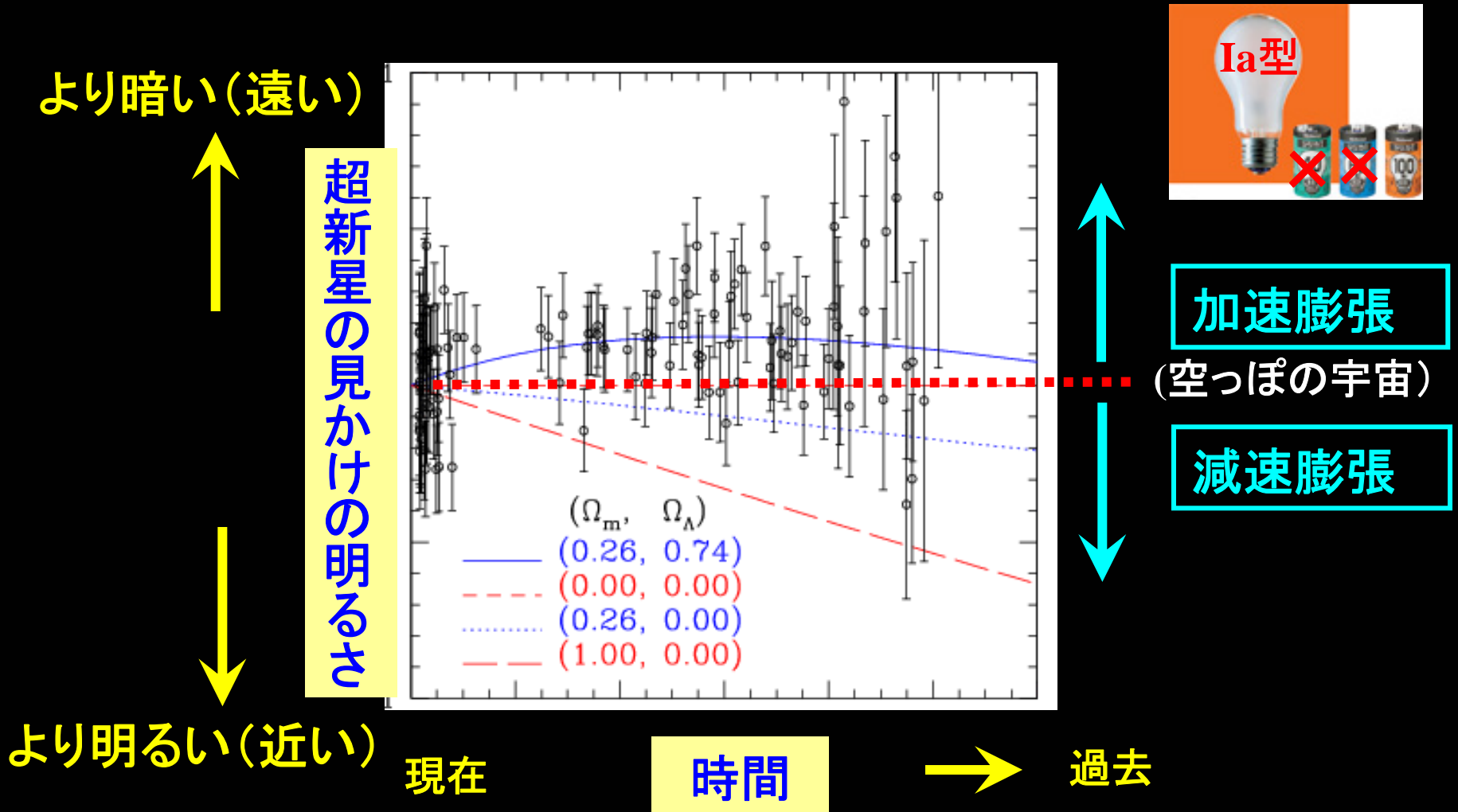
距離: D



$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見

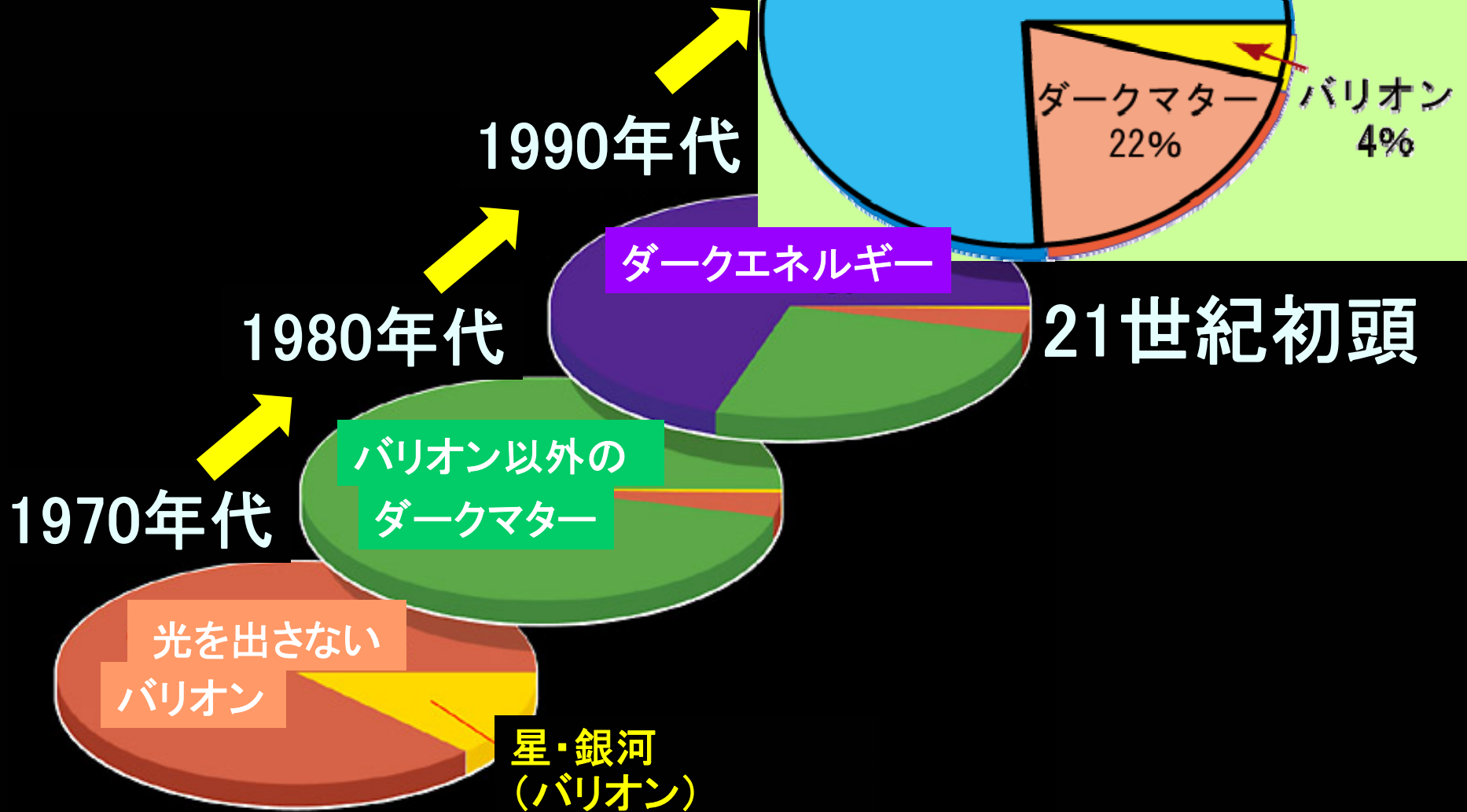


- 宇宙は加速膨張をしていた！(1998年)

宇宙のダークエネルギー

- **宇宙の主成分**： 全エネルギーの4分の3
- **ダークマターとは異なり、空間的に局在しない**
 - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみだしている
- **宇宙の加速膨張源**： **実効的に「万有斥力」**
 - 1917年にアインシュタインが導入した宇宙定数はその一例
 - 正体は不明
- **ダークエネルギーは、いまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべ**

V 宇宙論の進化



宇宙観は本当に進歩したか？

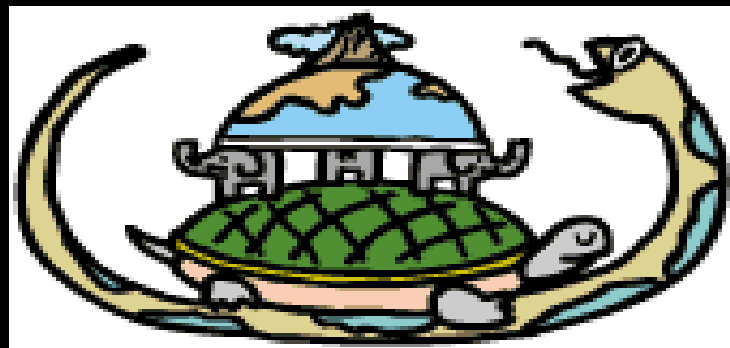
古代エジプト



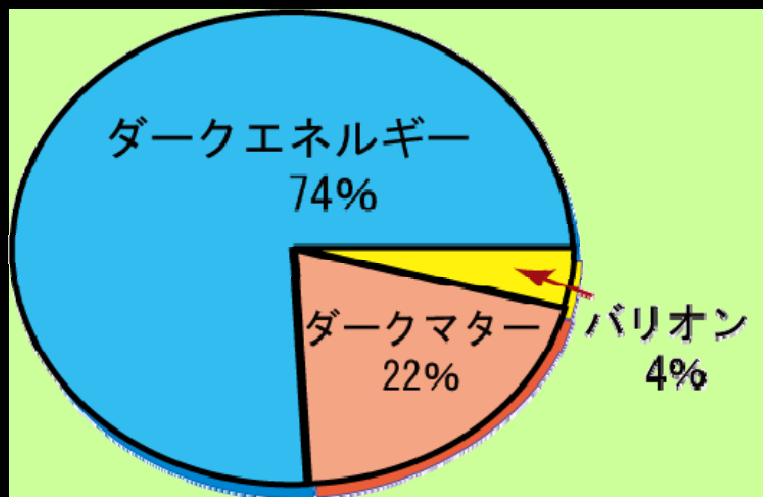
古代中国



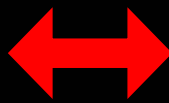
古代インド



21世紀初頭



進歩？



青空しか知らないとこの世界だけが
唯一の存在のように思ってしまう

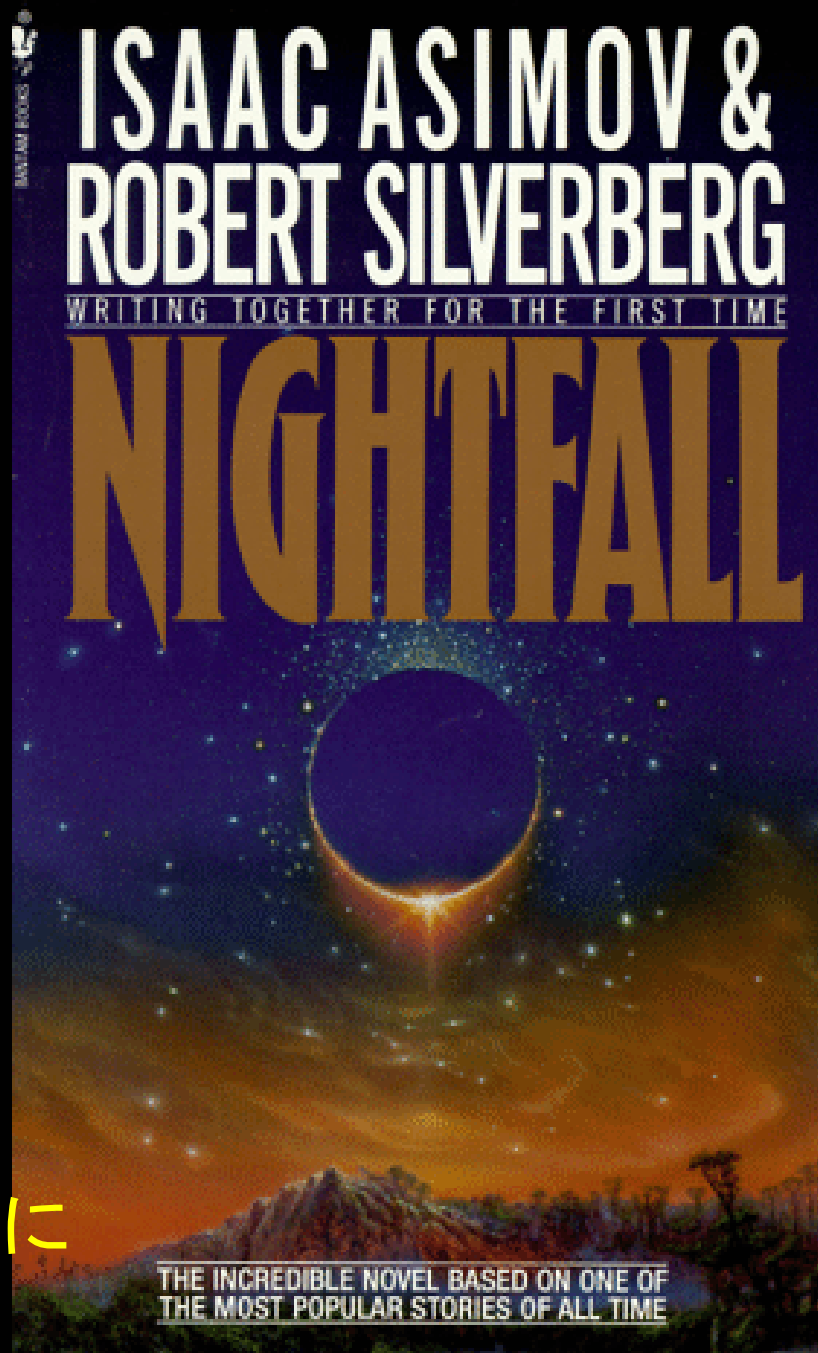


(すばる観測所、田中壱氏撮影)

夜来たる



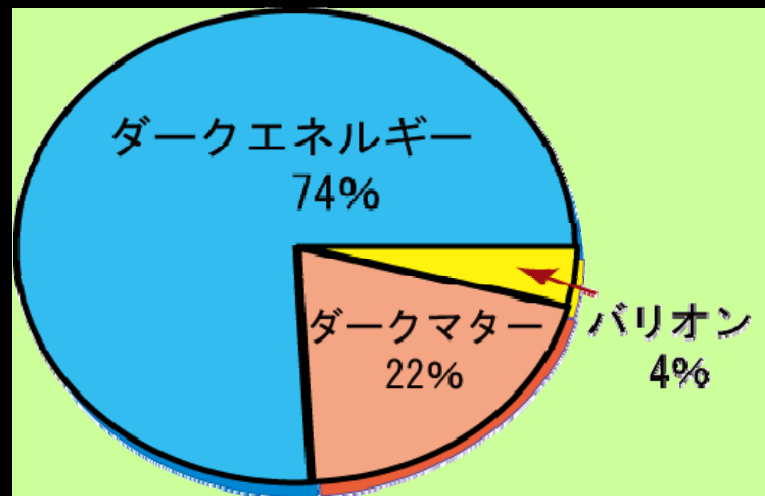
6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに
二千年に一度の夜が訪れる



「我々は何も知らなかった」

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

宇宙の始まりと終わり: 研究の進展によつてま す謎が深まった



- 宇宙の始まりと終わりが科学的に議論できる時代
- **我々は宇宙の96%を全く理解していない**
 - 約22%はダークマター
 - 約74%はダークエネルギー
 - これら暗黒成分が宇宙の始まりと終わりを決める
- **宇宙の果ての観測が微視的世界の未知の階層を発見**
- **ダークエネルギーの解明は21世紀の新しい物理学を切り拓く鍵**

*L'essentiel est invisible
pour les yeux*

大切なものは目にはみえない

*Le Petit Prince:
Antoine de Saint Exupéry*

課題

- 以下の問いかけを踏まえて、宇宙と生物の進化に関連して考えるところを自由に論ぜよ。「正解」はないであろうから、独創的かつ論理的な意見を期待する。
 - 宇宙の進化は必然であると述べたが、その結果形成された天体諸階層がどのような姿になるかを定める因子は何であろうか
 - 我々が観測できる領域の外には全く異なった天体諸階層が存在することがあるだろうか
 - 生物の進化は偶然に左右されると述べたが、他の系外惑星系に生物が存在すると仮定した場合、地上の生物とどこまで共通性があることが期待されるか
 - 地球外文明と交信することができると仮定したとき、科学の普遍性を理解するべく質問したいトピックを列挙し、その結果を知ることの重要性を論ぜよ