

# 見えない宇宙をみる： 宇宙の組成とダークエネルギー

物理学専攻 須藤 靖

2008年5月10日 第13回東京大学理学部公開講演会  
『理学研究のフロンティア』  
東京大学駒場キャンパス 教養学部900番教室

# 科学を学ぶ意味

- 「試験のために勉強する」わけではない
- 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
- 結果が役に立つかどうかは別問題。答えが得られなくてもよい。世の中の不思議さを思い知る

# 役に立つ学問と役に立たない学問

- 「役に立つ」となぜ良いか
  - 生活を便利に⇒自由な時間が増える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
  - 技術が「売れる」⇒「儲ける」⇒何でも買える⇒人生を楽しむ（趣味=音楽、美術、文学、科学）
- 人生の究極的目的を突き詰めればやがて「役に立たない」ものに帰着
  - 狭義の「役に立つ」は、結局は広義の「役に立たない」を楽しむという文脈において意味をもつ？
- *C'est une occupation très jolie. C'est véritablement utile puisque c'est joli.*  
*(Le Petit Prince: Antoine de Saint Exupéry)*

# 私の考える「理学の心」

- 謎を解明する(問題に答える)よりも、**新たな謎を発見(世の中の不思議さに感嘆)**するほうが大事
  - **勉強**(つとめはげむ)から **学問**(学びて問う)へ
- **決して競争するな**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間でもあまり受け入れられてはいない**
  - しかし「役に立たない」学問を、その波及効果、あるいは「100年後に役に立つ」学問を生み出すという理由で正当化する論調には賛同しかねる

# 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(のみならず一般に人生)と「矛盾する」
  - 試験での秀才 ≠ 優れた研究者
- 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

# 天文学・宇宙物理学共通の目標：

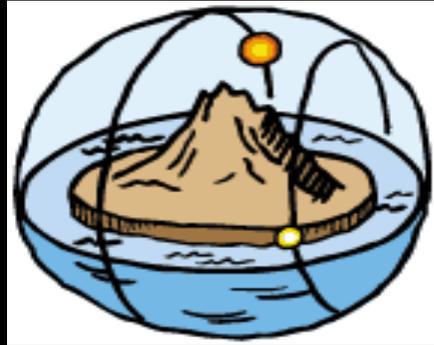
## 夜空のむこうの世界を探る

### ■ 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）

# 我々の世界をもっとよく知りたい

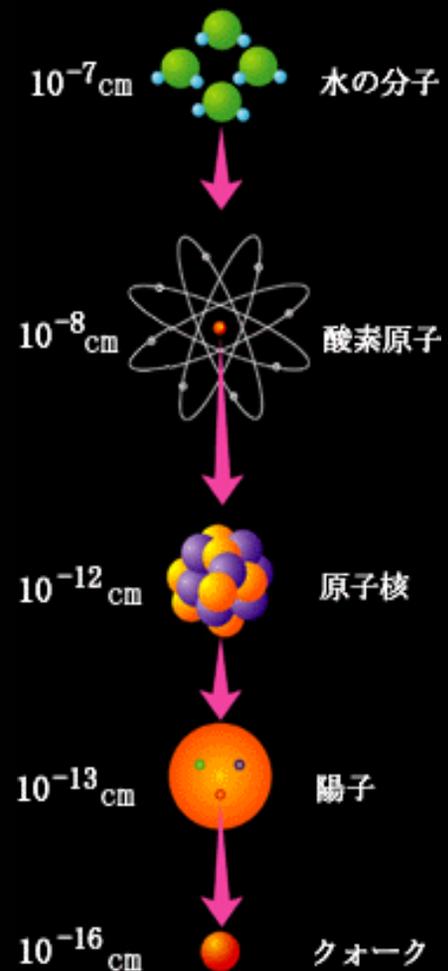
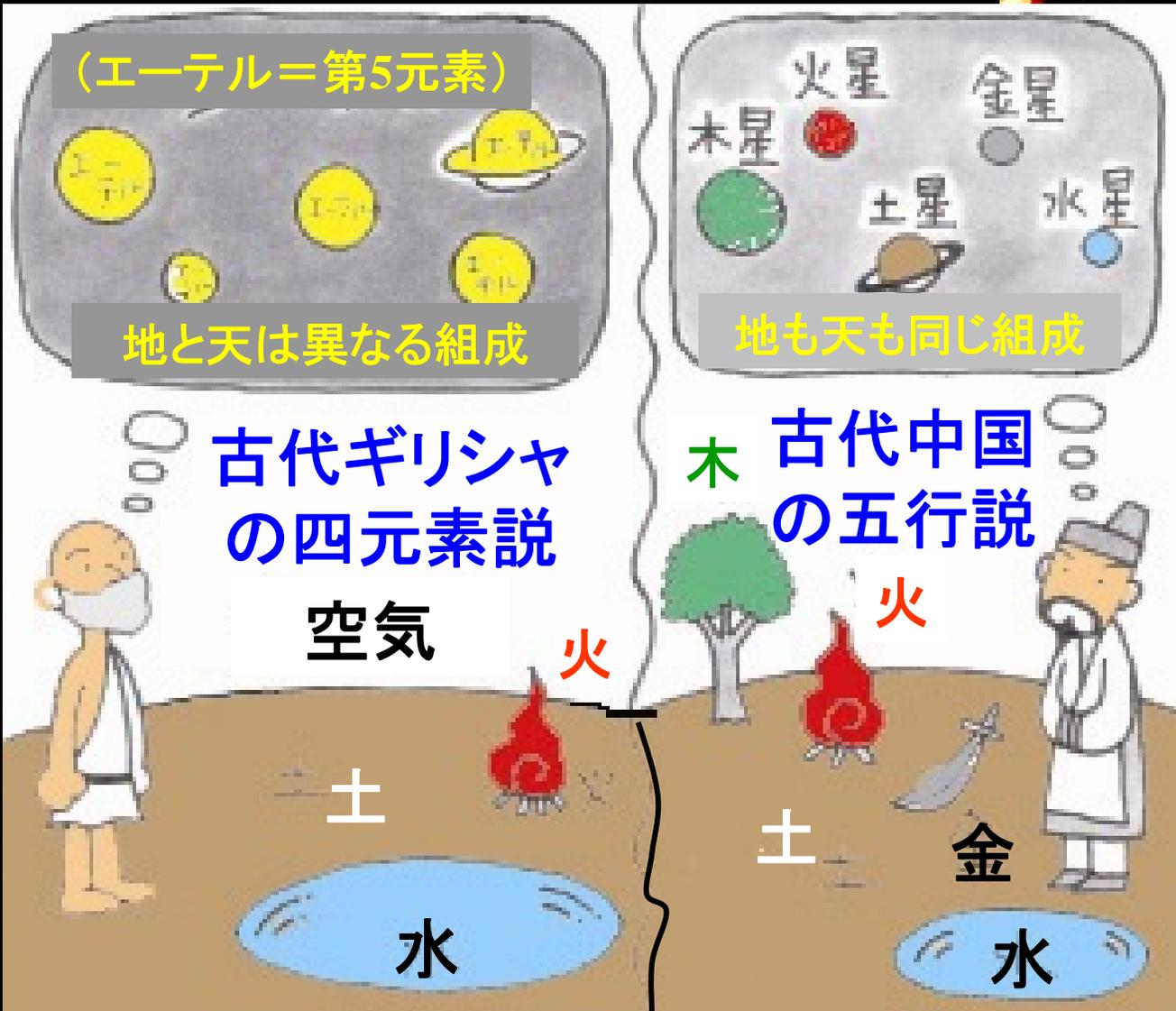
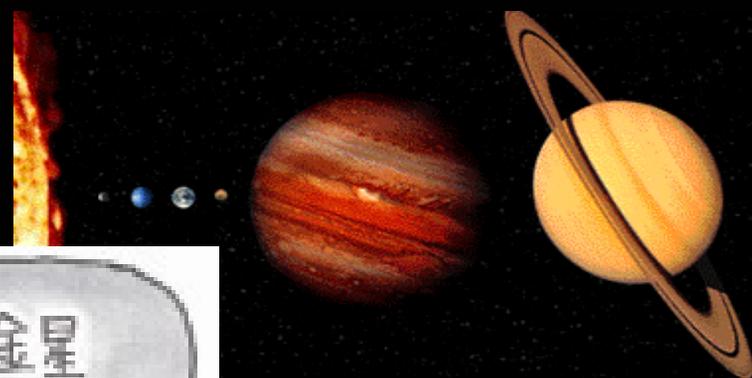
## ■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- 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

# 自然界に思いをはせる

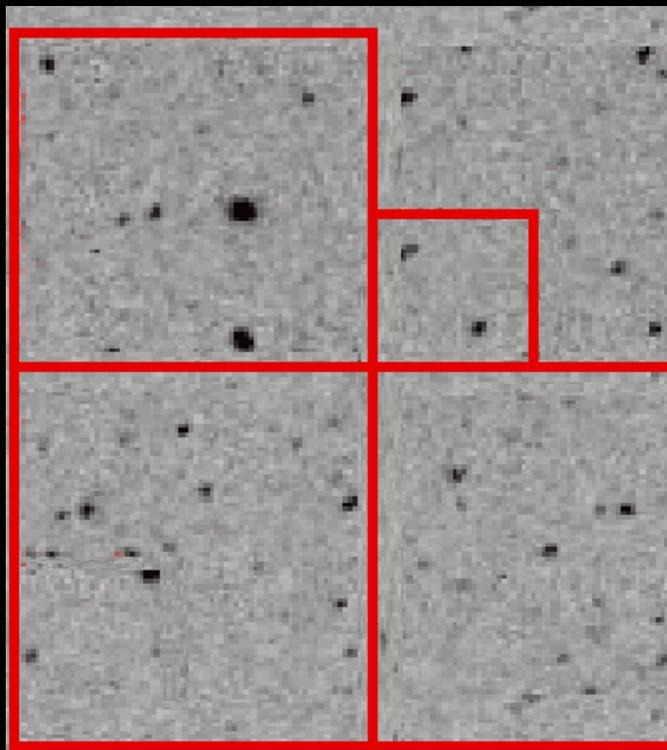


(いずれもよう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

# 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？

# 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

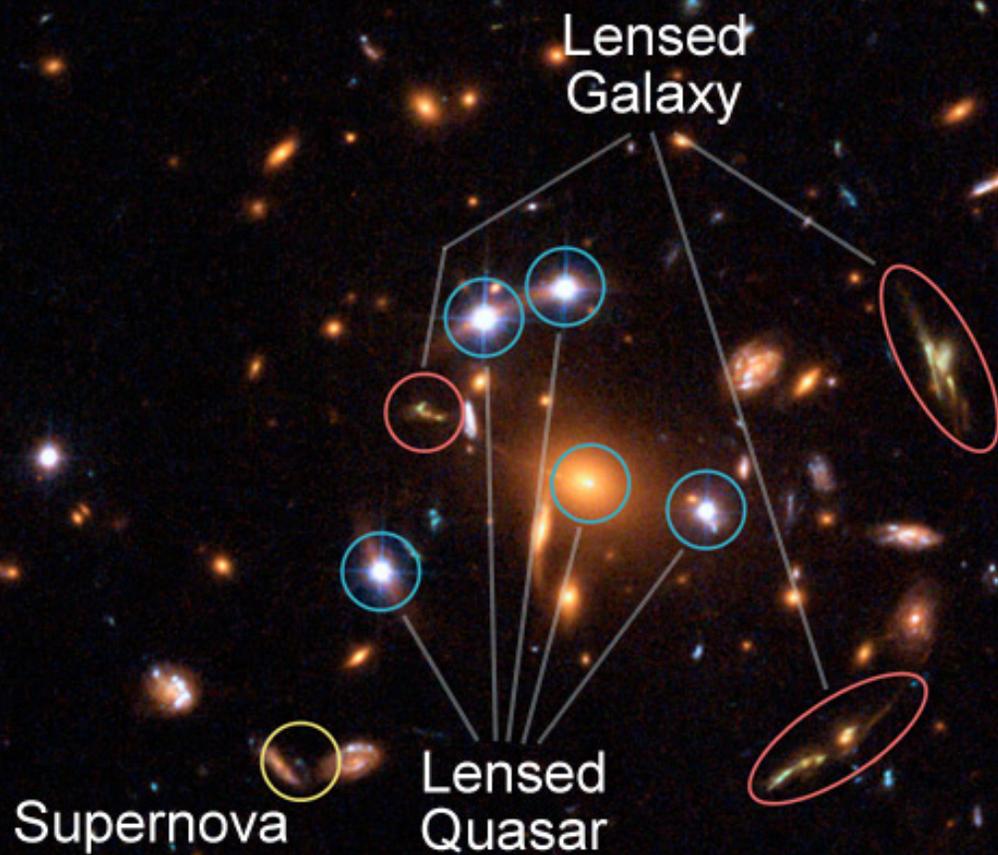
# ダークマター

- 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)

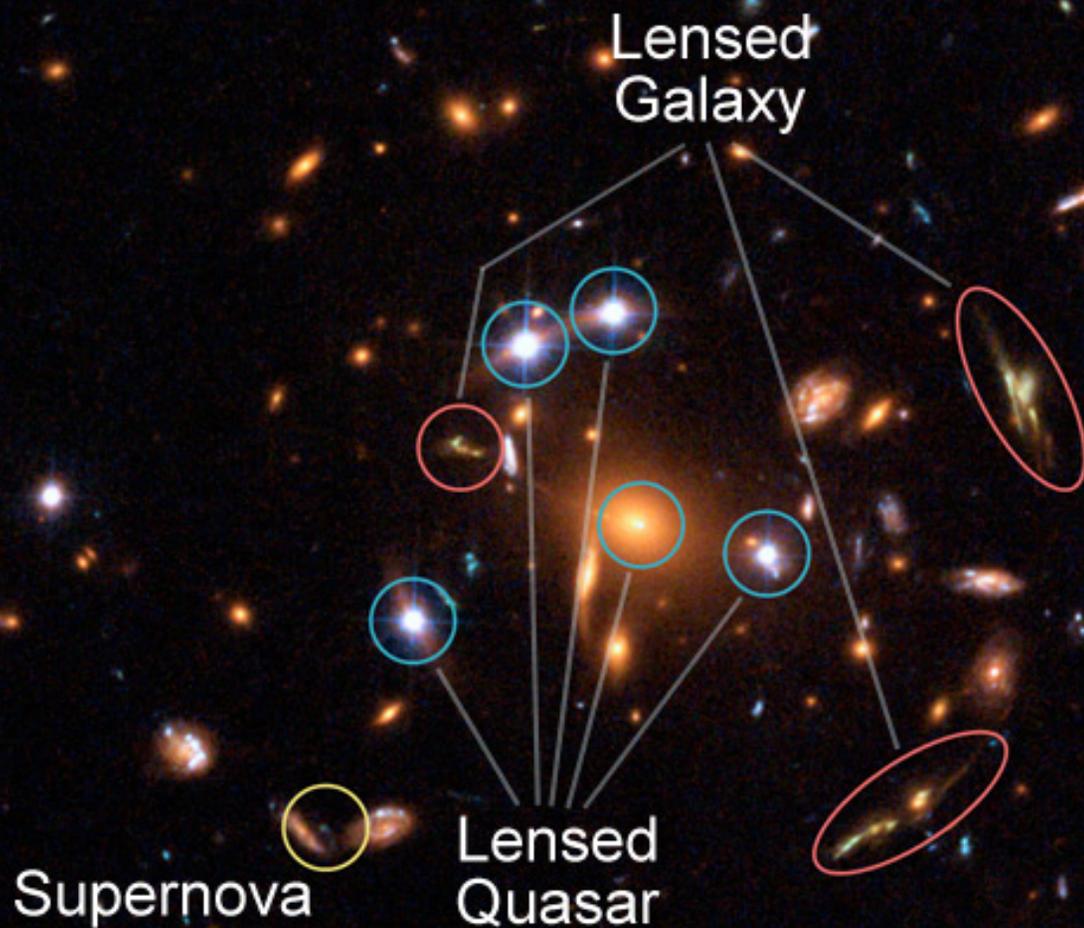
62億光年先にある  
銀河団まわりの  
ダークマター



重レンズ天体  
SDSS J1004+4112 :  
一般相対論的蜃気楼



Galaxy Cluster SDSS J1004+4112  
HST ACS/WFC



10''



# 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

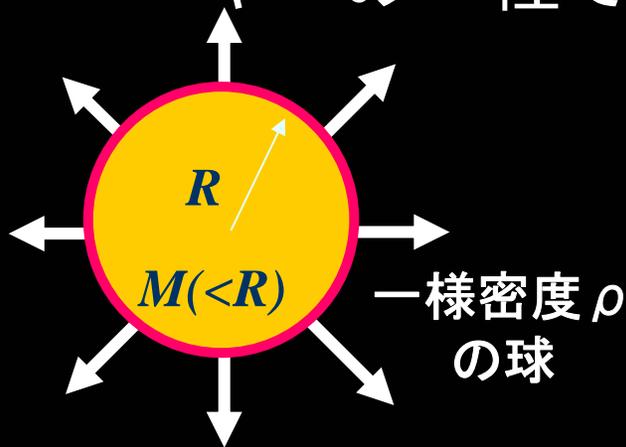
# 宇宙膨張の方程式

## ■ 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  $\rho$  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」( $\Lambda$ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

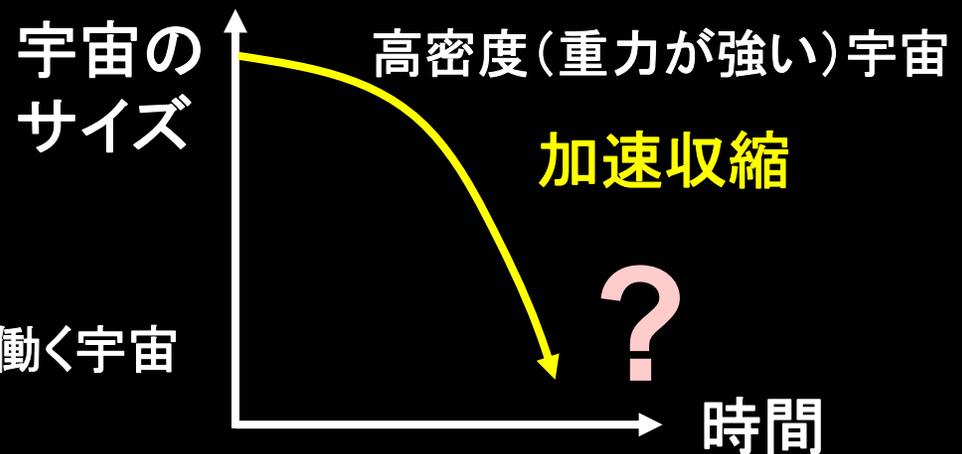
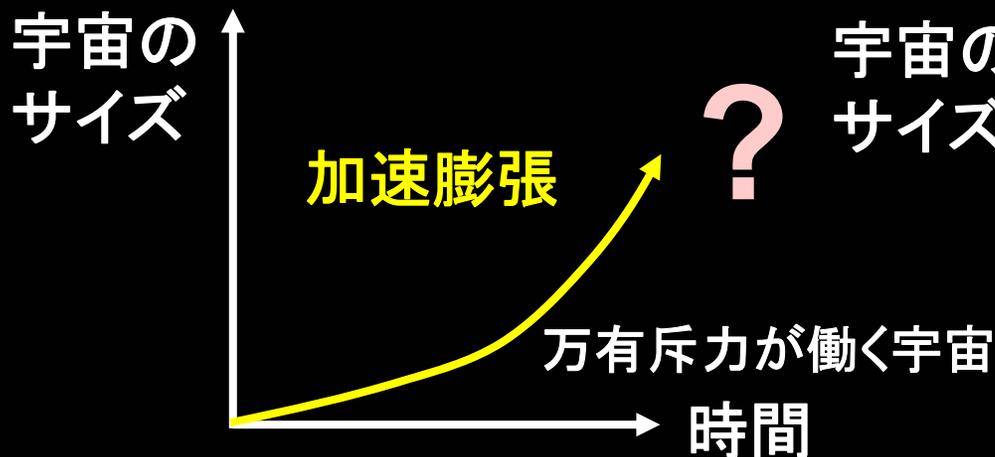
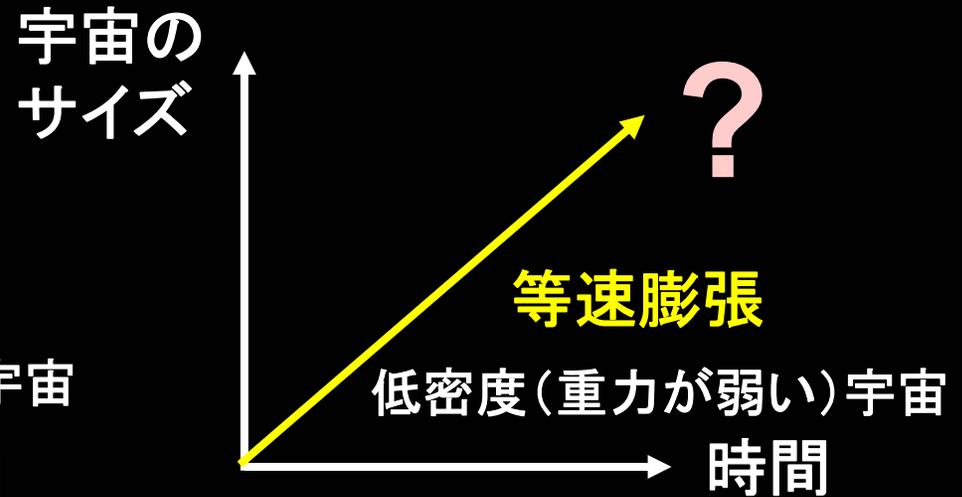
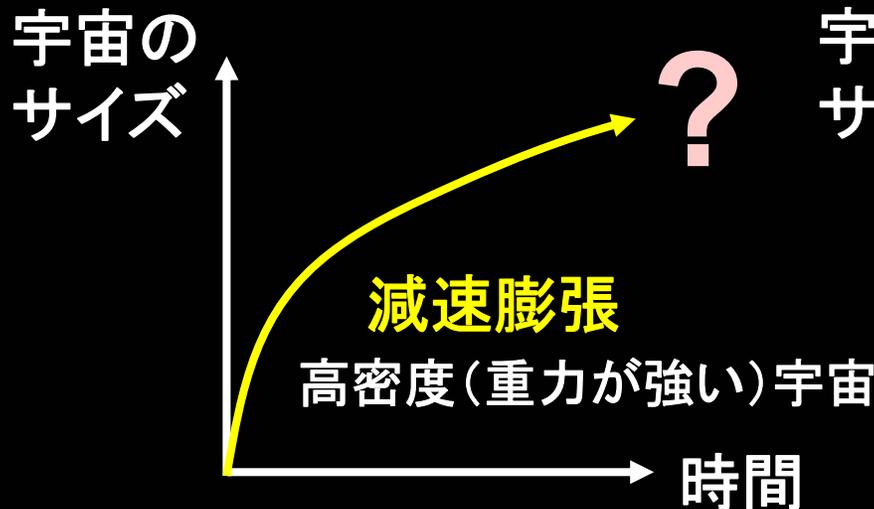


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

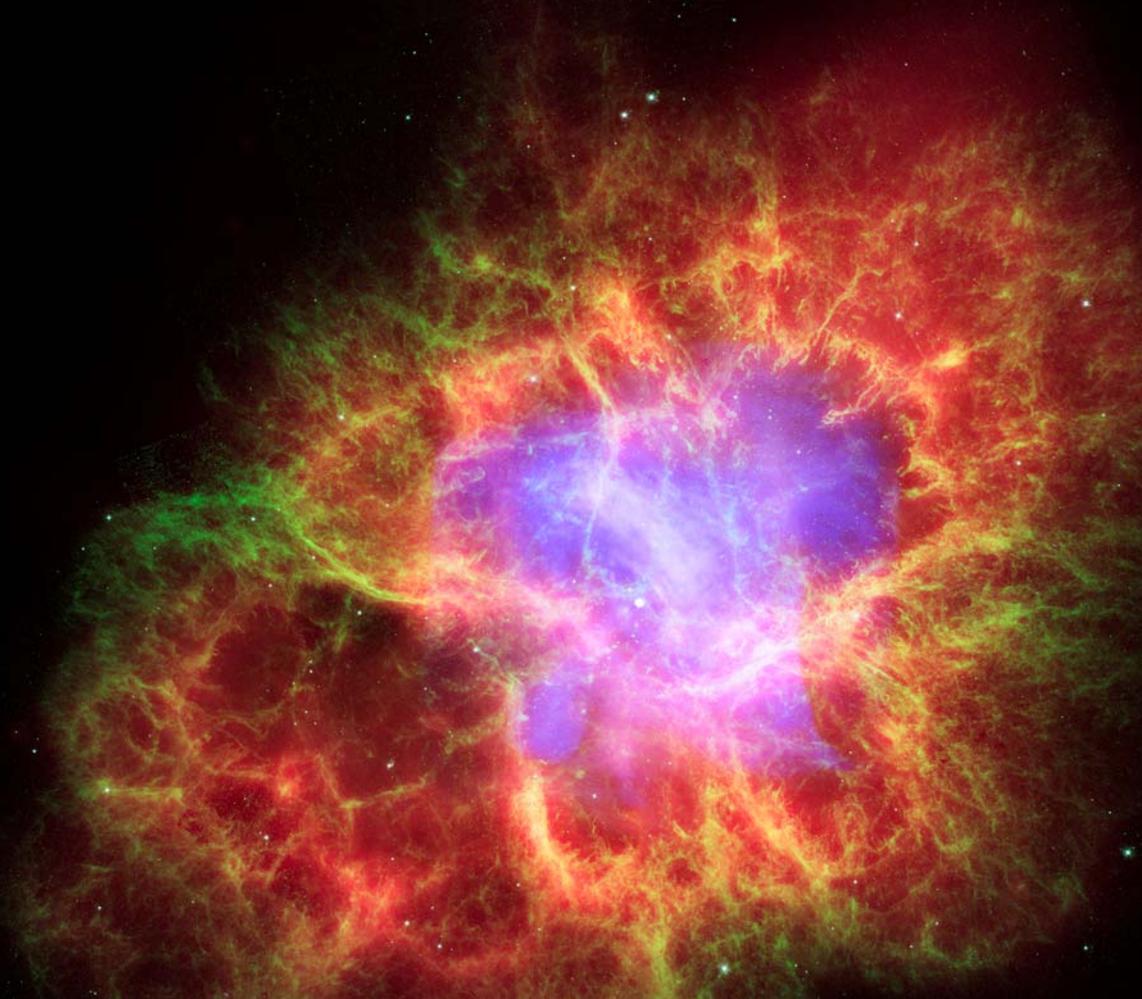
フリードマン方程式

# 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



# 超新星： 星の進化の最終段階での爆発



かに星雲

1054年に起こったⅡ型超新星爆発の残骸

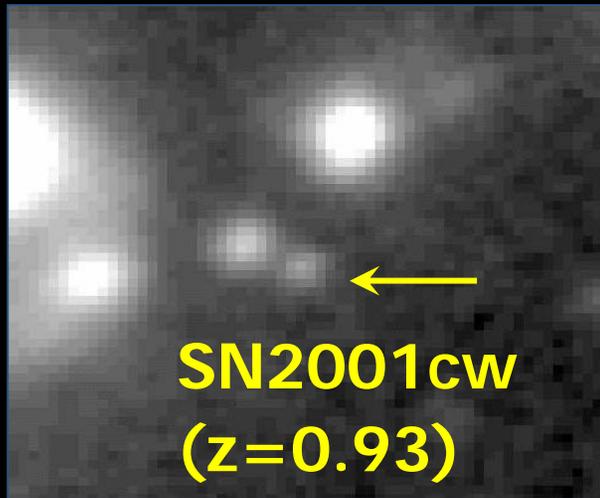
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/2005/37/image/b/>

# 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



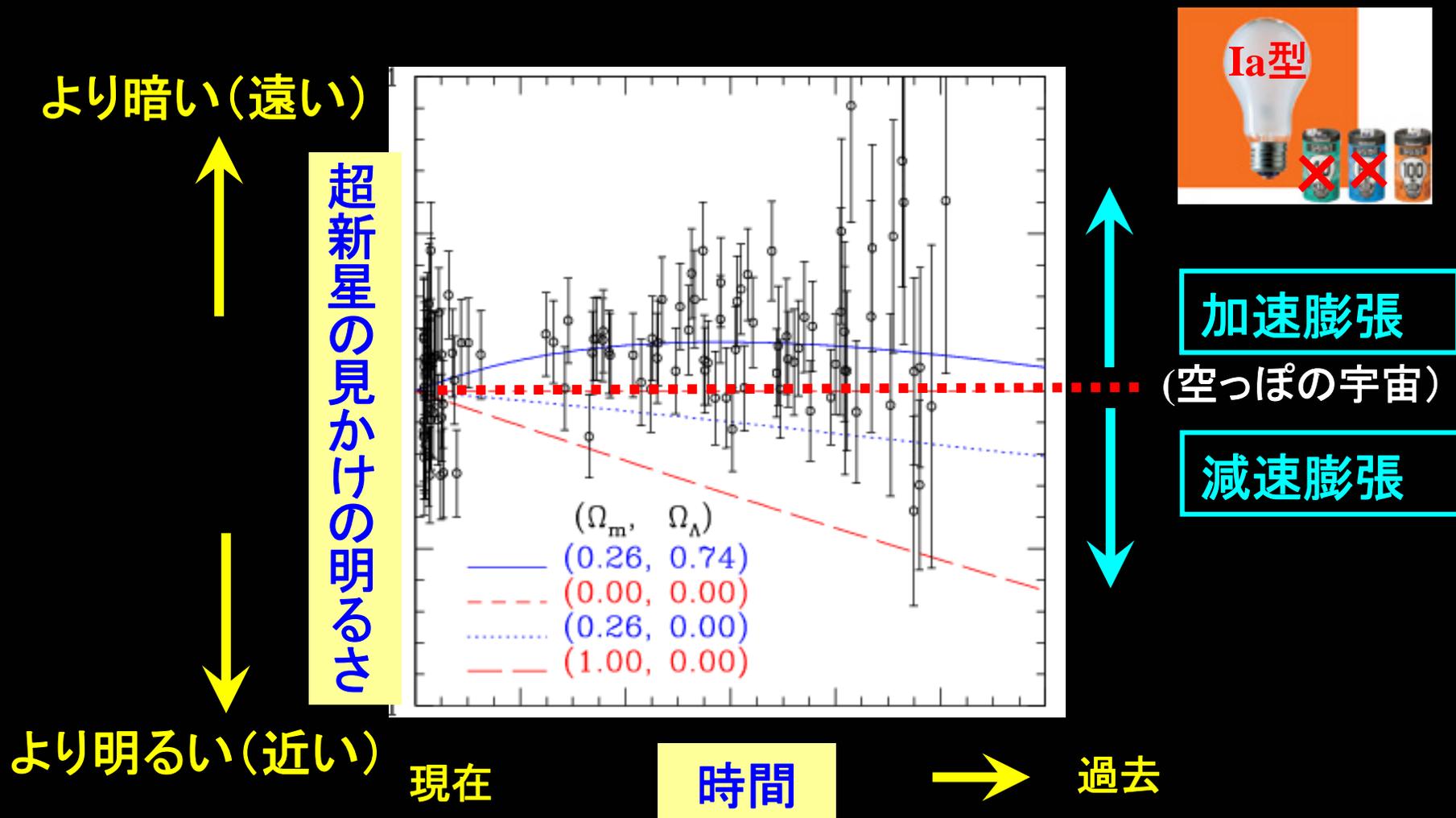
距離:  $D$

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

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

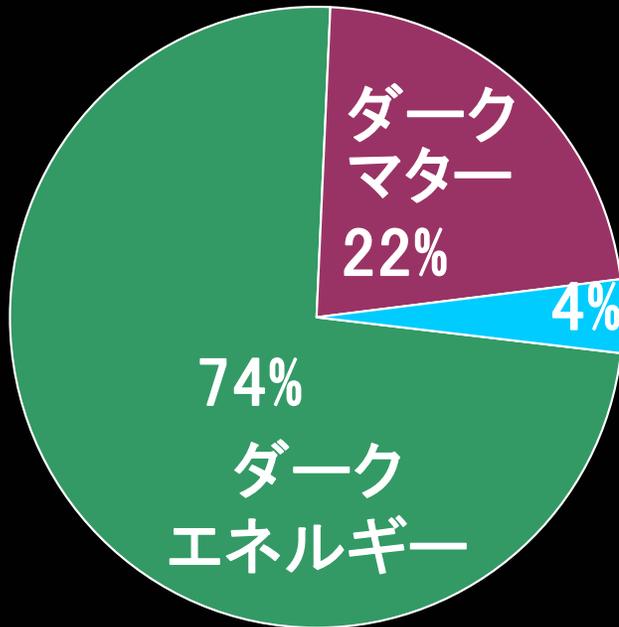
## ■ 重力は常に引力なので当然減速するはず？

## ■ 超新星は宇宙が加速膨張していることを示した

- 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（暗黒エネルギー）??

# 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

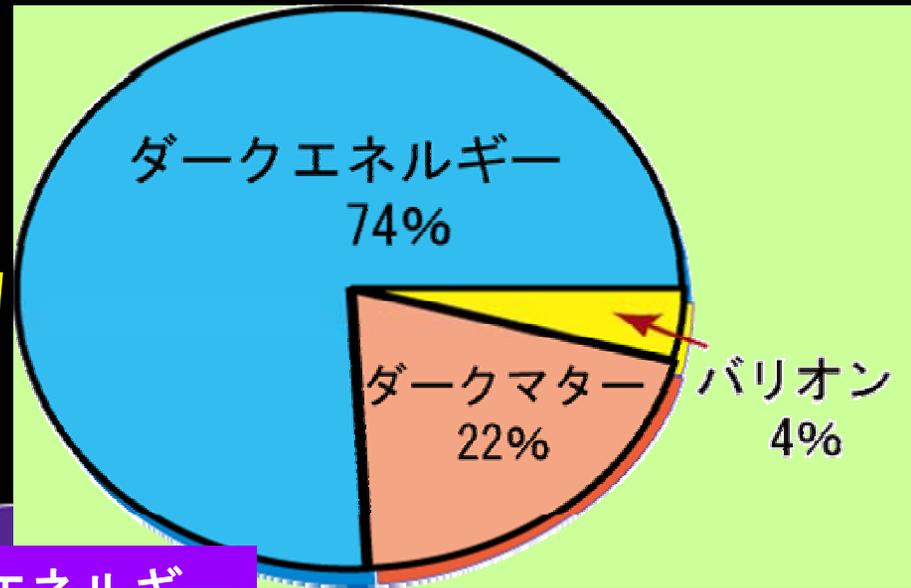
1970年代



1980年代



1990年代

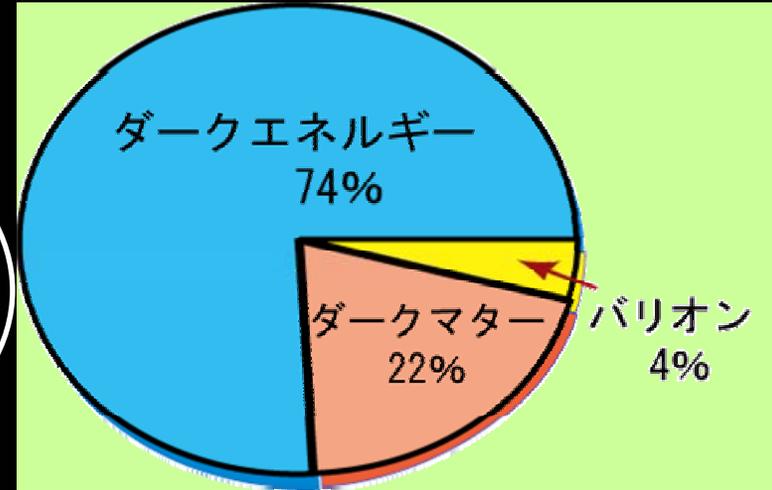
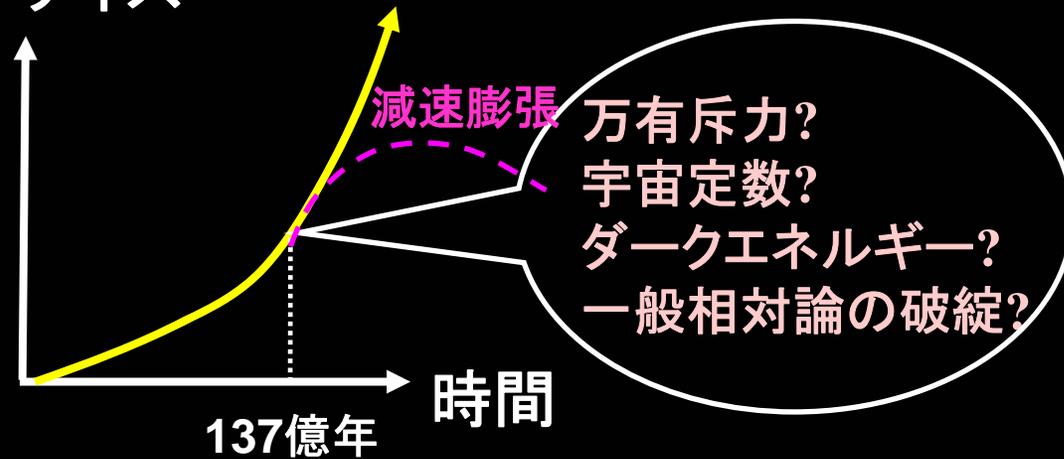


2000年代

# 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**

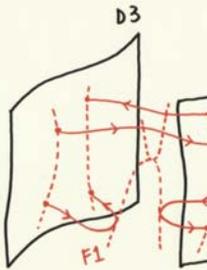
# コマースシャル！ UT Physics シリーズ 本日に限り\*2割引\*で販売中

UT UNIVERSITY OF TOKYO  
Physics・2

## Dブレーン

超弦理論の高次元物体が描く世界像

橋本幸士—[著]



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2g^2} \text{tr}(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

世界は膜で

究極理論に興味を抱くすべての読者に——  
物理学の魅力を伝える新シリーズ

UT UNIVERSITY OF TOKYO  
Physics・1

## ものの大きさ

自然の階層・宇宙の階層

須藤 靖—[著]



宇宙の存在は偶然なのか、  
必然なのか？

自然や宇宙に関心のあるすべての読者に——  
物理学の魅力を伝える新シリーズ刊行開始

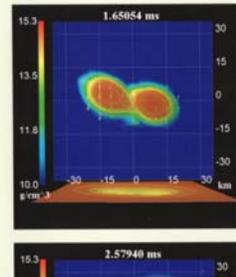
東京大学出版会

UT UNIVERSITY OF TOKYO  
Physics・3

## 一般相対論の 世界を探る

重力波と数値相対論

柴田 大—[著]



ブラックホー

観測と理論をつなぎ、宇宙の  
物理学の魅力を伝える好評シリーズ

UT UNIVERSITY OF TOKYO  
Physics・4

## 銀河進化の謎

宇宙の果てに何をみるか

嶋作一大—[著]



140億年の旅によろこそ

宇宙の歴史の95%がたどれるようになった今、  
明らかになる銀河の姿とは？  
その謎と魅力に迫る

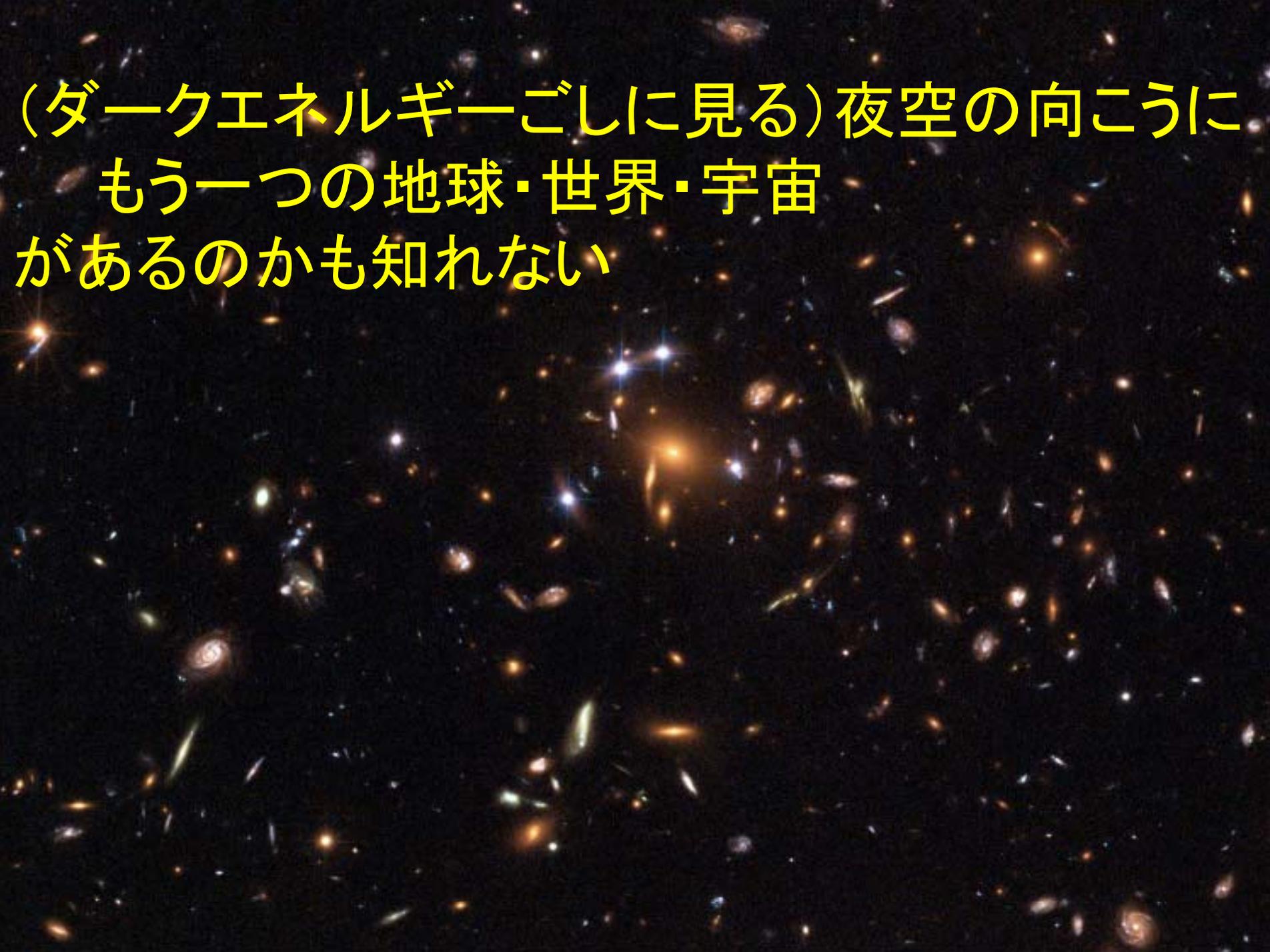
東京大学出版会

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*