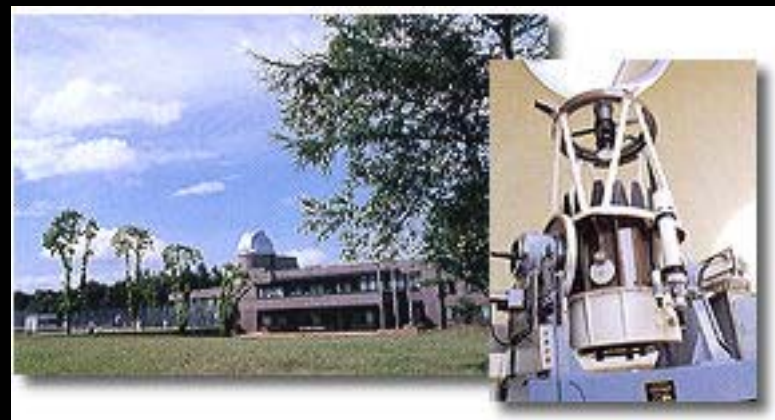


第27回 北軽井沢 駿台天文講座



天文講座 ① 8月6日16:00-17:00

夜空のムコウの世界を探る

天文講座 ④ 8月7日10:00-11:00

宇宙の組成と宇宙の未来

天文講座 ⑥ 8月8日 9:00-10:00

宇宙における必然と偶然

天文講座 ⑧ 8月8日20:00-21:00

太陽系外惑星とバイオマーカー

東京大学大学院

理学系研究科

物理学専攻

須藤 靖

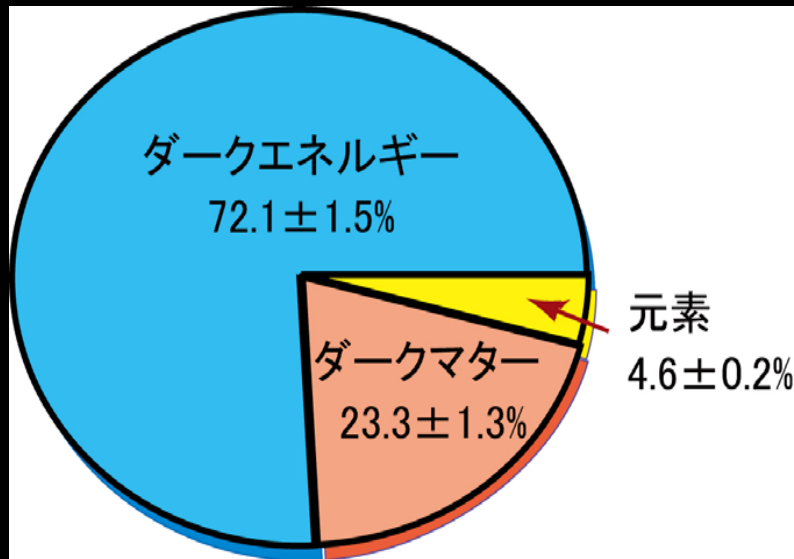
2010年8月6日(金)~9日(月)

北軽井沢駿台天文台(北軽井沢「一心荘」)

天文講座④

8月7日10:00-11:00

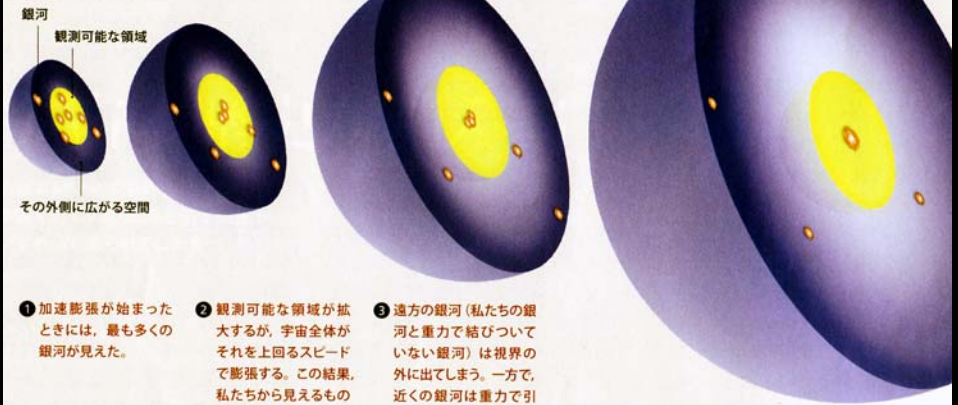
宇宙の組成と宇宙の未来



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。

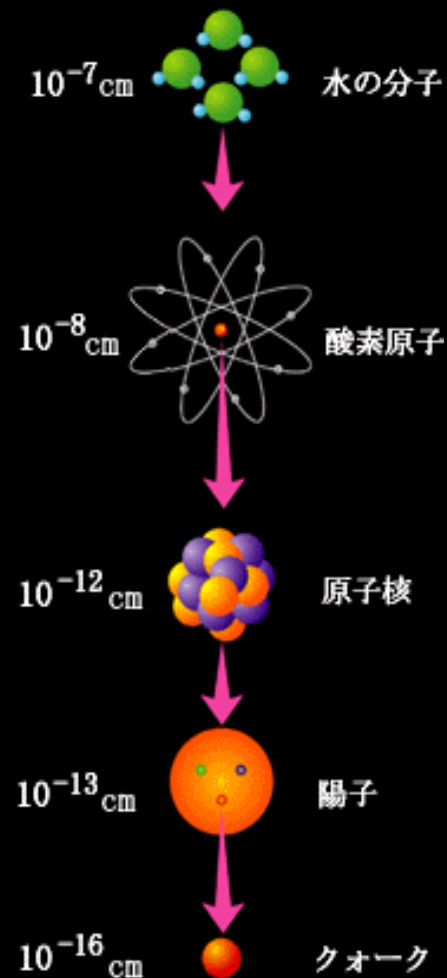
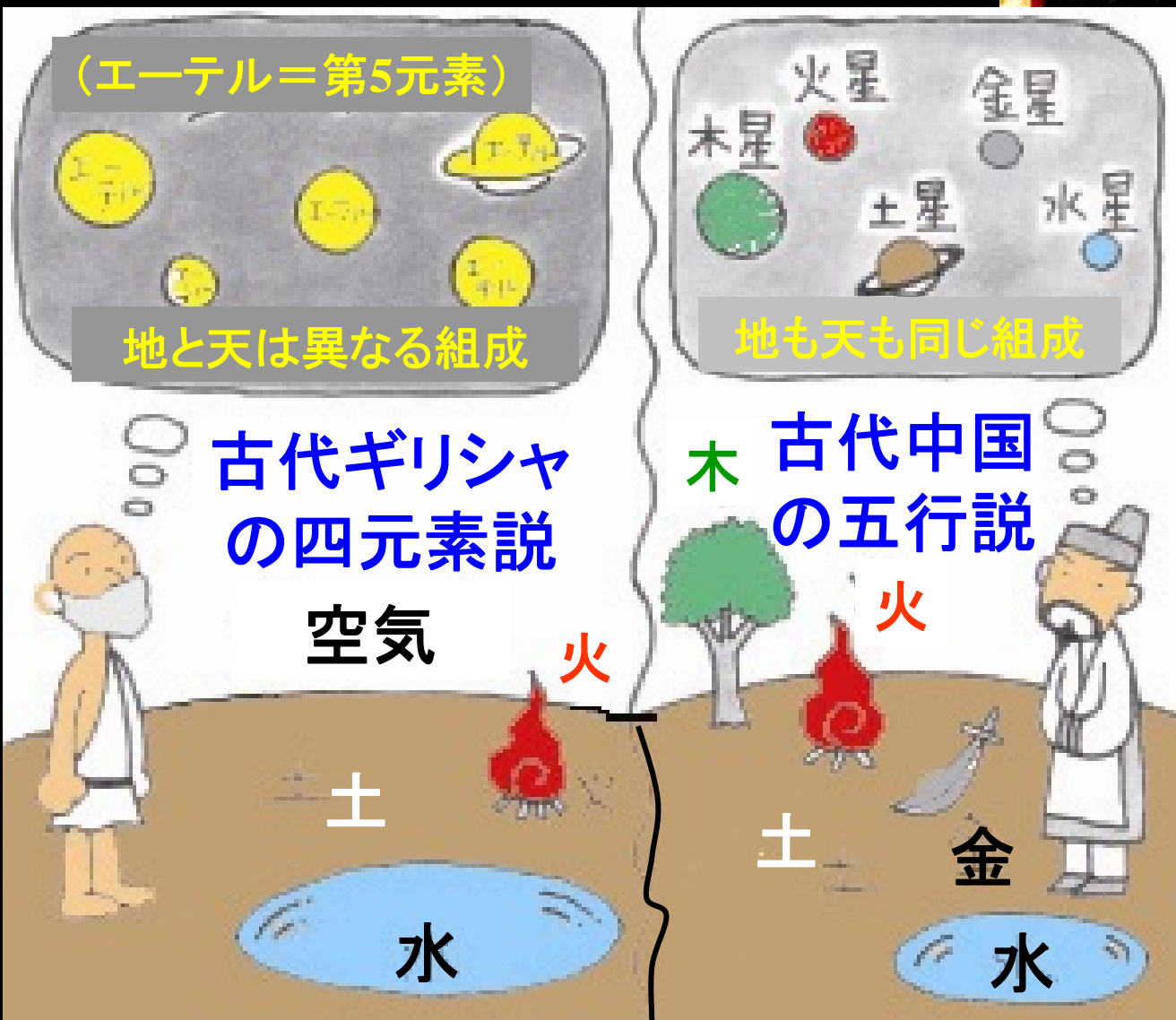
④ ついには、私たちから見えるのは自分たちがいる1つの超大型銀河と、何も無い虚空だけになる。



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。

WMAP、超新星、SDSSによってわかった 宇宙の組成とそれが予言する宇宙の未来

自然界に思いをはせる



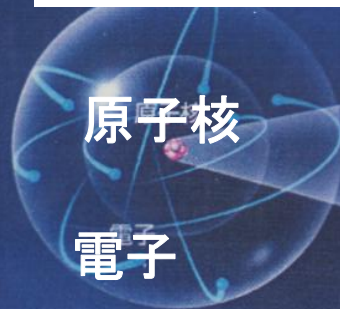
(いずれも 須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)

宇宙の主成分の候補(1):バリオン

- 地上の物質のほとんどすべては元素(原子)から構成されている
 - 光やニュートリノもあるがそれらは全質量への寄与としては無視できる
 - 原子は原子核(=陽子+中性子)と電子からできているが、電子の質量は陽子の2000分の1なのでその寄与も無視してよい
 - 陽子と中性子は「バリオン」と呼ばれる種族である(本来はクォークから構成されている複合粒子の総称)
 - このため、通常物質のことを指して「バリオン」というやや不正確な表現が慣用となっている
- 宇宙も地上と同じく普通の粒子(=バリオン)だけからなると考えるのがもっとも自然

物質を構成しているもの

クォークからなる複合粒子＝バリオン(普通の元素)



原子核

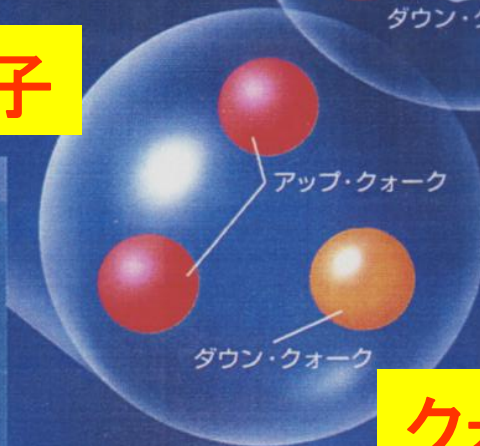
中性子

陽子

原子

中性子

陽子

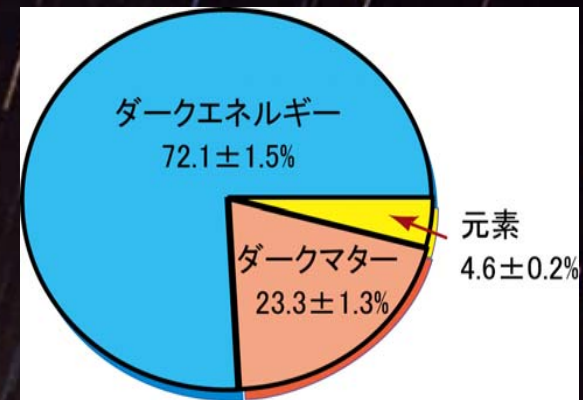


クォーク

	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。

バリオン存在量の推定

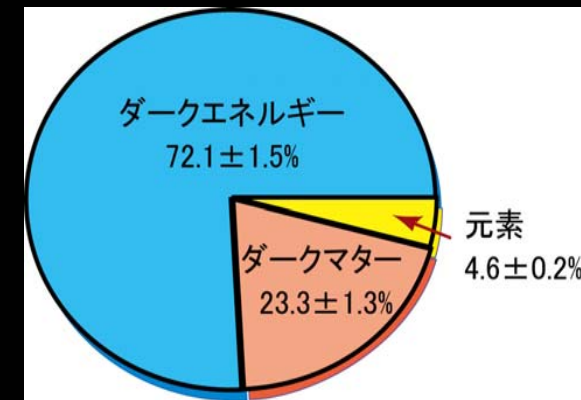


- 普通の物質はほとんどが見える(光を出す)
 - 単位体積あたりの光の量を測定
 - 星(銀河)が単位質量あたりに出す光の量を推定
 - 観測された光量を質量に換算
 - 単位体積あたりの質量 = 質量密度が推定できる
 - 星以外のバリオン(高温ガスなど)についても同様
- 宇宙の全質量の約5パーセント弱しか説明できない

宇宙の主成分の候補(2):ダークマター

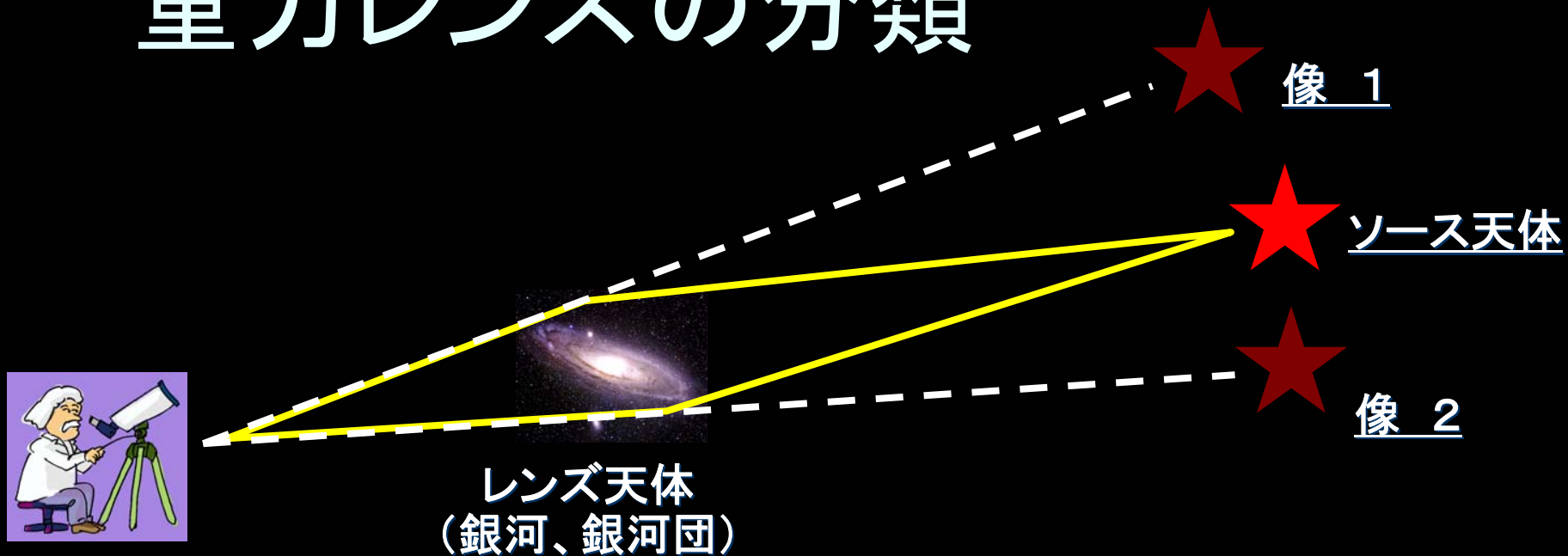
- 宇宙は本当に地上の物質と同じく元素(バリオン)だけでできていると考えてよいものか ⇒ No
- ダークマターとは重力を及ぼすが直接光ることはない(現時点では)未知の物質で、70年以上前に提案され、今や天文学観測によってその存在はほぼ確実
 - ダークマターを仮定しない場合、数多くの観測データをそれぞれ異なる複雑なモデルで説明しなくてはならない
 - 科学は現象を説明できるモデルが複数存在する場合、仮定がもっとも少ないものが優れていると考える(思考の経済性)

ダークマター存在量の推定



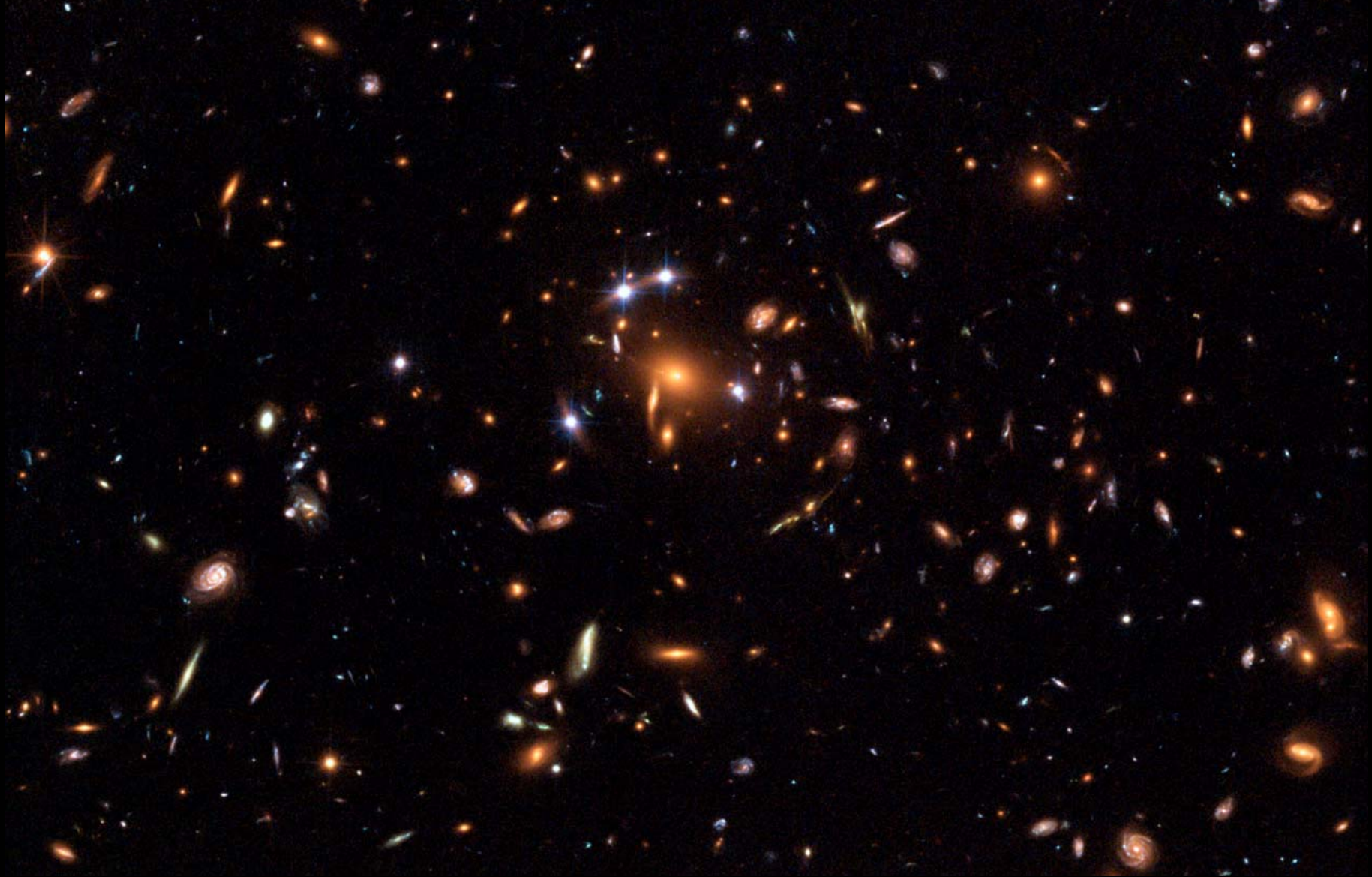
- 銀河や銀河団にはバリオンの10倍程度の見えない質量が存在(=ダークマター)
 - 銀河や銀河団の運動を測定し、そのエネルギーと釣り合うだけの重力エネルギーを説明できるダークマター量を推定
 - 重力レンズ現象からダークマターの量を推定
- 宇宙の全質量の約23パーセントを占める

重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
 - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
 - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
 - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

ハッブル宇宙望遠鏡でみる重力レンズ



ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112

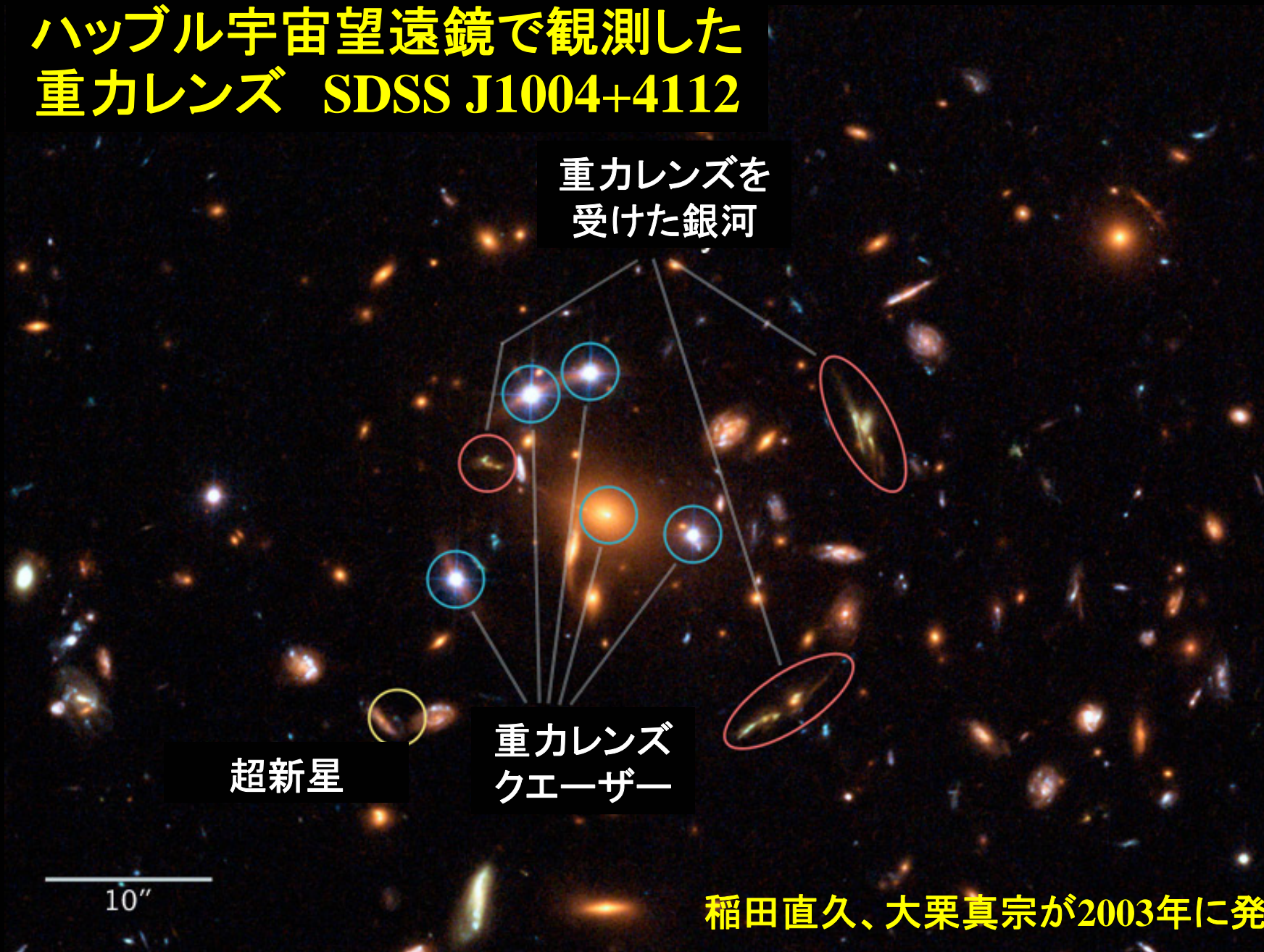
重カレンズを
受けた銀河

超新星

重カレンズ
クエーザー

10''

稲田直久、大栗真宗が2003年に発見



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)

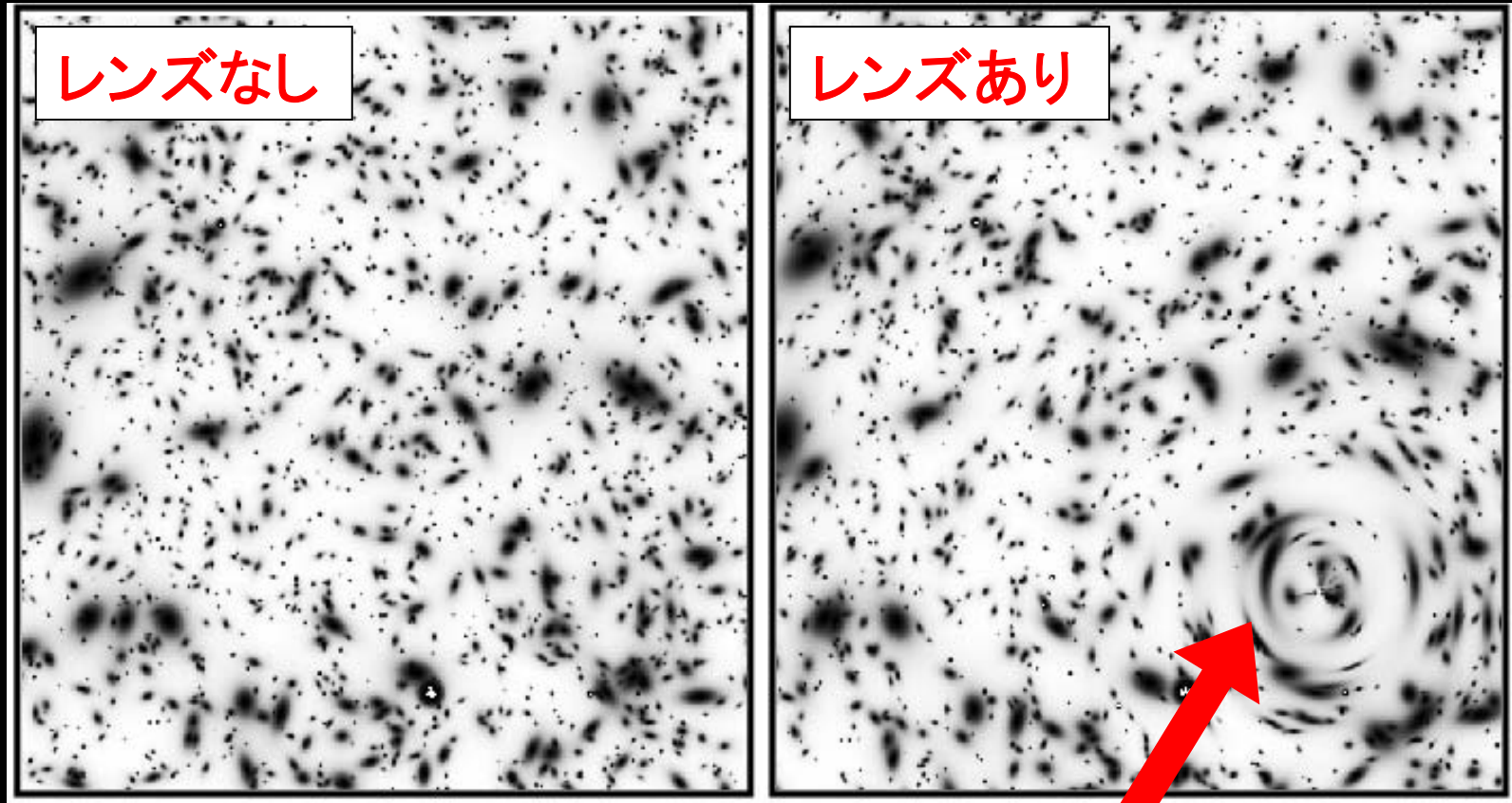
62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



重レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼



弱い重力レンズ



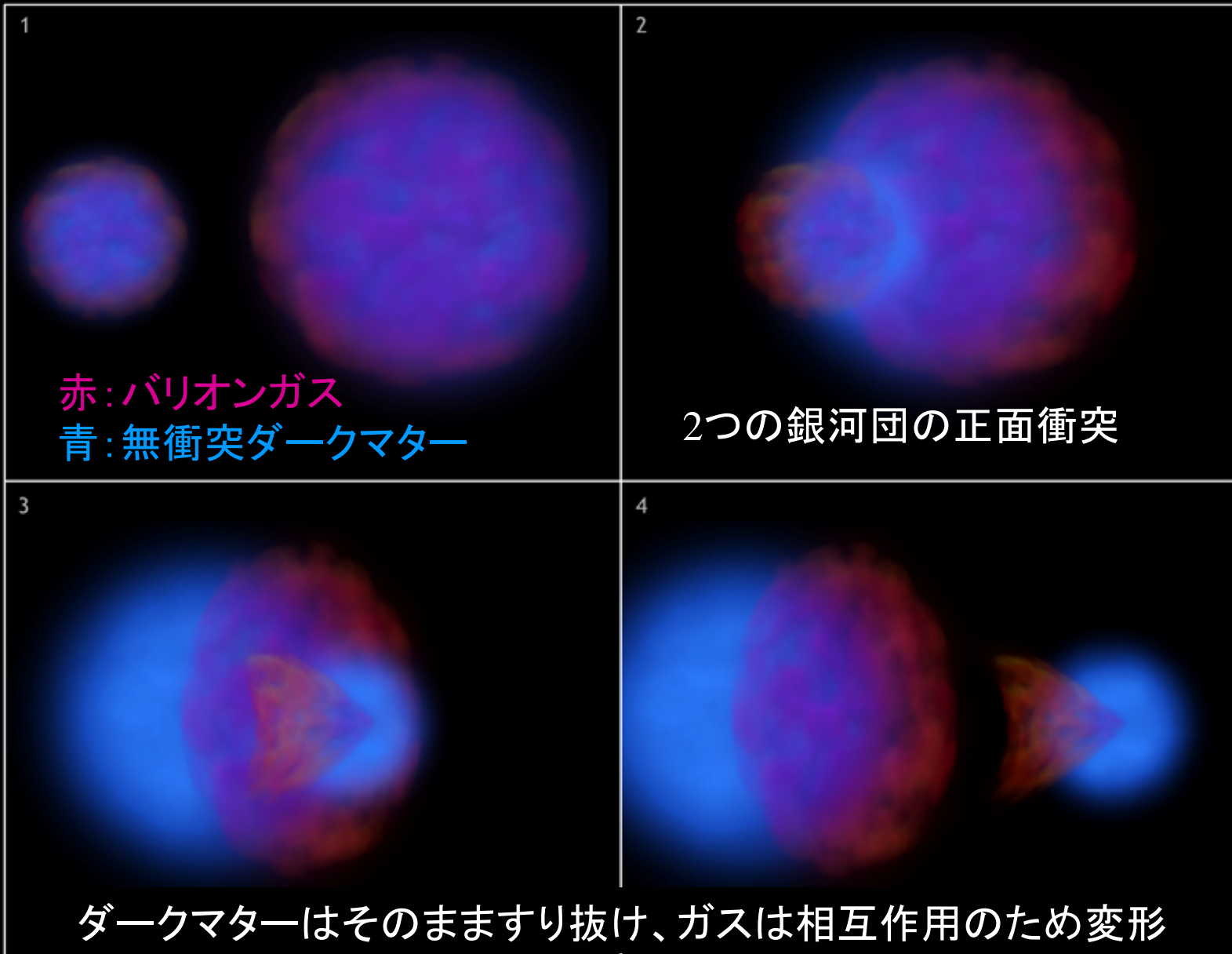
$z=0.3$ に 10^{14} 太陽質量の重力レンズ天体がある
場合に予想されるイメージ

弾丸銀河団



1.5'

ダークマター存在の証拠



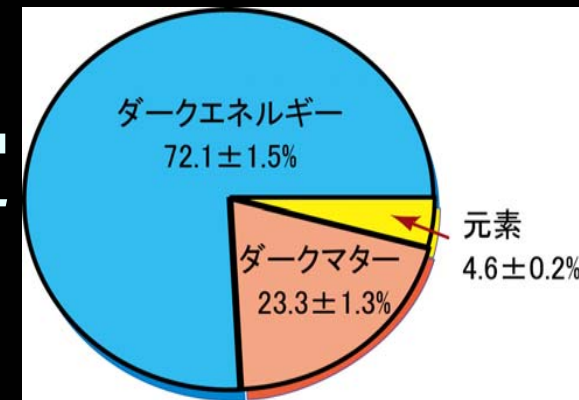
宇宙のダークマター

- **天文学的ダークマター(バリオン)**
 - 重力レンズの観測により銀河系ハローの暗黒物質の一部は小質量天体であることがわかっている
 - しかし、宇宙のダークマターのすべてを説明することはできない(ビッグバン元素合成からの制限)
- **素粒子論的ダークマター(非バリオン)**
 - ニュートリノ以外のダークマター粒子(冷たいダークマター:**Cold Dark Matter**)が必要
 - 理論モデルは数多く提案されているが直接的な実験・観測的検証は未だ存在しない
- **ダークマターの直接検出は21世紀物理学に残された大きな課題**

宇宙の主成分の候補(3):ダークエネルギー

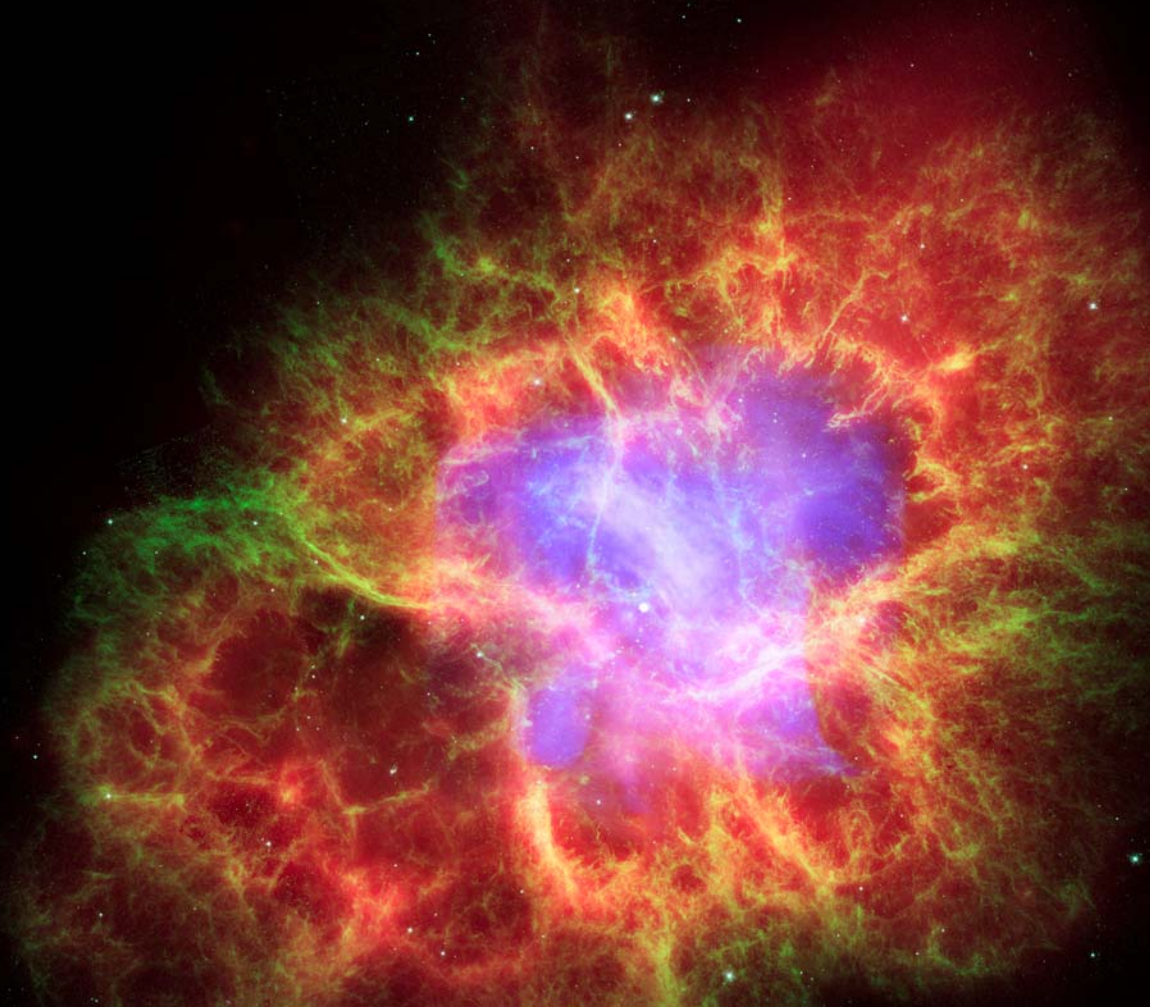
- **ダークマターの存在は、光っているものだけが世界のすべてではないことを教えてくれる**
 - ダークマターは、光は出さないが互いに万有引力を及ぼすので空間的には凸凹分布
 - 光で観測できる銀河や銀河団はそのようなダークマターの塊の中心部に誕生すると考えられている
- **では、宇宙空間を完全に一様に満たすような成分(ダークエネルギー)は存在しないのか？**
 - そのようなものがあっても観測できるのか？
 - このままでは意味もない哲学と同じ問いかけのように思えるが実は観測的にも存在が必要とされる

ダークエネルギー存在量の推定



- 銀河や銀河団などの天体の付近に集中しているわけではない
- 宇宙全体の膨張の変化率を測定する
- 原理を理解することは難しいかもしれないがとにかく説明してみる
- 宇宙の全エネルギーの約72パーセントを占める

超新星： 星の進化の最終段階での爆発



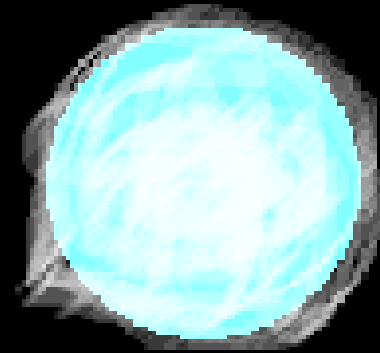
かに星雲

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/>

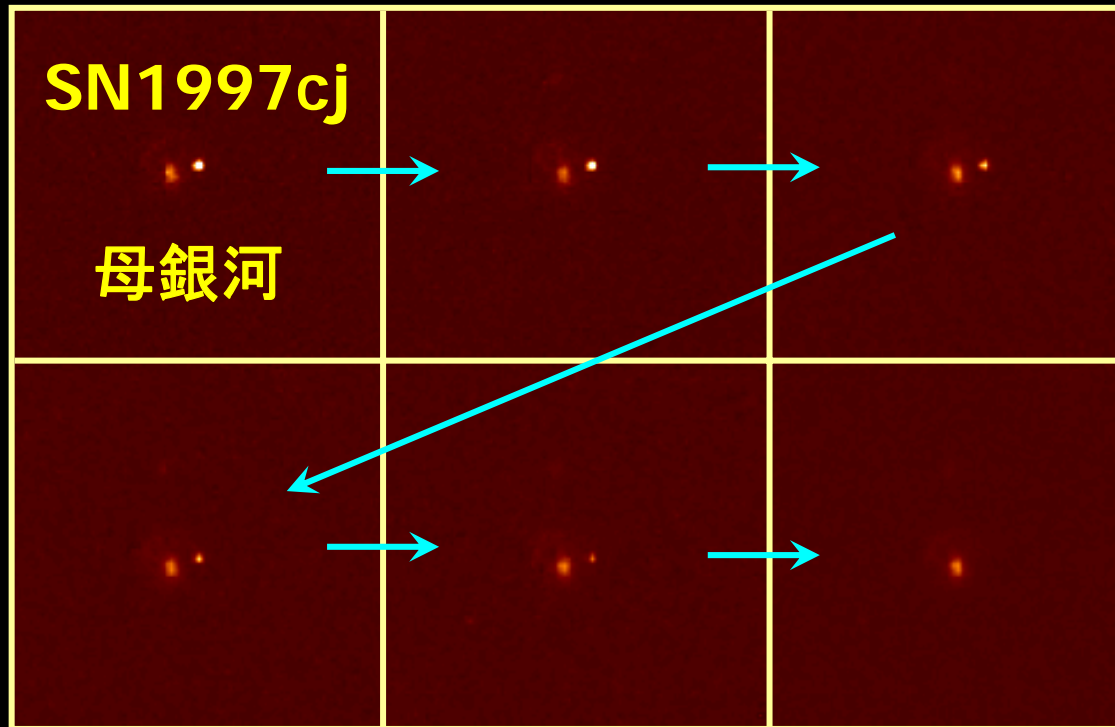
Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる**連星系**の**進化の最終段階**
- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
 - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力を支える)には、安定に存在できる最大質量がある
 - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
 - これを越えると不安定となり爆発を起こす

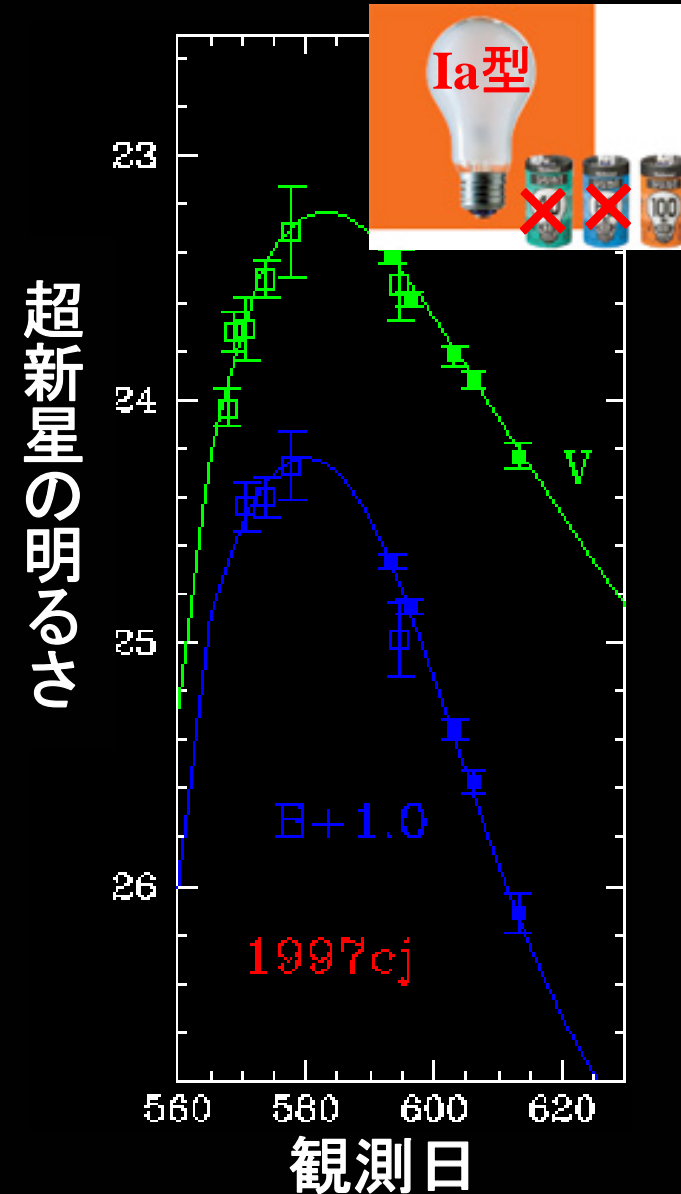


Ia型超新星の光度曲線の測定

- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測

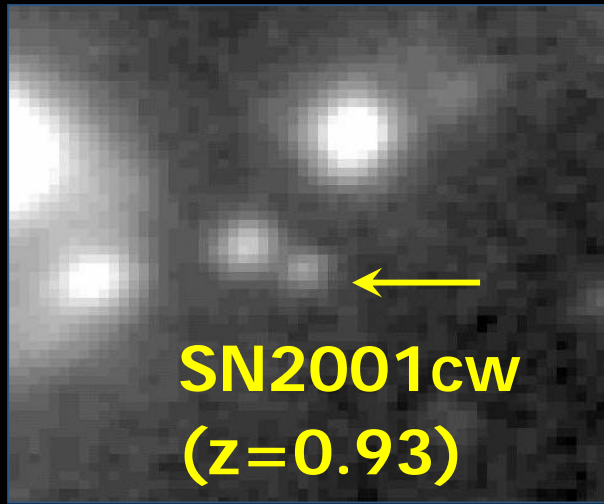


標準光源: Ia型超新星

見かけの明るさ: F

真の明るさ: L

Ia型超新星



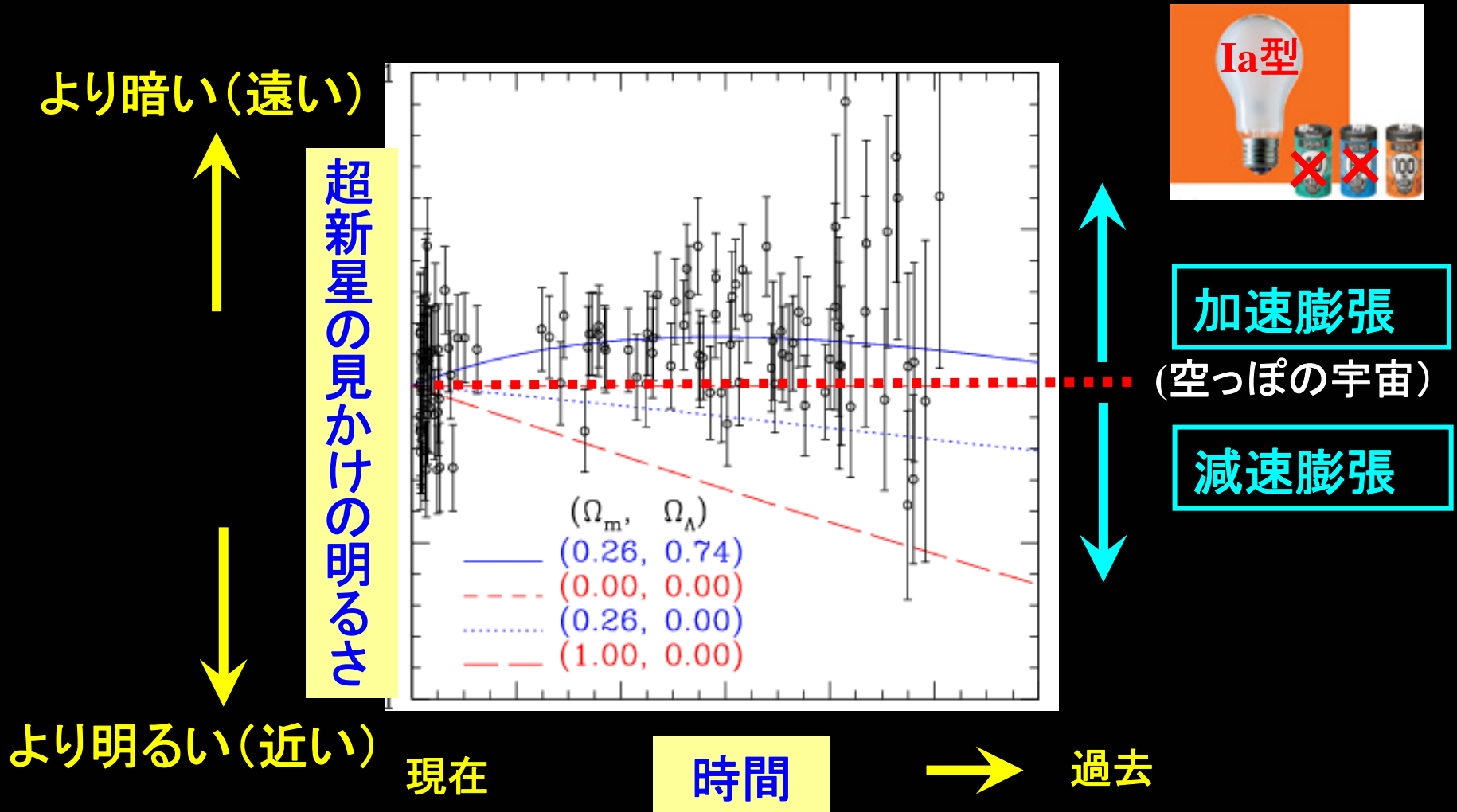
距離: D

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

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

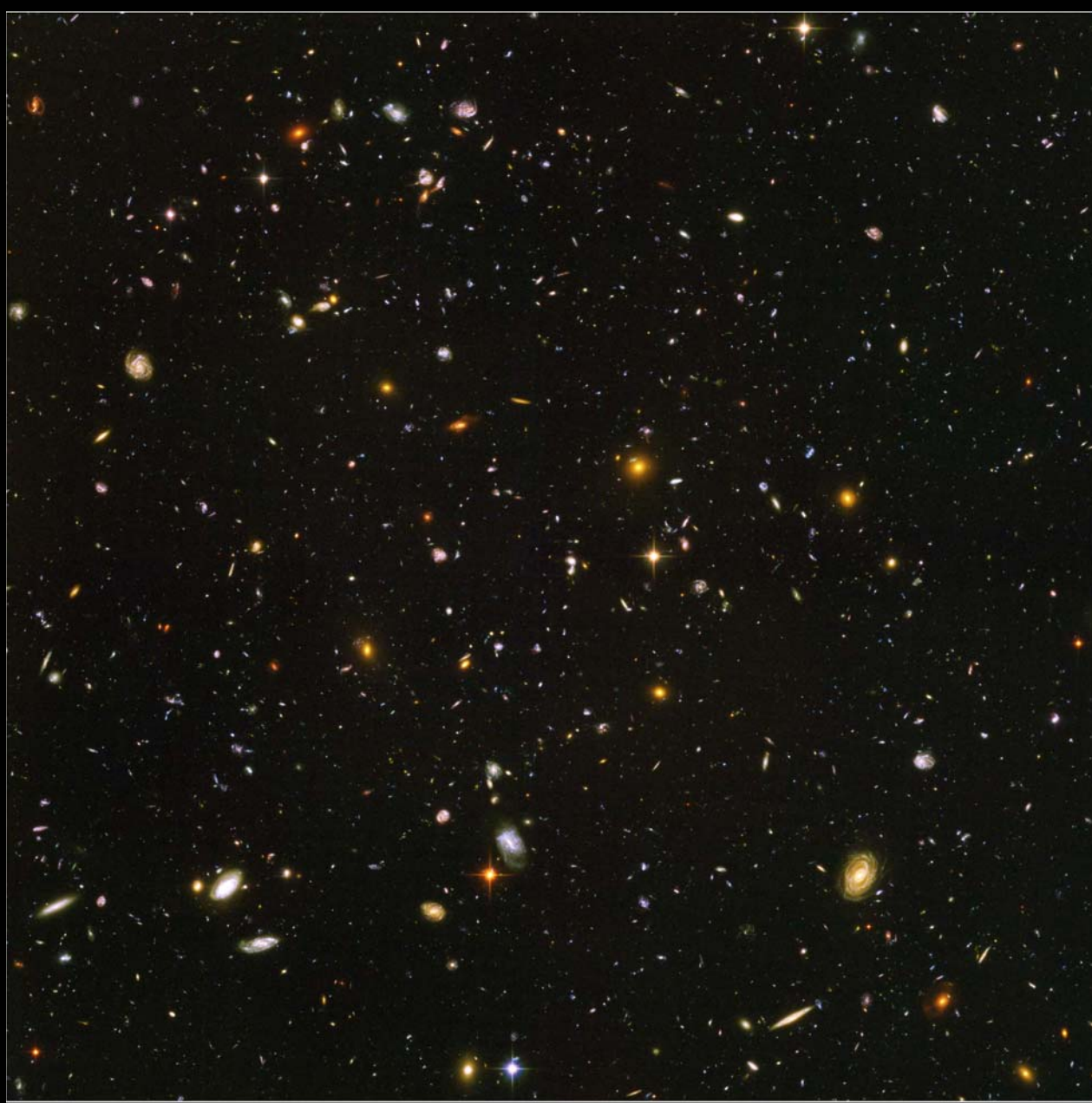
- 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な結果
- にもかかわらず観測的に証明されてしまった
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（ダークエネルギー）??

宇宙のダークエネルギー

- **ダークマターとは異なり、空間的に局在して
いるようなものではない**
 - 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
- **その重力は、実効的に「万有斥力」**
 - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応
 - ダークマター以上にその正体は不明
- **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かもしれない**

ハッブル ウルトラ ディープ フィールド (HUDF)

人類が地上か
ら見た最も遠い
(=過去)宇宙の
果て



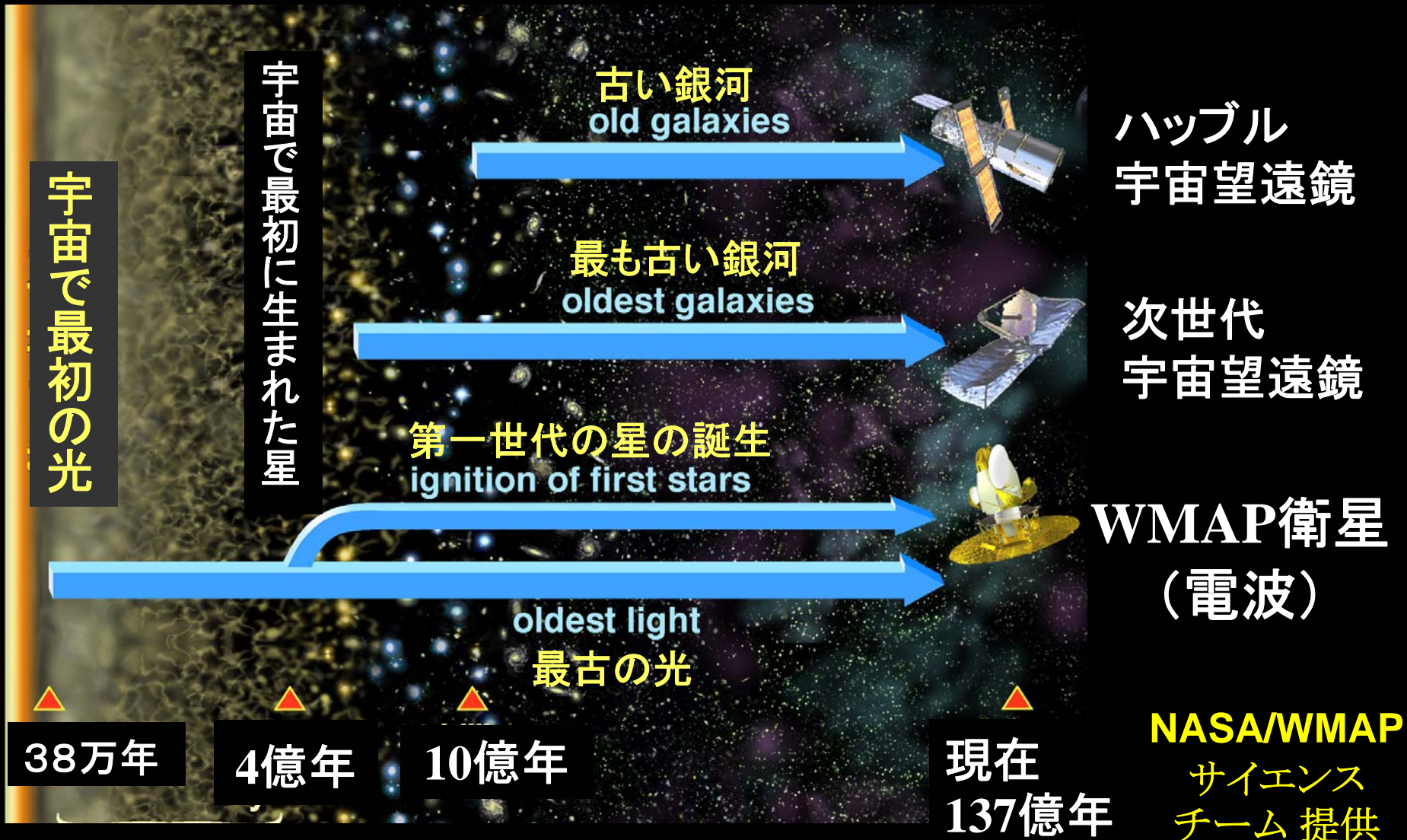
Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

夜空からHUDFへ



Night Sky

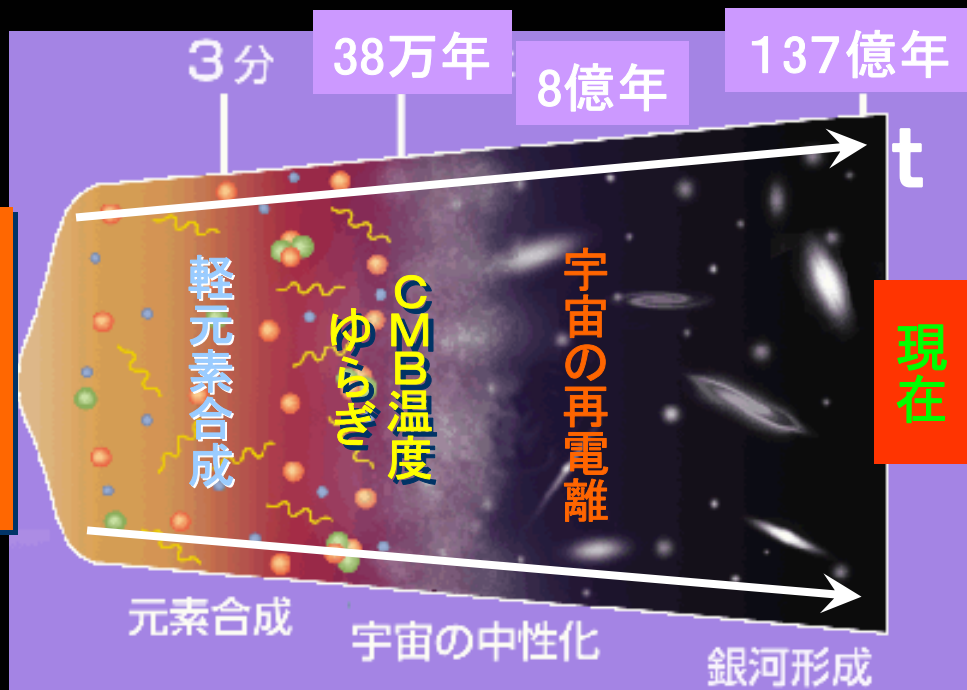
衛星によってさらに過去の宇宙を探る



<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、宇宙は電磁波に対して透明となる

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

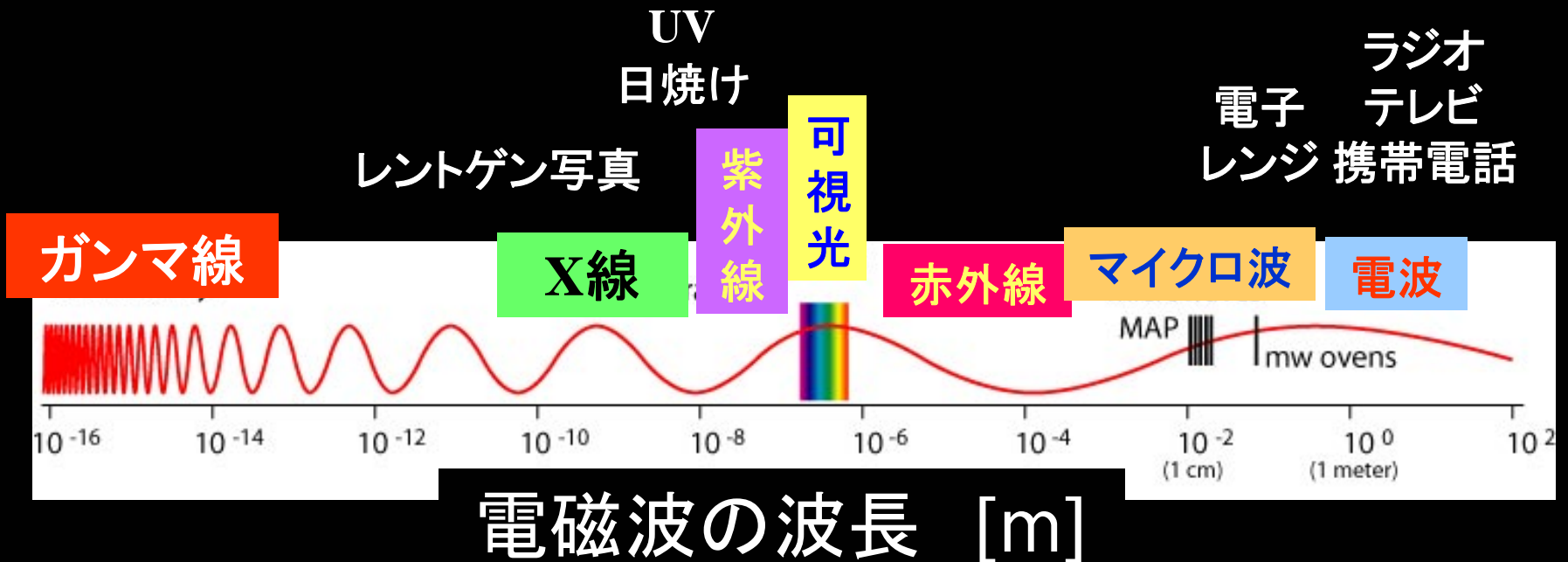
銀河団の形成

宇宙の大構造

マイクロ波とは？：電磁波の名前と波長

通常、「光」と呼ばれているものは、電磁波と呼ばれる波の一種である。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代の天文学ではこれらすべての波長を駆使した観測を行っている。

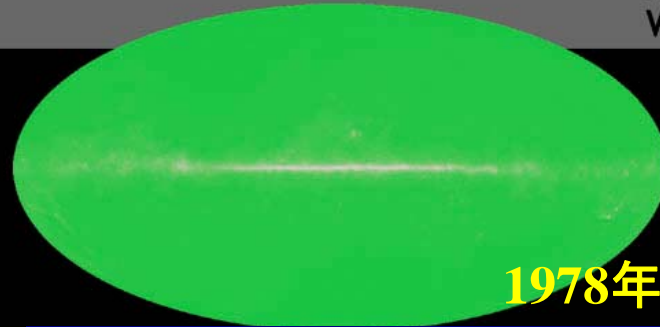
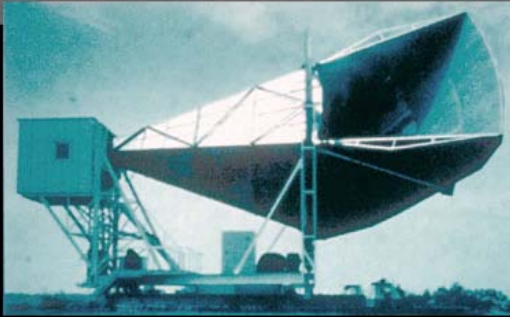
マイクロ波は、波長1mm(300GHz)から1m(300MHz)の領域で極超短波とも呼ばれる。電波望遠鏡は主としてこの波長域を利用する。



CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

1965

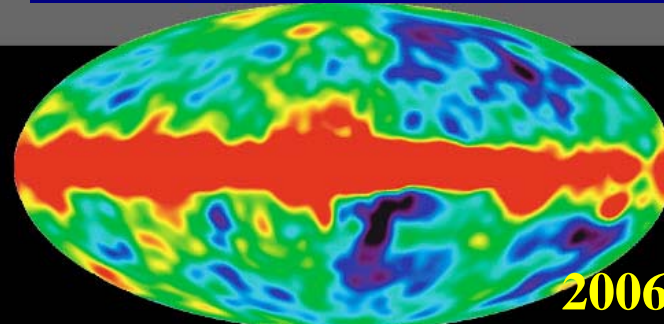
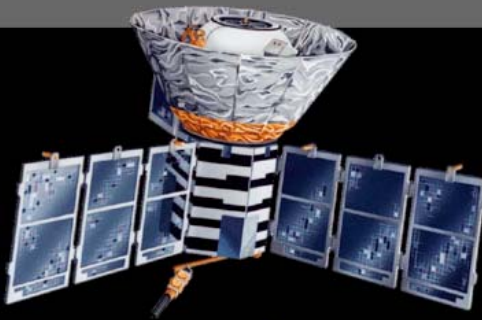
Penzias and
Wilson



1978年ノーベル物理学賞

CMBの発見・宇宙の等方性

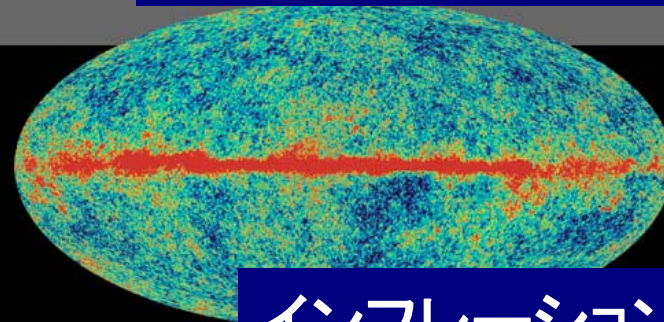
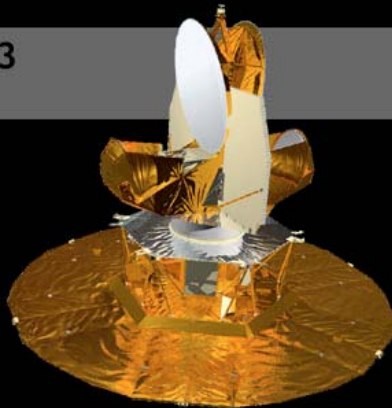
1992



2006年ノーベル物理学賞

10万分の1の非等方性発見

2003

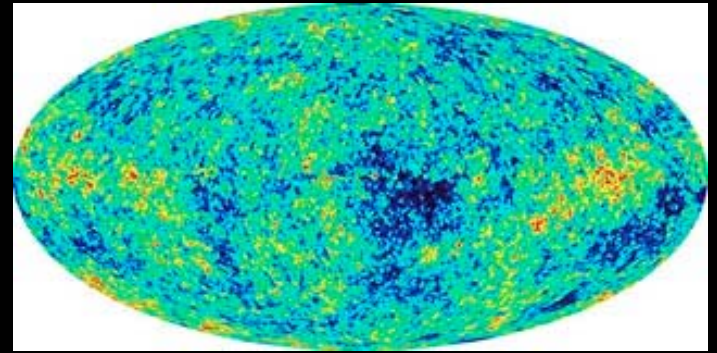


インフレーション理論の検証

137億年前の古文書の解読方法

■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図



■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

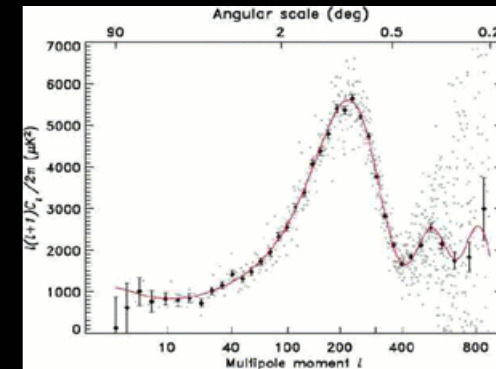
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 古文書を理解するための文法

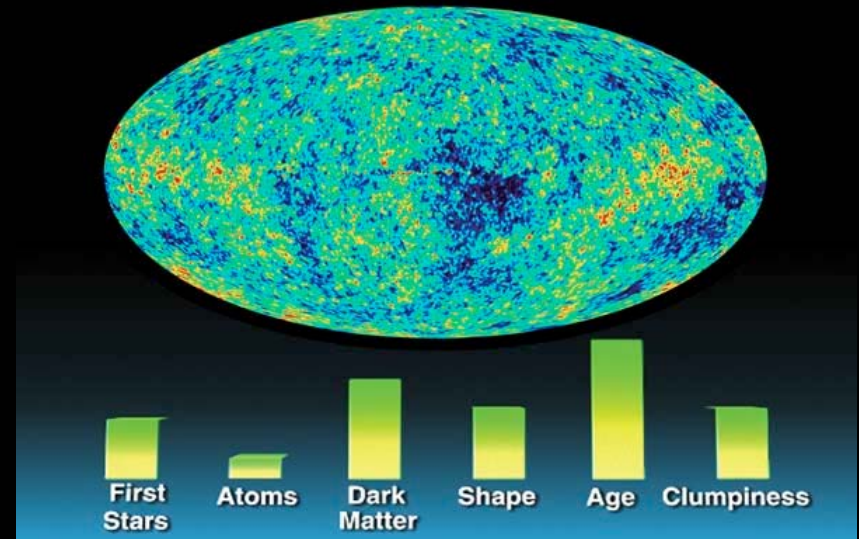
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

■ 夜空のムコウに隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



宇宙の古文書が 教えてくれたこと

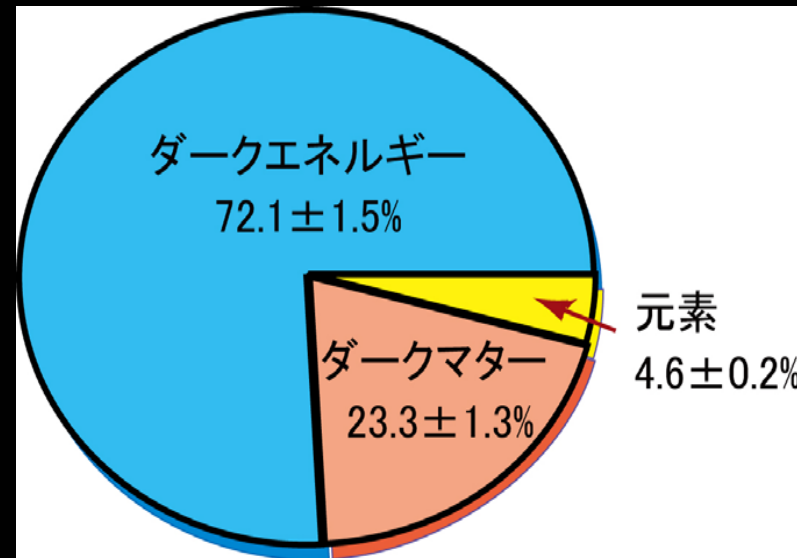
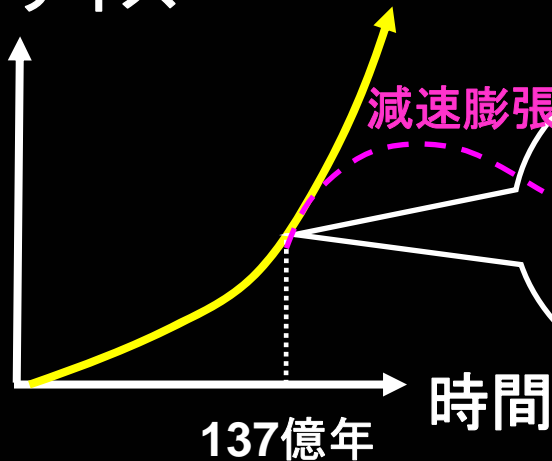


- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて4億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「ダークマター」
- 実はさらに、「ダークエネルギー」が宇宙を支配

宇宙の95%以上が正体不明

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



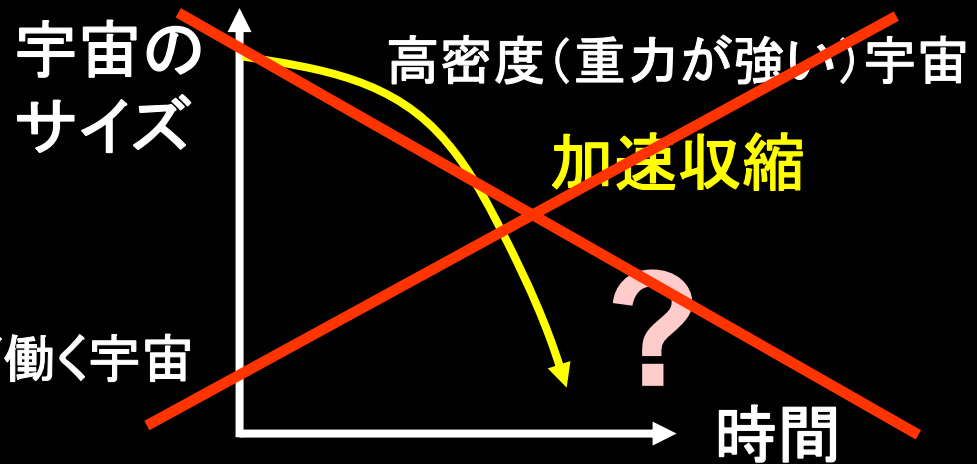
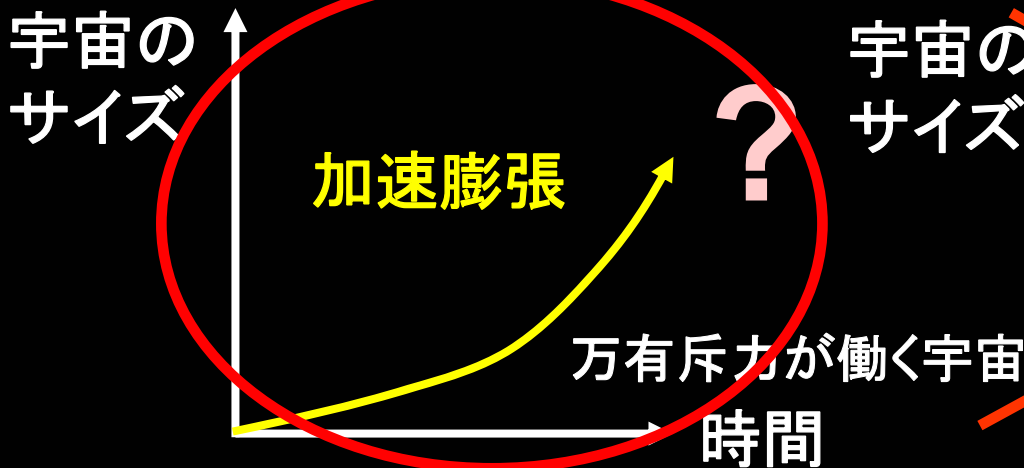
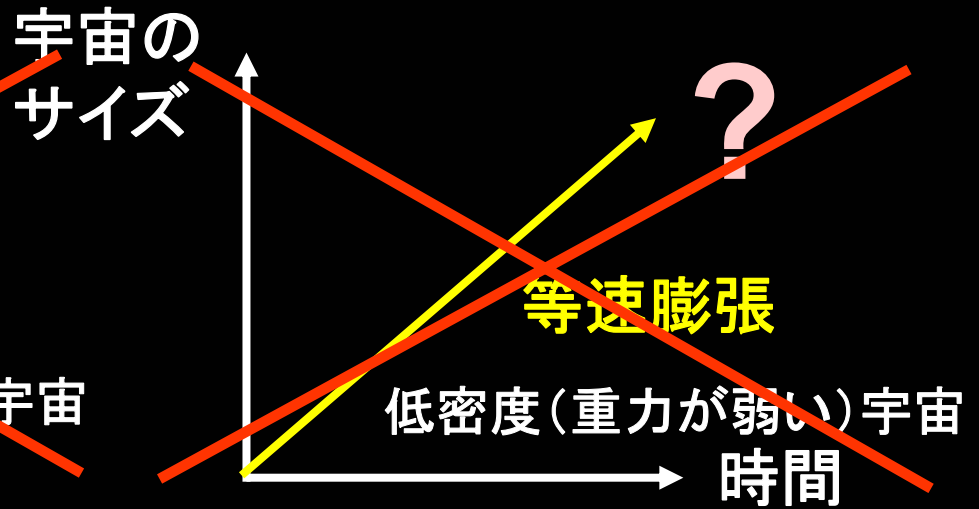
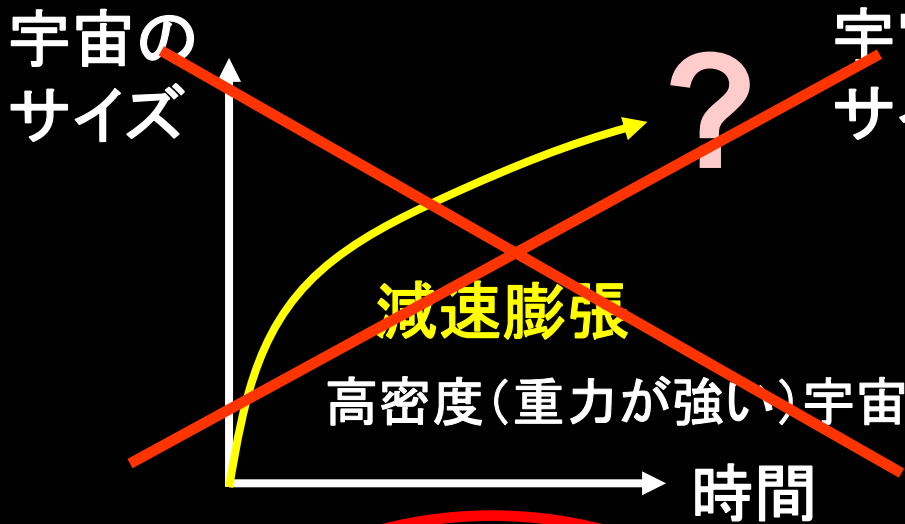
■ ダークエネルギーの正体は何か？

- 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

■ 我々は何も知らなかった

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

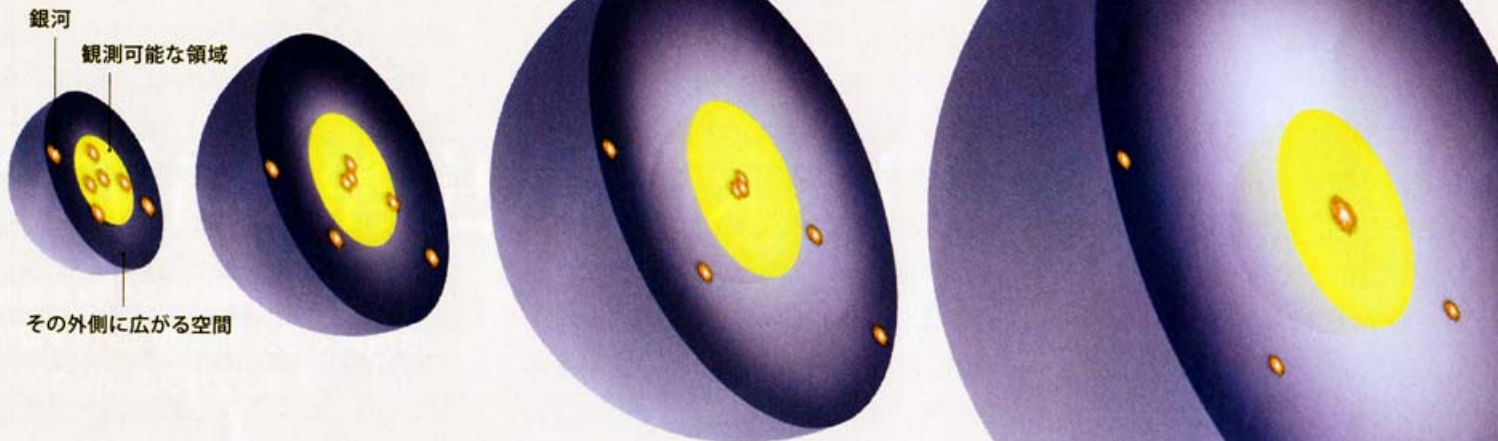


宇宙の未来

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）で何が起こるかを考えよう。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。



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。

宇宙の未来の年表

- 50億年後
 - 太陽が一生を終え、地球を飲み込む
- 10兆年後
 - ほとんどの星が燃料を使い果たして死ぬ
- 10^{30} 年後
 - 銀河がすべて中心ブラックホールに飲み込まれる
- 10^{33} 年後
 - 銀河団がすべて中心ブラックホールに飲み込まれる
- 10^{37} 年後
 - 物質を構成している陽子が崩壊
- 10^{98} 年後
 - 銀河サイズのブラックホールが蒸発
- 10^{131} 年後
 - 現在観測されている宇宙全体を含むブラックホールが蒸発

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）