

夜空のむこうの物理学

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖



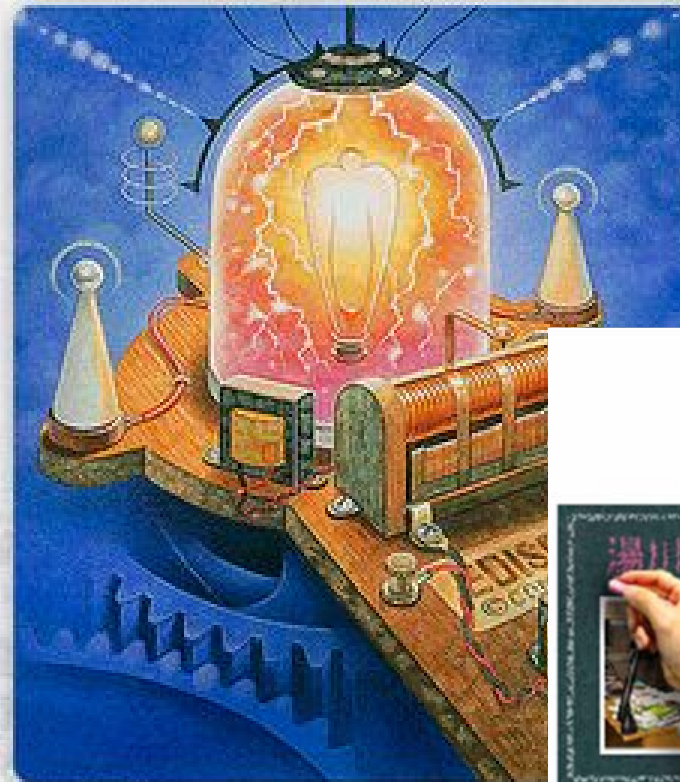
土佐塾中高等学校

Tosajuku Junior-Senior High School

2008年6月8日 ワンデイ セミナー

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

物理学者の日常



絵・塩谷博明

10月企画 新月9ドラマ

探偵ガリレオ

東野圭吾 × 福山雅治 × 柴咲コウ

湯川研究室セット紹介
「ガリレオ」のために作られた「湯川研究室」の豪華なセットを余すところなく紹介します。
click

原作紹介
東野圭吾さんの『探偵ガリレオ』、『予知夢』を紹介。
click

ギミックギャラリー
トップページで過去に公開されていた、ロゴのギミックをご覧いただけます。
click

データ放送プレゼント
地上デジタルテレビやワンセグで「ガリレオ」を見て、プレゼントをゲットしよう。
click

『ガリレオ』特別対談
福山雅治さんと柴咲コウさんの特別対談、お互いの印象や東野作品の魅力などを語っていただきました。
click

ガリレオ 研究室
番組公式コミュニティサイト 研究生募集中!
click

■ むろん、現実がそんなわけではない、、、

湯川学 vs. 湯川秀樹



高校で習う物理は面白いのか

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad \frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r} = E \quad H = \frac{i}{2\pi r}$$

$$f' = f \frac{v - u'}{v - u} \quad Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad C = \frac{\epsilon S}{4\pi k_0 d}$$

- **結論**：高校の物理の教科書は全くイケテナイ
- 「本当」の物理学(=自然界)は面白さに満ちている！

高校までの「勉強」と大学(院)での「学問」

■ 高校まで

- 学習(学んでくりかえす)、勉強(つとめはげむ)

■ 大学(特に大学院)では

- 学問(学びて問う)、研究(みがいてきわめる)
- 受身のままずっと待っていても何も来ない
- 高校までの先生とは違い、大学の教員は親切ではない！
- 自分の適性を知る
- すべてを一人だけでやるのではなく、友人、先輩、後輩と共に学び議論し研究する

研究者に向いている人

- 大学(院)入学までに行う試験での評価基準
 - 正解が存在することがわかっている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく
- これらは研究(あらゆる仕事)と「矛盾する」制約
 - 試験での秀才が必ずしも優れた研究者にはなっていない
- 人間の才能は1次元の数値(全教科の総合得点)ではなく、多次元空間で表現すべきもの
 - 必ずしも(とびぬけて)優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- ただし研究が好き・楽しめることが大前提

自然科学とえせ科学との違い

■ 自然科学の特徴

- 決して「厳密な」自然像構築のみを追求してはいない
- あくまで近似的描像を更新し続ける行為
- 論理自身は問題なくとも、実験が否定することもある

■ 「正しいのか間違っているのか区別できる」ことこそ自然科学の本質的定義

- “falsifiable” (うそであることを示しうる)
- 間違っているかどうかわかりようがない命題は、(まだ)自然科学の対象ではない(例えば、神が宇宙を創った)
- 「あることが説明できない」ことは自然科学の問題点ではなく、むしろ出発点

(自然)科学を学ぶ意味

- 試験のために勉強することが目的ではない
- 楽しみながら、すこしでもより自然を理解する
- 世の中の不思議さを認識する
- 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
 - みんなが言っているからではなく自分で納得する
- 正しいことと間違っていることを見極める
 - 変な人(詐欺師、政治家、官僚、教員)に騙されない
 - 真実を合理的に理解し納得する
 - 善悪を区別する
- 科学を学んで良かったなあ、と思ってほしい

夜空のムコウ

我々の世界をもっとよく知りたい

■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろう
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

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

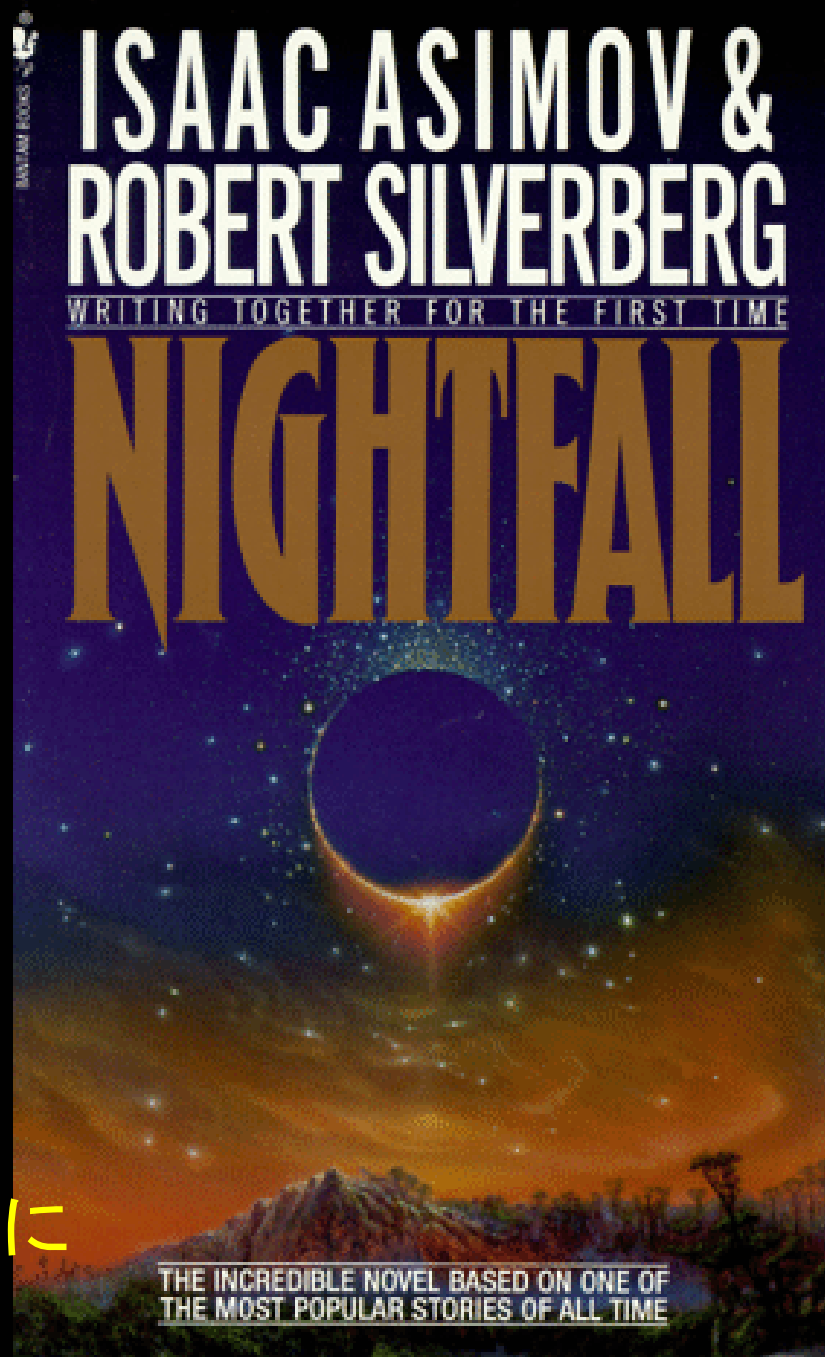


(すばる観測所、田中壱氏撮影)

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



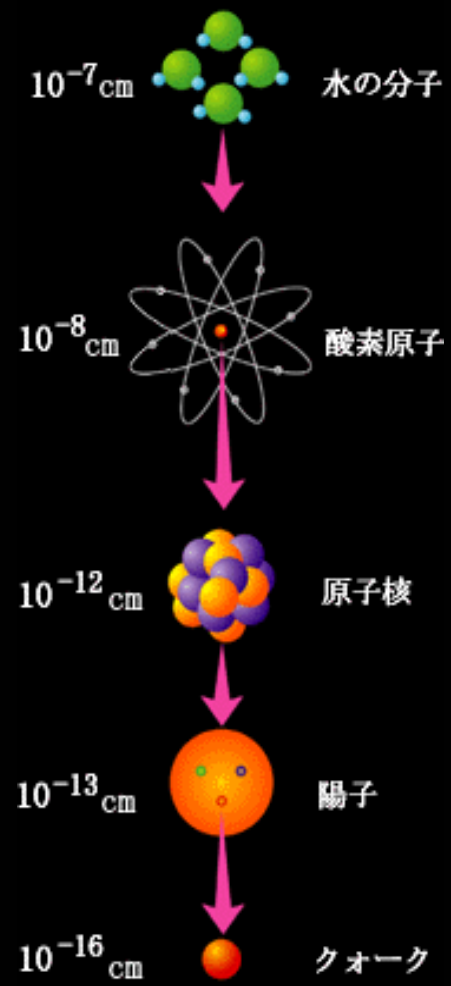
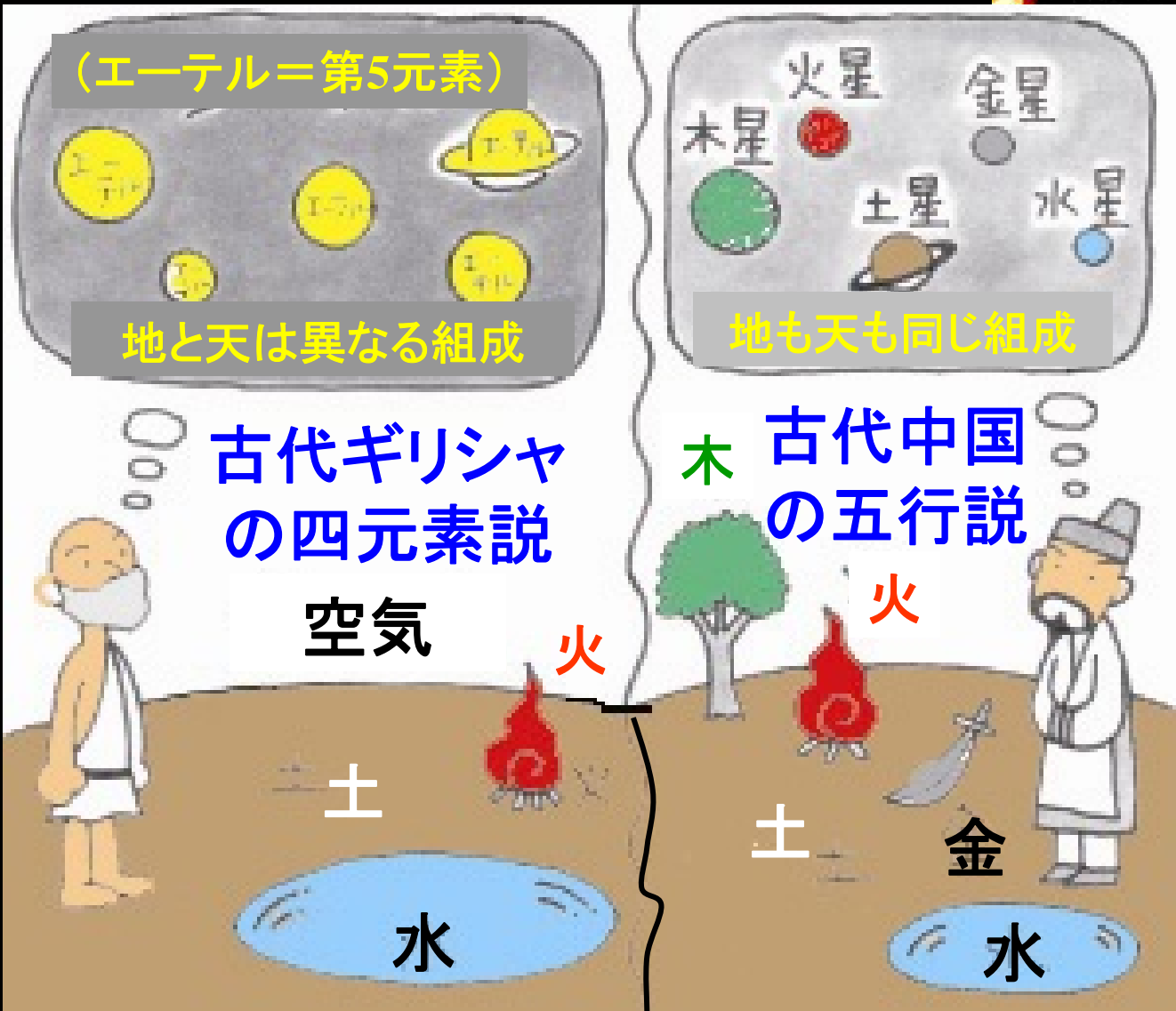
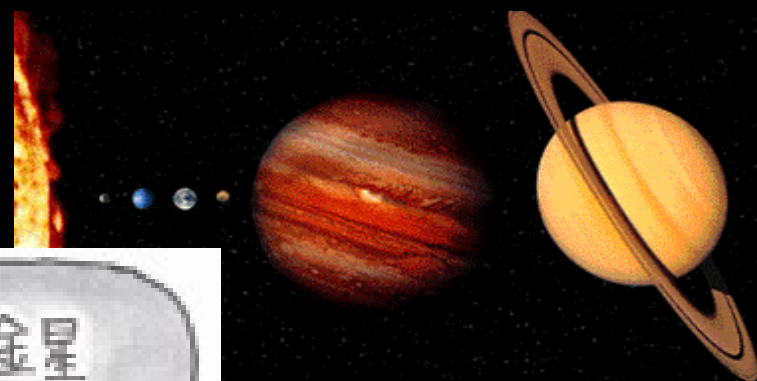
「我々は何も知らなかった」

満天の星空を見上げれば、

我々以外の世界がないほうが不自然

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

自然界に思いをはせる



(いずれもよう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

ものは何からできているのだろうか？

■ 古代ギリシャの4元説

- 空気、土、火、水

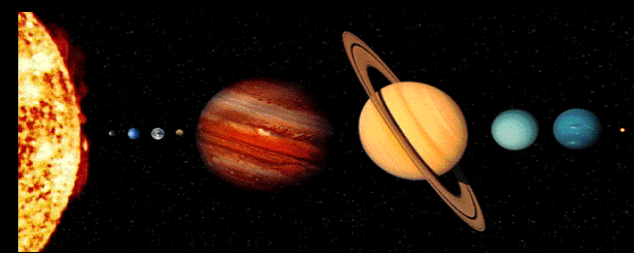
■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水)
× (陽、陰)

- これが日本で用いられている惑星と曜日の名前の由来

■ 現代物理学

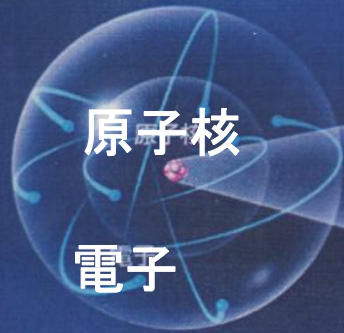
- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ; クォーク・レプトン)



日月火水木金土

	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

物質を構成しているもの



原子

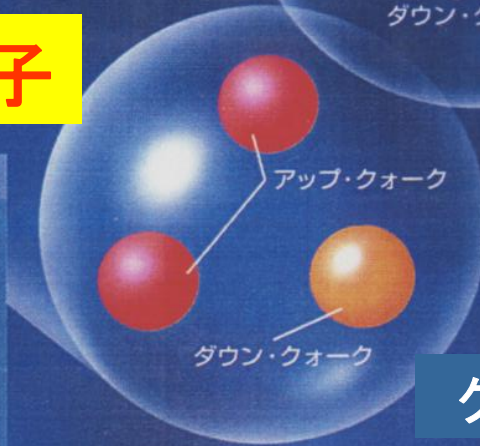
原子核

中性子

陽子

中性子

陽子



クォーク

	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	電子 ニュートリノ	ミュー・ ニュートリノ	タウ・ ニュートリノ
	電子	ミュー粒子	タウ粒子
クォーク	ダウン	ストレンジ	ボトム
	アップ	チャーム	トップ

原子核の周囲を電子がまわって原子をつくる。原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はアップ・クォークとダウン・クォークから構成されている。第2世代と第3世代のクォークとレプトンは、粒子加速器を用いるなどして、高エネルギー状態にならないとあらわれない。われわれの世界の物質は第1世代のクォークとレプトンからできているといえる。

宇宙を構成しているもの

宇宙の大構造

銀河群

矮小銀河

太陽系



銀河

銀河団

星団

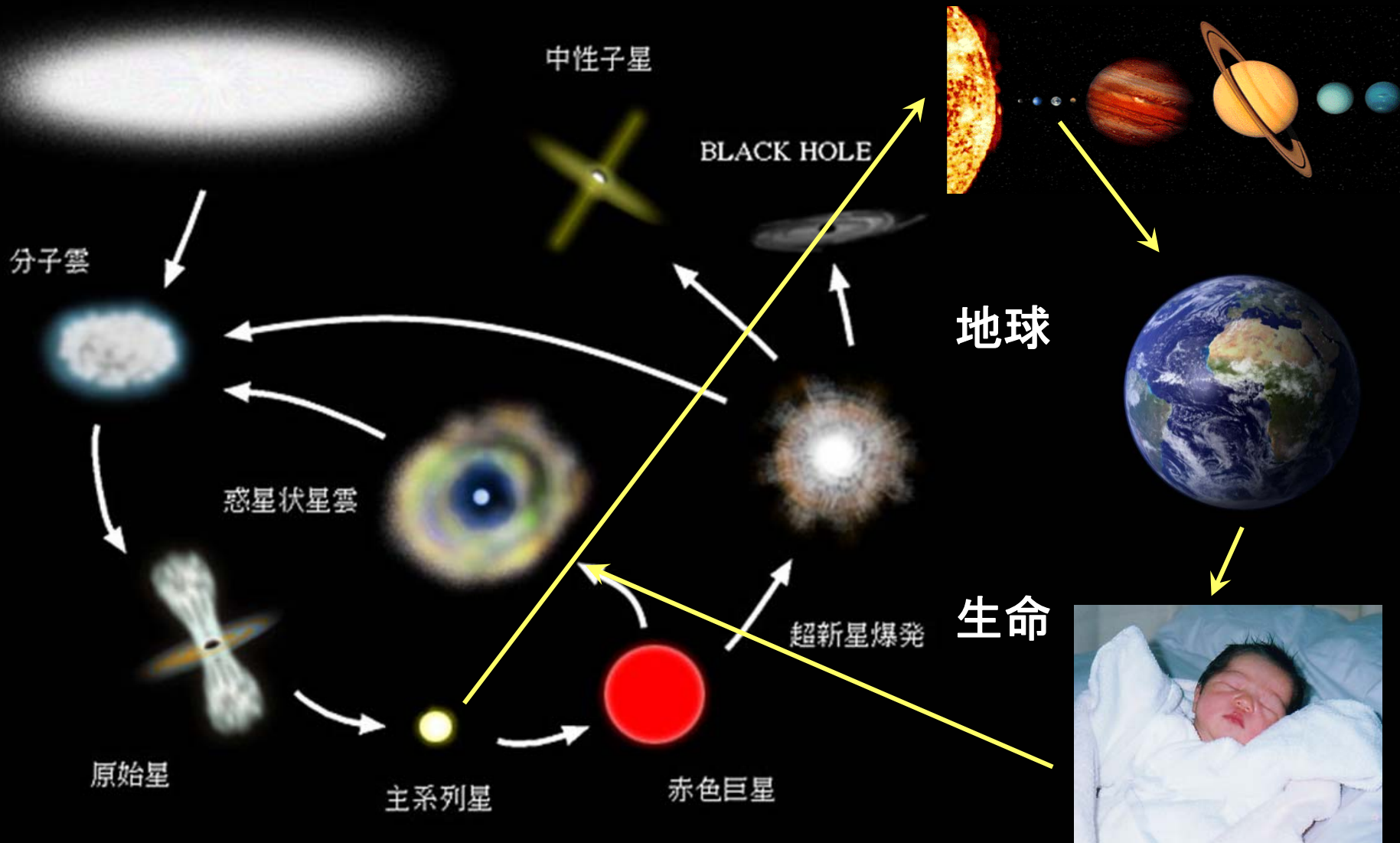


天体諸階層の典型的大きさ [光年]

ビッグバン、天体形成史、元素循環

BIG BANG

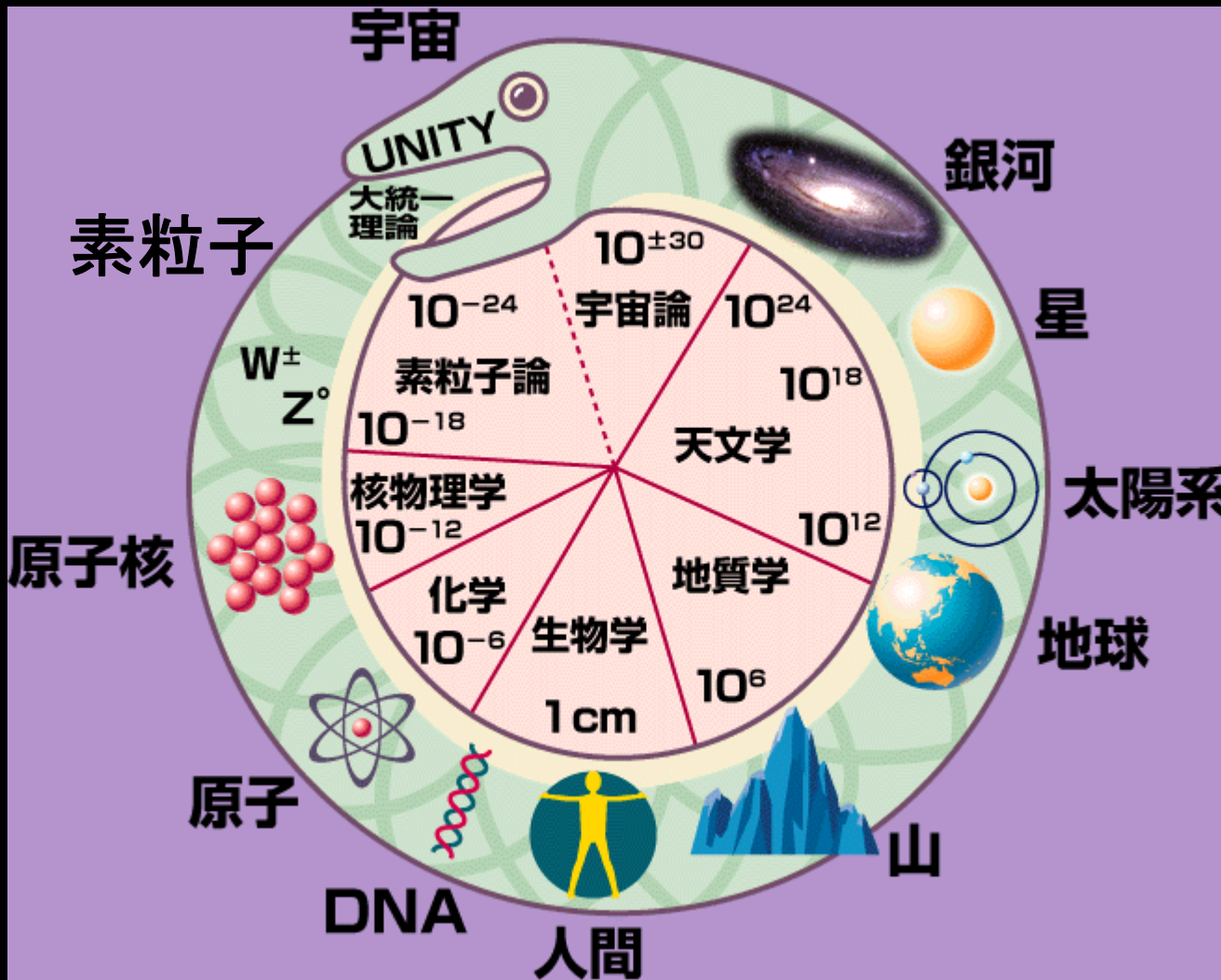
太陽系



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！**

自然界の成り立ち



- 宇宙の大きさは約 10^{27} cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは約 10^{-24} cm
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とは宇宙の進化を通じて結びついている

シェルドン グラシヨー 著 “Interaction”のなかの図をもとに作成

天文学・宇宙物理学共通の目標：

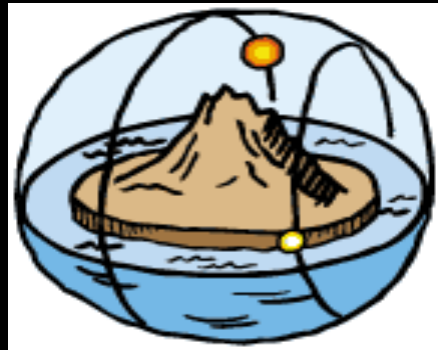
夜空のむこうの世界を探る

■ 我々の世界はどうなっているかを解き明かす

古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



古代インドの宇宙像



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

■ 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる本質的な疑問に挑戦する

- 宇宙は何からできているか？（宇宙論）
- もう一つの地球はあるか？（太陽系外惑星研究）
- 生命はいかにして誕生したのか？（宇宙生物学）

宇宙の果てを見る

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

<http://www.sdss.org/dr1/>

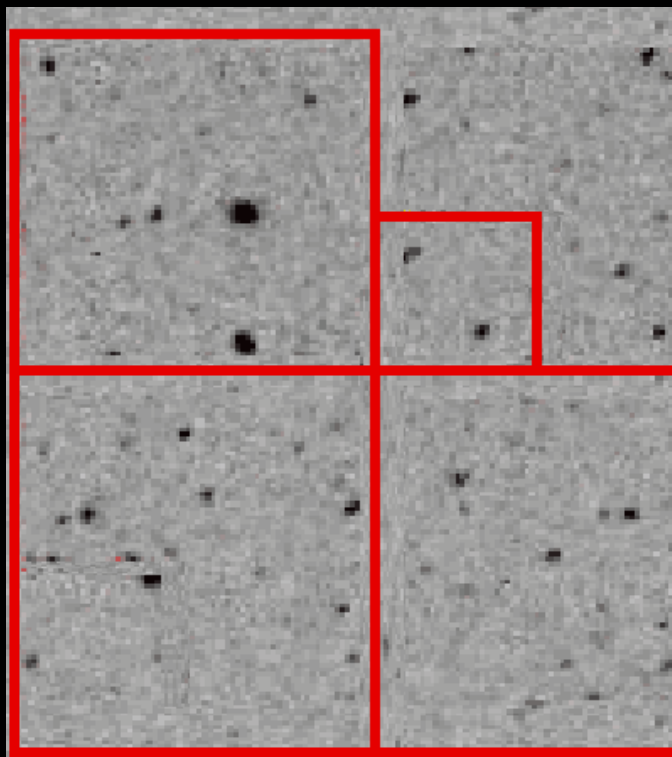


文部科学省

Ministry of Education, Culture,
Sports, Science and Technology

NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

宇宙を見る目 の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板



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

HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×
地上望遠鏡

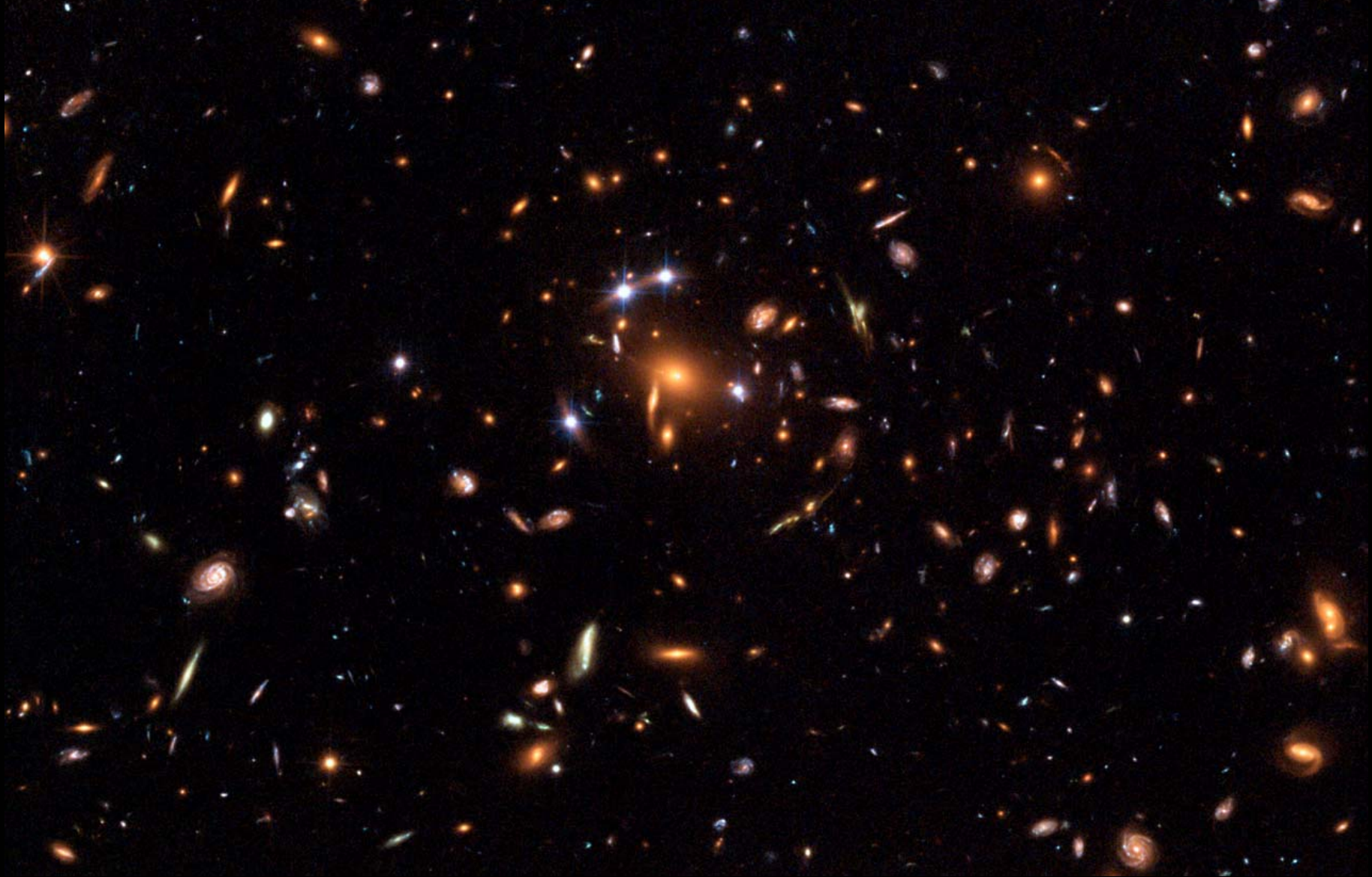
宇宙を見るということ

- 夜空が暗いからこそ天体が見える、我々の世界を理解できる (Isaac Asimov: *Nightfall*)
- 星や銀河は輝いているから存在がわかる
- 「暗いところには何も無い」ことを証明できるか？
 - 漆黒の粒子が集積した結果、光を隠しているのでは？ (de Selby in Flann O'Brien: *The Third Policeman*)
 - 真の暗闇を撮影できるか(=ダークエネルギーの観測)
 - 完全な静寂を録音できるか(小林康夫と坂本龍一の対談 UP2008年2月号)
- 宇宙を満たしているものは何か？認識しうるか？

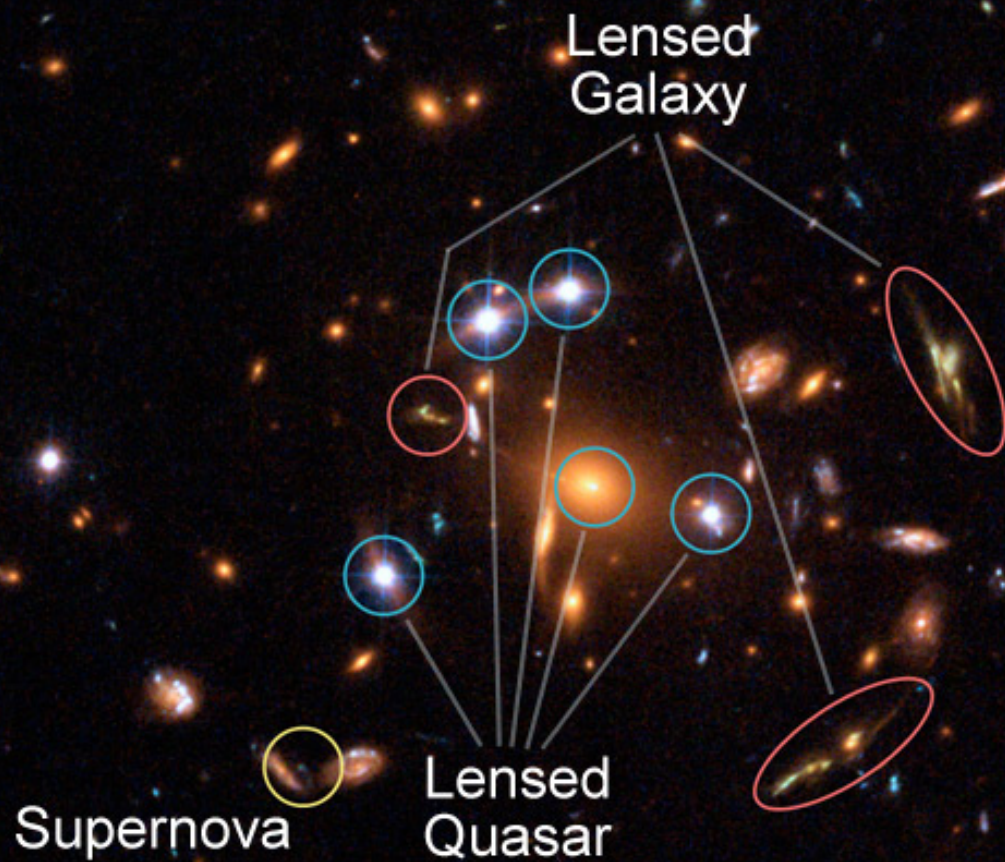
ダークマター

- 実は、光り輝く天体の周りには光ることのないダークマターが満ちている
- **ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる**
 - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果によって実証されている
- その正体は、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

ハッブル宇宙望遠鏡でみる重力レンズ



Galaxy Cluster SDSS J1004+4112
HST ACS/WFC



10''

銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、
みかけ上5つの異なる天体をつくる
(ダークマターの存在)

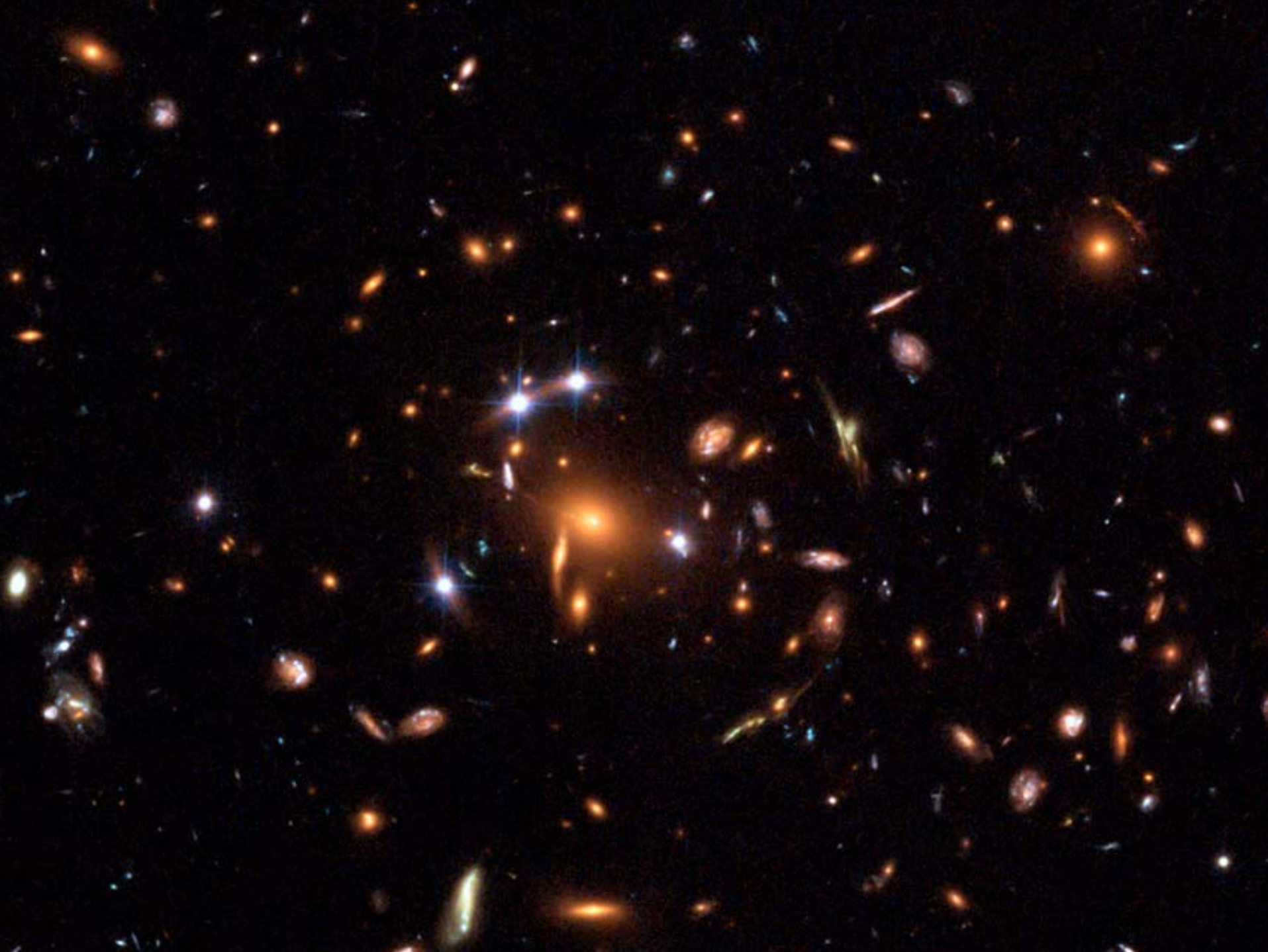
98億光年先にある
クエーサー(中心に
ブラックホール)

62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



重レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼





宇宙を満たしているもの

- ダークマターは、光は出さないが互いに万有引力を及ぼすので空間的には凸凹の分布
 - 銀河や銀河団はそのようなダークマターの塊の中心部に誕生
- ダークマターの存在は、光っているものがすべてではないことを教えてくれる
- では、宇宙空間を完全に一様に満たすような成分は存在しないのか？
 - そもそもそのようなものがあっても観測できるのか？

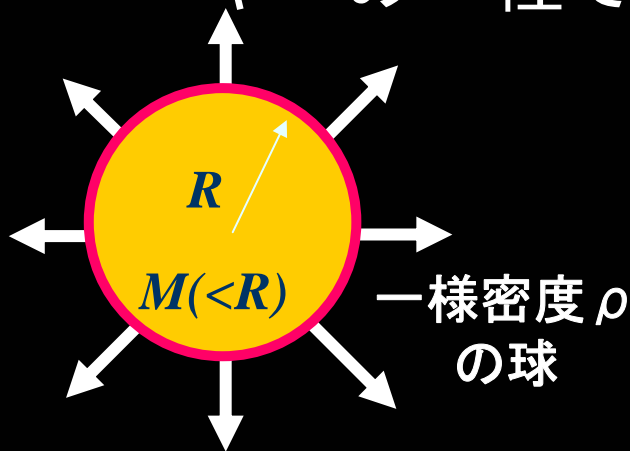
宇宙膨張の方程式

■ 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

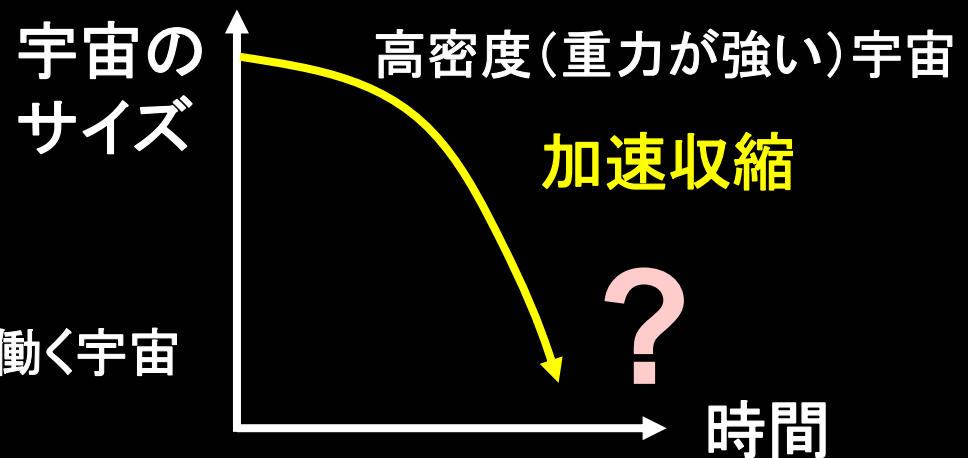
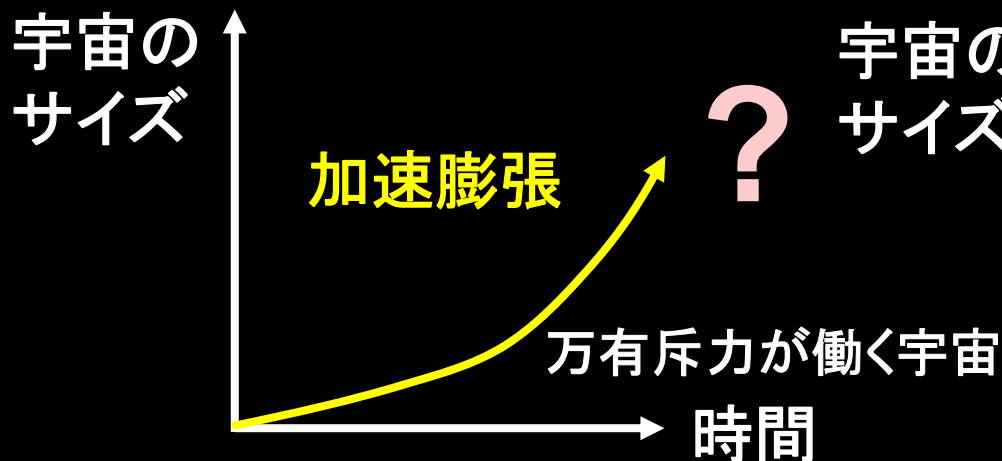
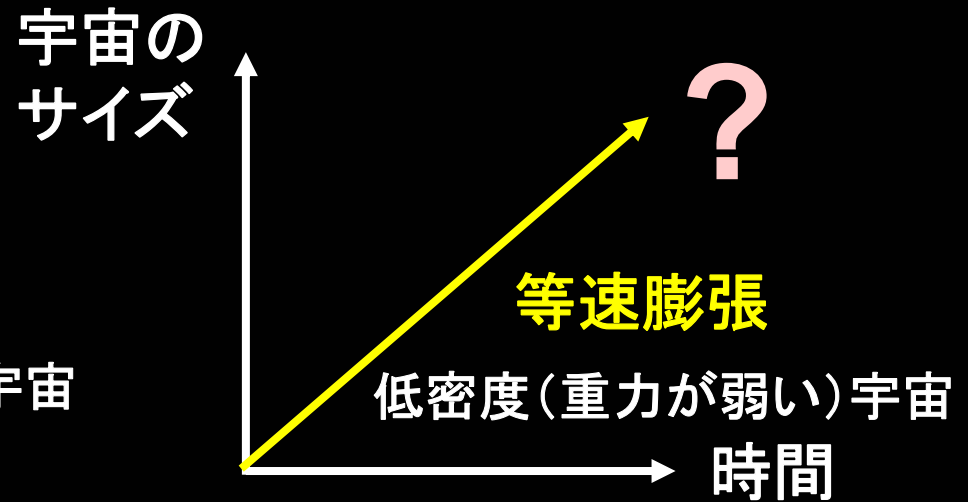
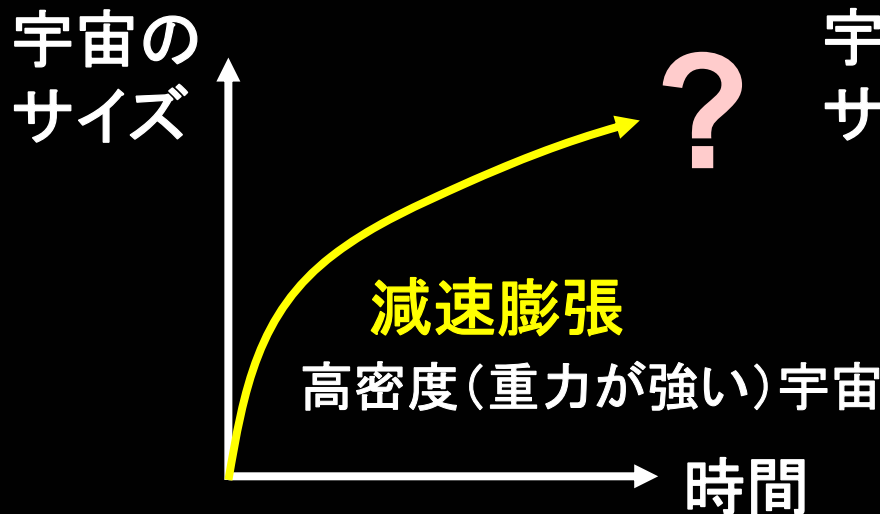


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p + \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

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



ダークエネルギー

- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
 - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
 - 「真空」には本当に何も無いのか
 - 相対的でない測定はあり得るか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度の割合は時々刻々変化する
 - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
 - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
 - 時間軸に沿った相対的な測定は可能

宇宙の加速膨張とダークエネルギー

■ 宇宙の将来はどうか？

- 宇宙は膨張している（ハッブルの法則、1929年）
- さらに膨張の加速度の符号を決める必要

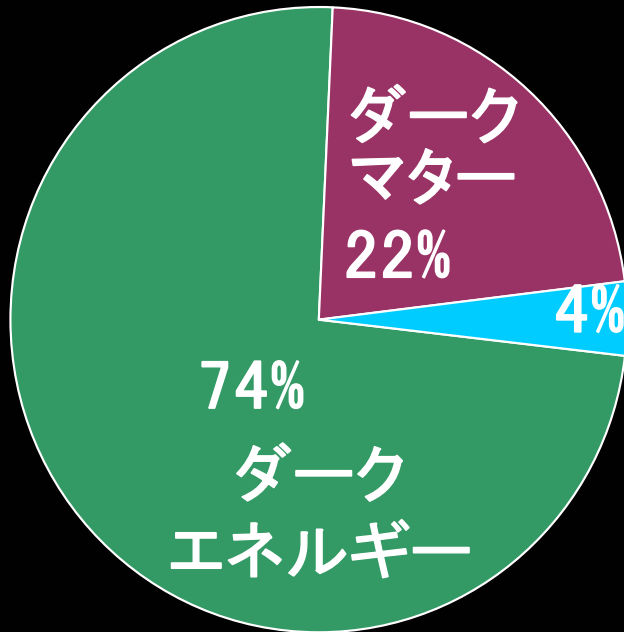
■ 重力は常に引力なので当然減速するはず？

■ しかし宇宙は「加速膨張」している！

- 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、つまり非常識な結果
- にもかかわらず観測的に証明されてしまった
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（ダークエネルギー）??

宇宙は何からできている？

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
- 未知の素粒子が正体？

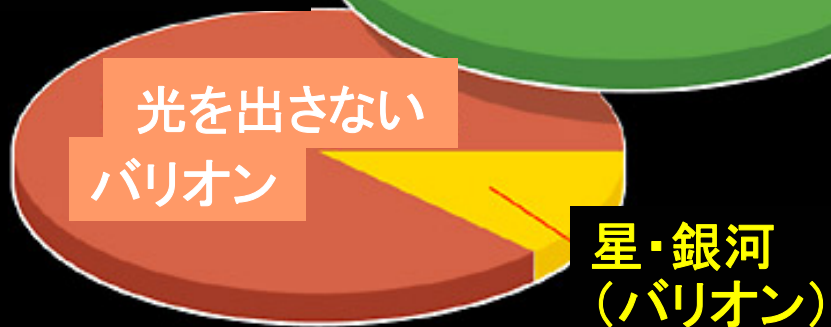
通常物質 (バリオン)

- 元素(陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

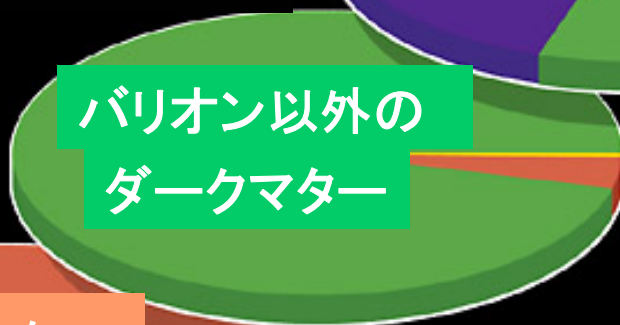
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？
- 宇宙空間を一様に満たしている
- ダークマターとは異なり空間的に局在しないが、宇宙の主成分

宇宙の組成観 の変遷

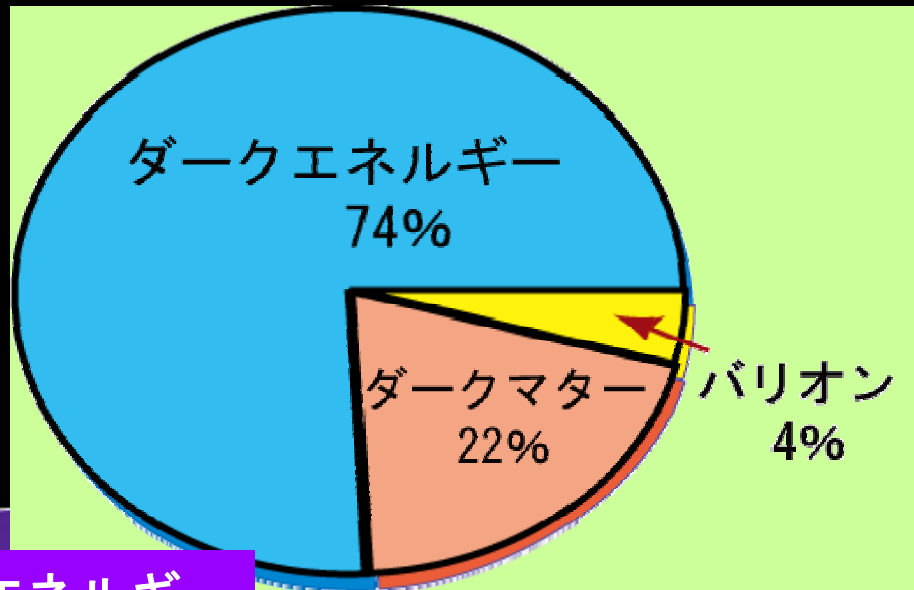
1970年代



1980年代



1990年代



2000年代

「夜空の向こうの物理学」の意味

- 宇宙の果てを観測する
 - 宇宙論
- 宇宙を満たしている物質を探る
 - 素粒子論
- 第二の地球を探す
 - 惑星形成論、宇宙生物学
- 地球外文明はあるか
 - 人間原理、宇宙社会学、宇宙比較文化論

地球外知的生命はいるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内に
ある交信可
能な知的文
明の数

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な
環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

その文明の継続時間



Frank Drake博士

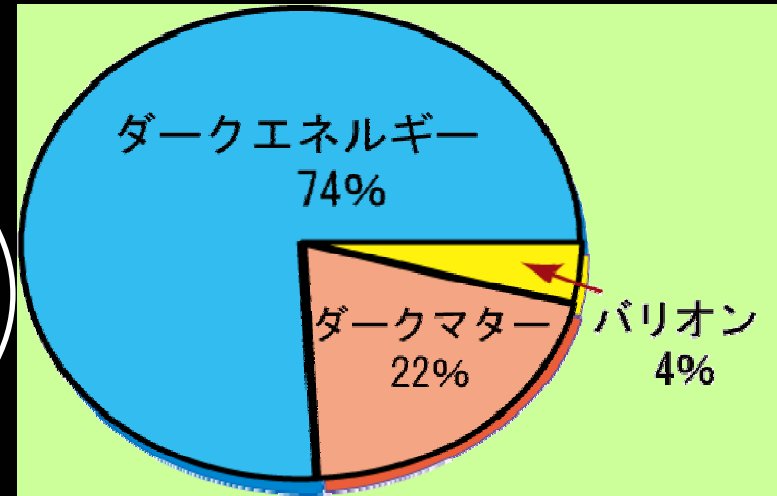
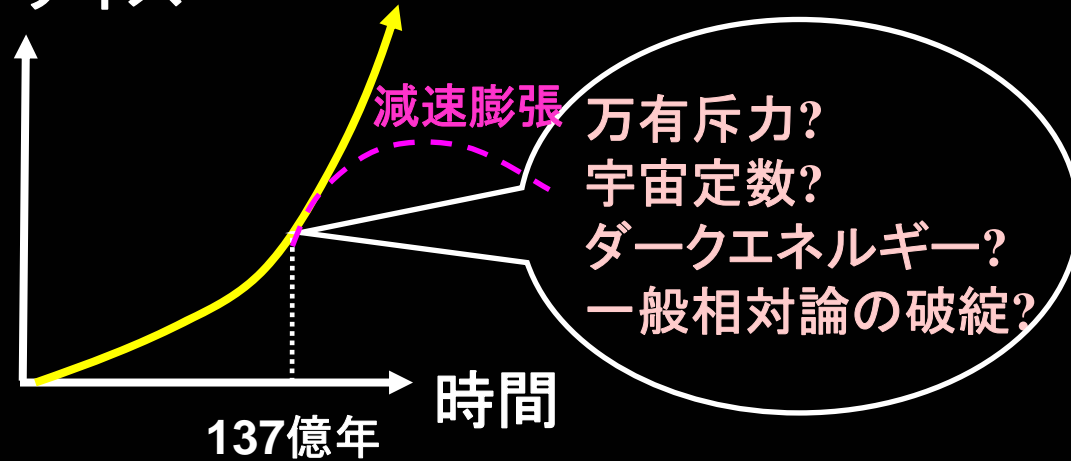
Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

まとめ

ダークエネルギーと21世紀の物理

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



- **ダークエネルギーの正体は何か？**
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれであろうと21世紀の物理学を切り拓く鍵**

この青空の向こうには
無数の星々
がきらめいている

実はこの星空のいたるところに
ダークマター
ダークエネルギー
が満ちている

(ダークエネルギーごしに見る)夜空の向こうに
もう一つの地球・世界・宇宙
があるのかも知れない

*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*

高知県人やなせたかしの教え： アンパンマン オープニングテーマ



- 作詞：やなせたかし
なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのは いやだ！



アンパンマン エンディングテーマ

- 作詞：やなせたかし
もし自信をなくして
くじけそうになったら
いいことだけ
いいことだけ
思い出せ

