

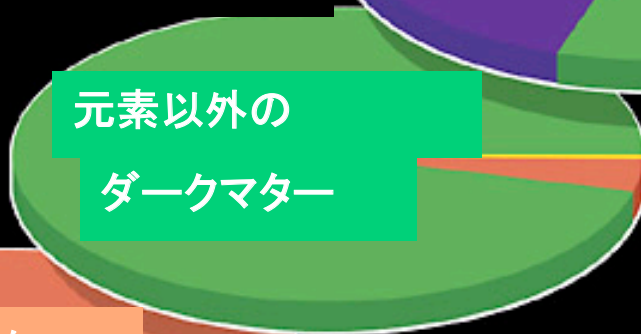
# 宇宙の加速膨張とは

東京大学大学院  
理学系研究科  
物理学専攻  
須藤 靖

1970年代



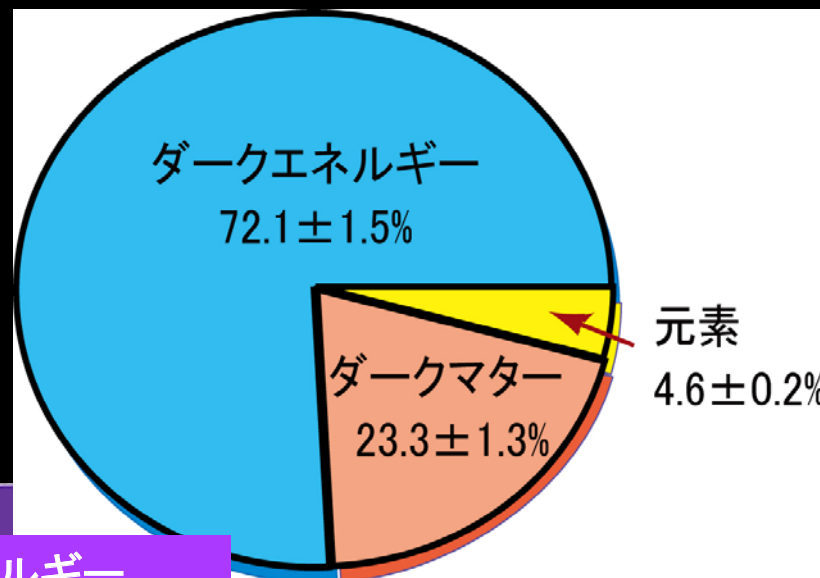
1980年代



1990年代



2010年代



2012年3月24日 13:30-13:50  
宇宙線・宇宙物理領域  
素粒子論領域合同シンポジウム  
“加速膨張を続ける宇宙論”  
日本物理学会@関西学院大学

# 2011 Nobel prize in Physics

- **Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess**
  - for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae



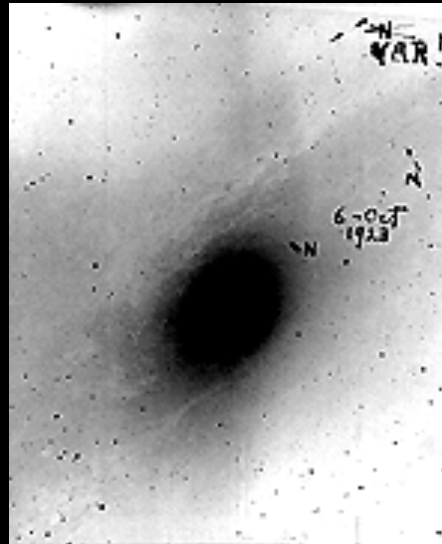
# 宇宙膨張の発見

## エドウィン ハッブル (1889-1953)

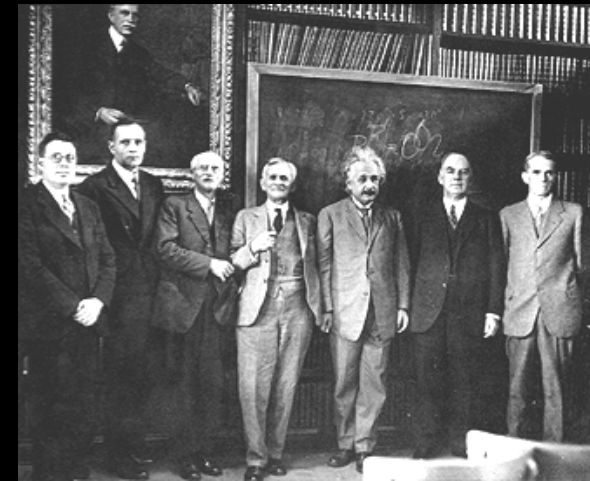
- アンドロメダ星雲中にセファイド型変光星を発見し、“星雲”は我々の銀河系の外の独立した銀河であることを示した (1923年)
- 遠方銀河はその距離に比例した速度で遠ざかっていることを発見し、宇宙が膨張していることを観測的に明らかにした (1929年)



アンドロメダ  
銀河のセファイド変光星



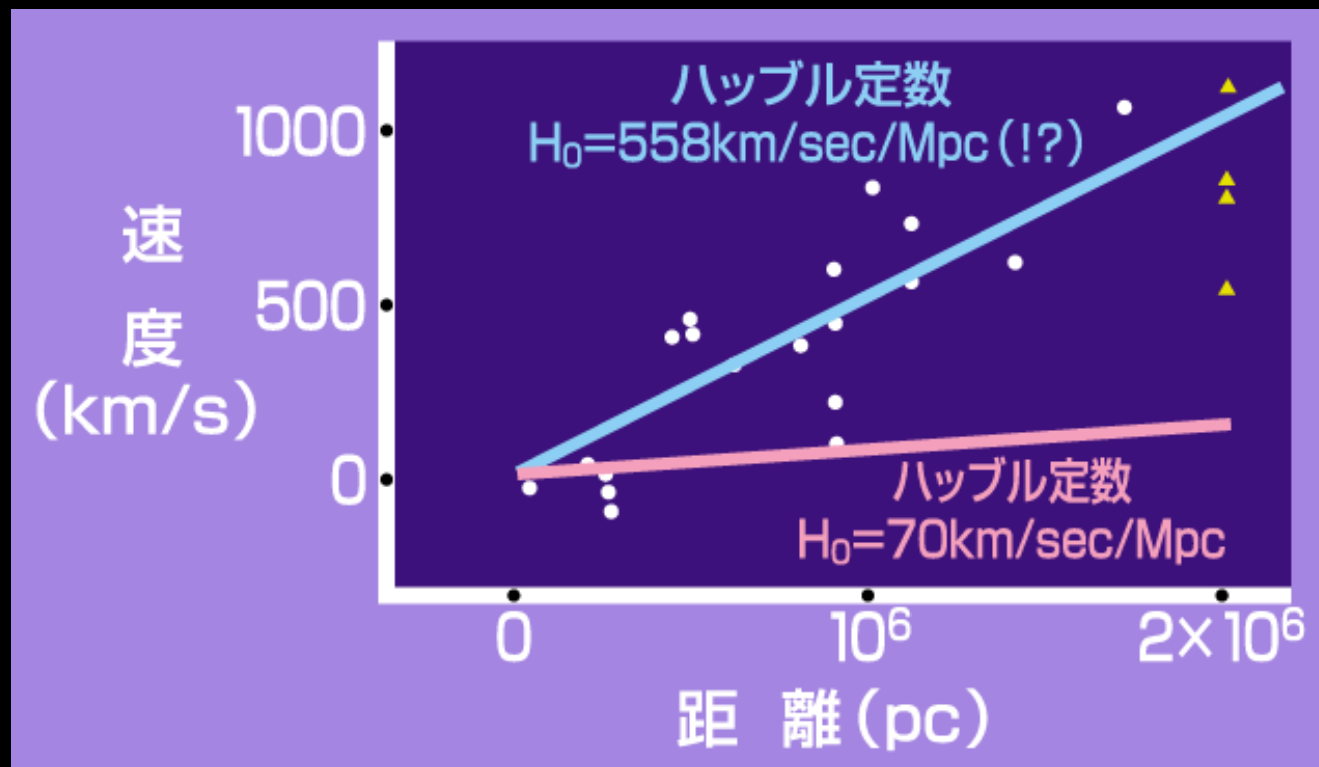
1931年にウィルソン山天文台を  
訪問したアインシュタイン



<http://www.mtwilson.edu/History>

# ハッブルの法則 (1929)

- 遠方銀河は我々に対して遠ざかっている
- その後退速度は、銀河までの距離に比例している



ハッブルの法則  
 $v = H_0 d$

ハッブルが得た  
遠方銀河の  
距離速度関係

# ハッブルの法則か、ルメートルの法則か？

(日本物理学会誌 2012年5月号)

- Sidney van den Bergh: The curious case of Lemaître's equation 24, arXiv:1106.1195
  - 宇宙膨張を発見したのは1929年のハッブルの論文 (PNAS, 15, 1929, 168)だというのが通説
  - しかし、ルメートルの1927年のフランス語論文です でに“ハッブル定数”が重みのつけ方によって625 あるいは575km/s/Mpcと計算されていた(この事実は 一部ではよく知られていたらしい)
  - この論文はその後MNRASに英訳されて、1931年に 発表されているが、そこでは、ハッブル定数の計算に 関する式の一部と、本文および脚注がすっぽりと抜 け落ちている



# 英訳版では削除されている箇所 (1)

- 335 -

période de la lumière reçue et  $\delta t_1$  peut encore être considéré comme la période d'une lumière émise dans les mêmes conditions dans le voisinage de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

mesure donc l'effet Doppler apparent dû à la variation du rayon de l'univers. Il est égal à l'excès sur l'unité du rapport des rayons de l'univers à l'instant où la lumière est reçue et à l'instant où elle est émise.  $v$  est la vitesse de l'observateur qui produirait le même effet. Lorsque la source est suffisamment proche nous pouvons écrire approximativement

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r$$

où  $r$  est la distance de la source. Nous avons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{r}{cr} \quad (23)$$

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg (1).

La grandeur apparente  $m$  de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur  $-15,2$  à  $10$  parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance  $r$  exprimée en parsecs est alors donnée par la formule  $\log r = 0,2m + 4,04$ .

On trouve une distance de l'ordre de  $10^6$  parsecs, variant de quelques dixièmes à  $3,3$  millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de  $0,4$  à  $2,5$  fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de  $300$  Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à  $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ , où  $r$  est la distance en millions de parsecs.

(1) Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. *Ap. J.* Vol. 61, p. 353, 1925. *M. Wilson Contr.* No 292.

- 336 -

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg (1), et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction  $\alpha = 315^\circ$ ,  $\delta = 62^\circ$ ), on trouve une distance moyenne de  $0,95$  millions de parsecs et une vitesse radiale de  $600$  Km./sec, soit  $625$  Km./sec à  $10^6$  parsecs (2).

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

Cette relation nous permet de calculer  $R_0$ . Nous avons en effet par (16)

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{R_0 \sqrt{3}} \sqrt{1 - 3y^2 + 2y^3} \quad (25)$$

où nous avons posé

$$y = \frac{R_1}{R} \quad (26)$$

D'autre part, d'après (18) et (26),

$$R_0^2 = R_2^2 y^3 \quad (27)$$

et donc

$$3 \left( \frac{R'}{R} \right)^2 R_0^2 = \frac{1 - 3y^2 + 2y^3}{y^3} \quad (28)$$

Introduisant les valeurs numériques de  $\frac{R'}{R}$  (24) et de  $R_2$  (19), il vient :

$$y = 0,0465.$$

On a alors :

$$R = R_2 \sqrt{y} = 0,215 R_2 = 1,83 \times 10^{28} \text{ cm.} = 6 \times 10^9 \text{ parsecs}$$

$$R_0 = Ry = R_2 y^{\frac{2}{3}} = 8,5 \times 10^{26} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^8 \text{ parsecs} \\ = 9 \times 10^8 \text{ années de lumière.}$$

(1) Il n'est pas tenu compte de N. G. C. 5194 qui est associé à N. G. C. 5195. L'introduction des nuées de Magellan serait sans influence sur le résultat.

(2) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait  $670$  Km./sec à  $1,46 \times 10^6$  parsecs,  $575$  Km./sec à  $10^6$  parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre  $v$  et  $r$  et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande ( $300$  Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativistique de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer  $v$  proportionnel à  $r$  et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport  $v/r$ . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world *M. N.*, vol. 84, p. 747, 1924. et STRÖMBERG, *l. c.*

## 英訳版では削除されている箇所 (2)

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg <sup>(1)</sup>.

La grandeur apparente  $m$  de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur — 15,2 à 10 parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance  $r$  exprimée en parsecs est alors donnée par la formule  $\log r = 0,2m + 4,04$ .

On trouve une distance de l'ordre de  $10^6$  parsecs, variant de quelques dixièmes à 3,3 millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de 0,4 à 2,5 fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de 300 Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à  $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ , où  $r$  est la distance en millions de parsecs.

---

<sup>(1)</sup> Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. *Ap. J.* Vol. 61, p. 353, 1925. *M<sup>c</sup> Wilson Contr.* N° 292.

# 英訳版では削除されている箇所 (3)

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg <sup>(1)</sup>, et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction  $\alpha = 315^\circ$ ,  $\delta = 62^\circ$ ), on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 Km./sec, soit 625 Km./sec à  $10^6$  parsecs <sup>(2)</sup>.

Nous adopterons donc

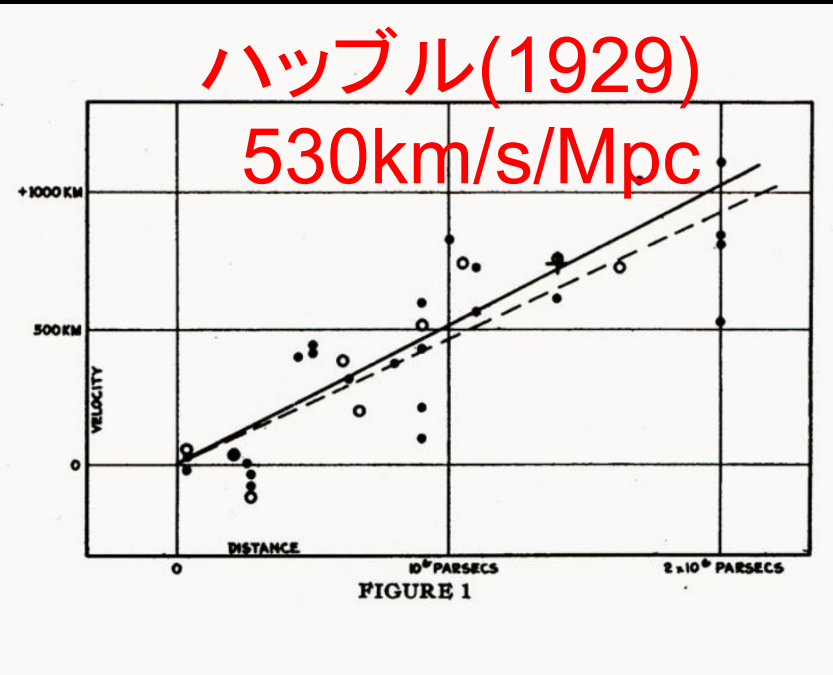
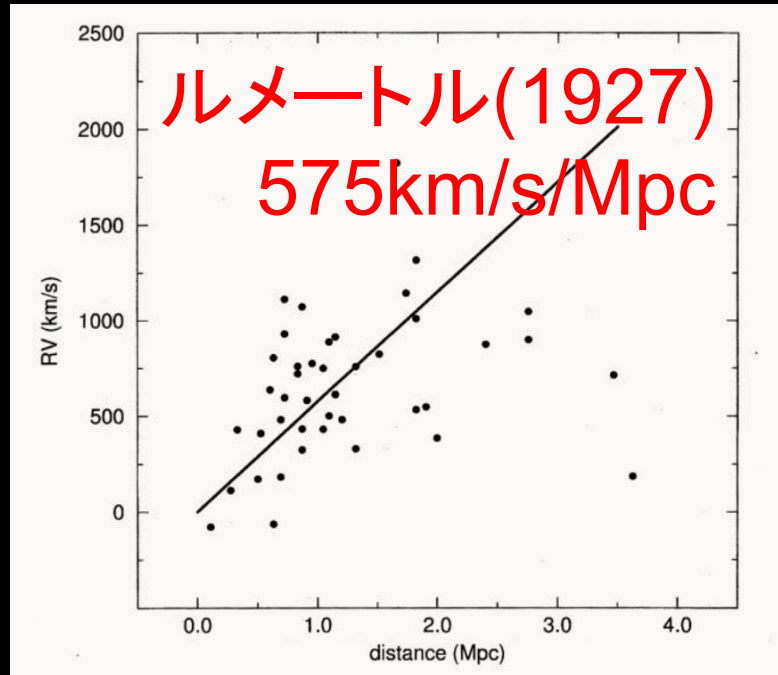
$$\frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}}$$

<sup>(1)</sup> Il n'est pas tenu compte de N. G. C. 5194 qui est associé à N. G. C. 5195. L'introduction des nuées de Magellan serait sans influence sur le résultat.

<sup>(2)</sup> En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à  $1,16 \times 10^6$  parsecs, 575 Km./sec à  $10^6$  parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre  $v$  et  $r$  et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande (300 Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativistique de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer  $v$  proportionnel à  $r$  et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport  $v/r$ . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world M. N., vol. 84, p. 747, 1924, et STRÖMBERG, *l. c.*



# 後退速度・距離関係の比較



Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques, l'Abbé G. Lemaître

[Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles, A47, pp. 49-59](#) : A homogeneous universe of constant mass and

increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebluae, [MNRAS 91\(1931\)483](#)

# Stigler's law of eponymy

- **No scientific discovery is named after its original discoverer (1980 by University of Chicago statistics professor Stephen Stigler)**
- Aharonov-Bohm effect, Alzheimer's disease, Bode's Law, Cardano's formula, Curie point, Dyson spheres, Euler's number, Euler's formula, Fermi's golden rule, Gauss's Theorem, Gaussian distribution, Halley's comet, Hubble's law, Kuiper belt, Snell's law of refraction, ***Stigler's Law, attributed by Stigler himself to Robert K. Merton,*** Wheatstone bridge, Yagi antenna

# 加速度と物理法則

- なぜか物理法則(運動方程式)は時間の2階微分(つまり加速度)で書き表される
- 宇宙の(膨張)速度を知っても、物理法則との整合性の議論はできない
  - エネルギー保存則(運動エネルギー=重力ポテンシャル)より宇宙の重力の大きさ=宇宙の密度と重力的進化時間スケール=宇宙年齢は推定できる
- 宇宙の加速度が測れれば、宇宙を支配する物理法則を知る事ができる
  - 加速度を知れば、(さらに高階微分は知らずとも)それで力学は完結

# 宇宙の加速膨張と物理法則

- 宇宙の大きさ $a(t)$ を現在の時刻 $t_0$ 付近でテイラー展開する

$$a(t) = a(t_0) + \left. \frac{da}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 a}{dt^2} \right|_{t_0} (t - t_0)^2 + \dots$$

- **第一項: 宇宙の“大きさ”** → 定数倍の自由度があり意味を持たない
- **第二項: 宇宙の膨張率 (ハッブル定数)** → 宇宙の年齢
- **第三項: 宇宙膨張の加速度** → 力を及ぼす物質の正体を物理法則 (一般相対論から導かれる宇宙膨張の方程式) を通じて解明できる



# 本来は宇宙は加速できないはず！

## ■ ニュートンの重力の逆二乗則

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{GM(<a)}{a^2} = -\frac{G}{a^2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho a^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho a < 0$$

## ■ 一般相対論による宇宙膨張の式

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

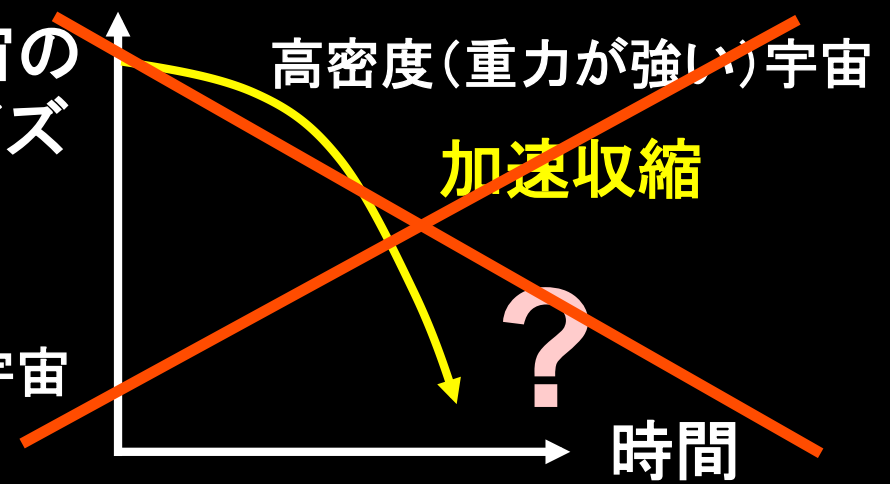
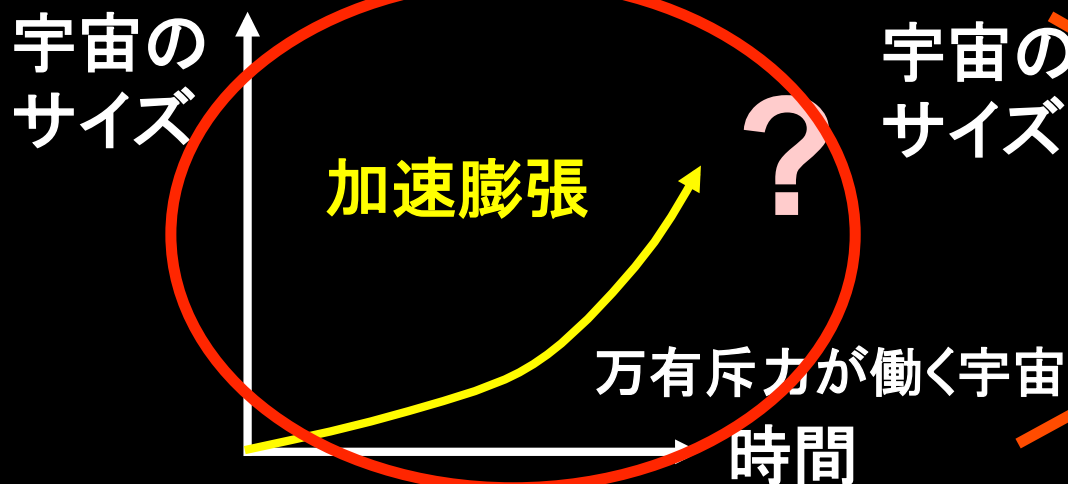
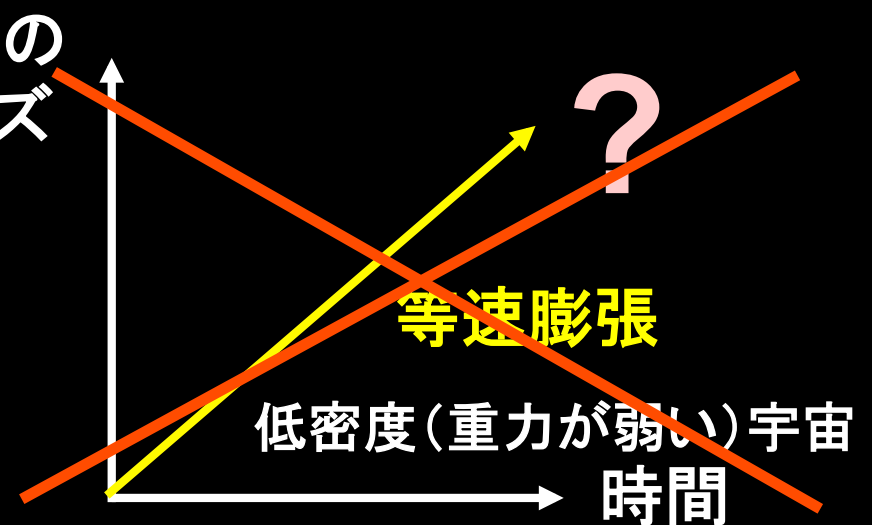
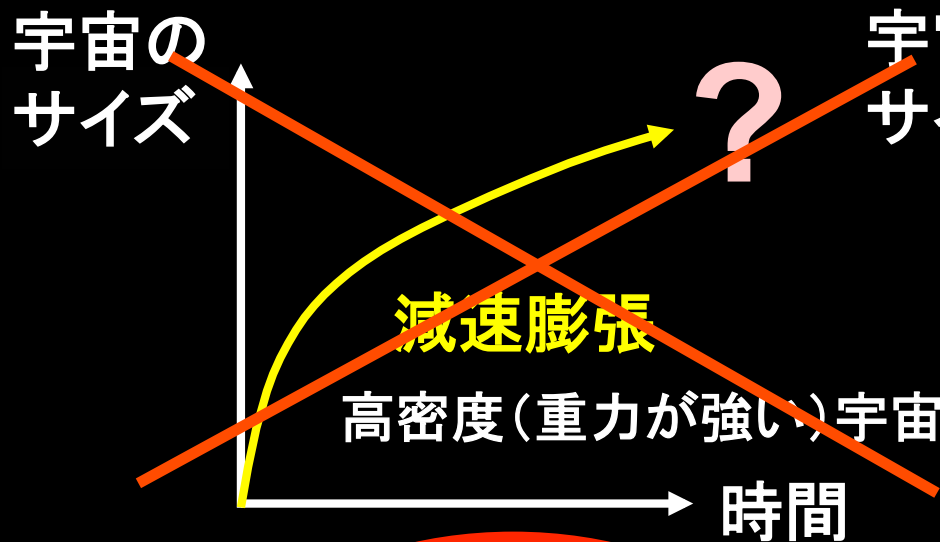
- 圧力も重力源として寄与する
- 負の加速度を説明するには、負の質量あるいは負の圧力を仮定するしかない
  - アインシュタインの宇宙定数:  $p = -\rho$
  - より一般化したのがダークエネルギー:  $p = w\rho$  (定数  $w < -1/3$ )
- あるいはそもそも宇宙論スケールでは一般相対論が正しくないのかも(修正重力理論)⇒小林

# 加速膨張＝ダークエネルギー？

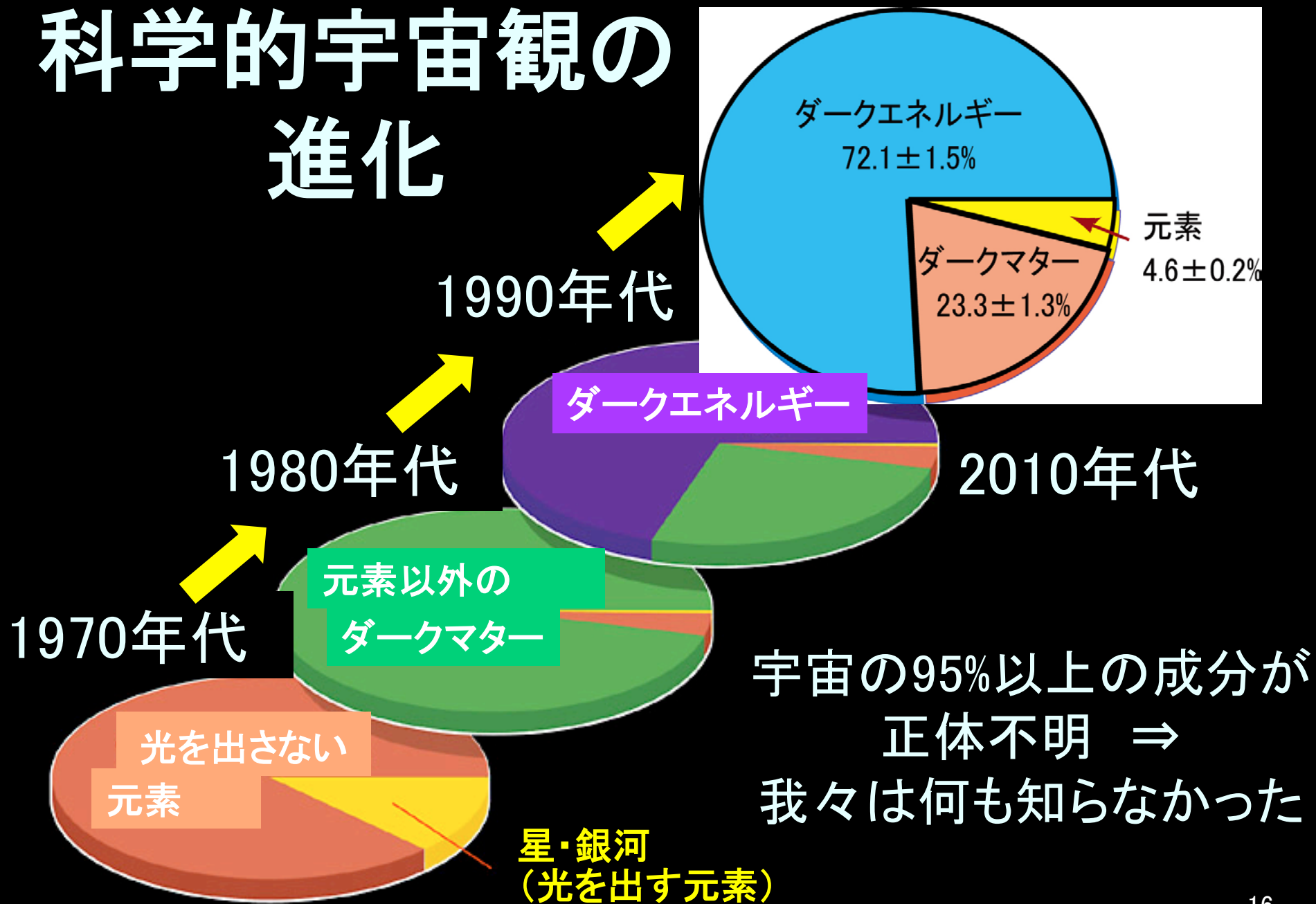
- 宇宙の加速膨張が示唆するもの
  - 法則が正しければダークエネルギー
  - ダークエネルギーが存在しなければ法則が間違い
- ダークマターとは異なり、空間的に局在しているようなものではない
  - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみたしている
- 実効的に「斥力」的な振る舞い
  - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応

# 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



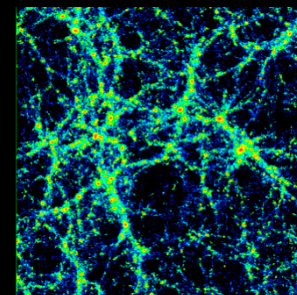
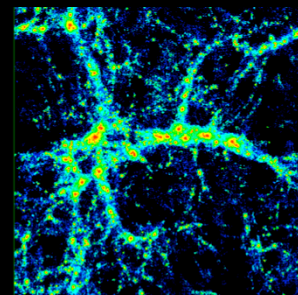
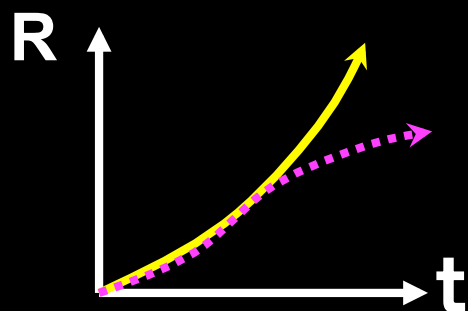
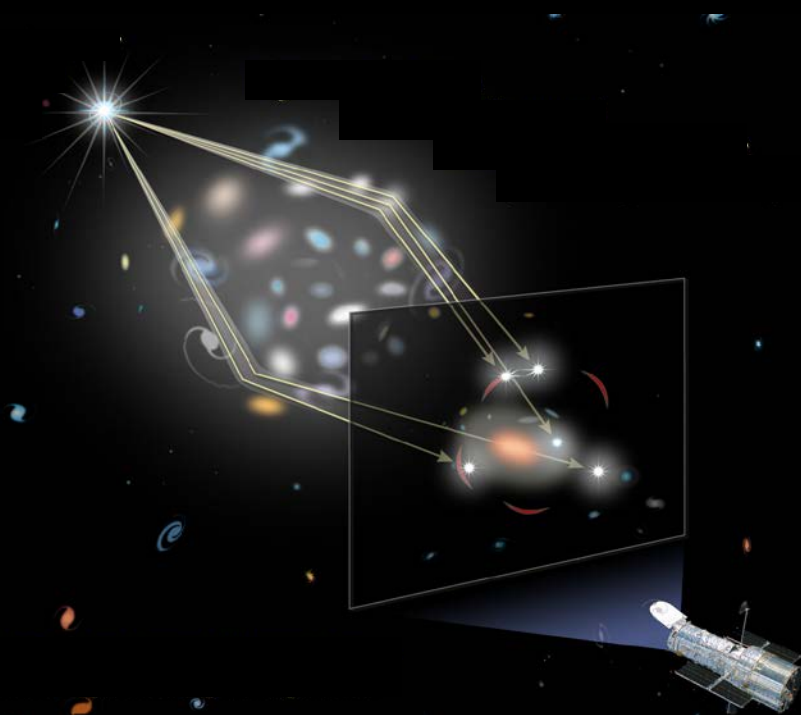
# 科学的宇宙観の進化





# ダークエネルギーの観測的示唆

- 宇宙膨張
- 宇宙の幾何学
- 宇宙の構造進化
- **4つの主な手法**
  - 超新星のハッブル図 ⇒ 土居
  - マイクロ波背景輻射 ⇒ 高田
  - 重力レンズ ⇒ 高田
  - バリオン振動 ⇒ 松原



# International Research Network for Dark Energy (JSPS, core-to-core program 2007-2012)

## DENET

**Princeton U.**  
**Dept. of Astrophys. Sci.**  
**coordinator**  
**Edwin Turner**

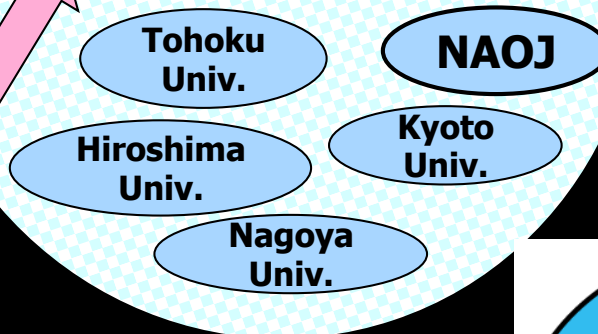
CMB  
Gravitational lens  
Baryon oscillation

**Edinburgh U.**  
**Royal Obs.**  
**coordinator**  
**John Peacock**

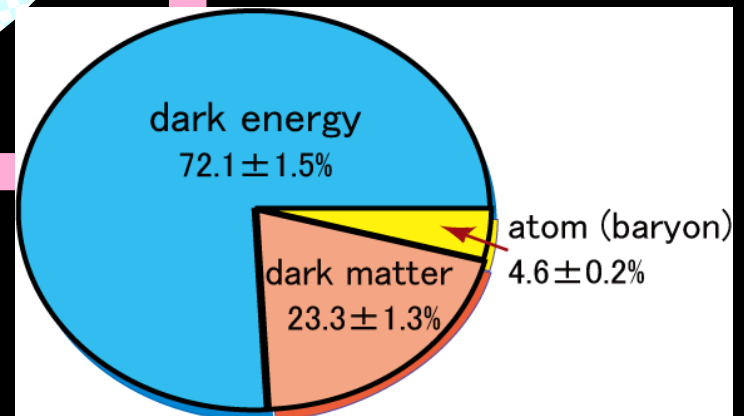
**Univ. of Tokyo**  
**Res. Center for the Early Universe**  
**coordinator**  
**Yasushi Suto**

**Institut d'Astrophysique de Paris**  
**coordinator**  
**Jerome Martin**

Modified gravity  
Extra-dimension  
backreaction



Theoretical model  
Baryon oscillation  
Weak lens mapping

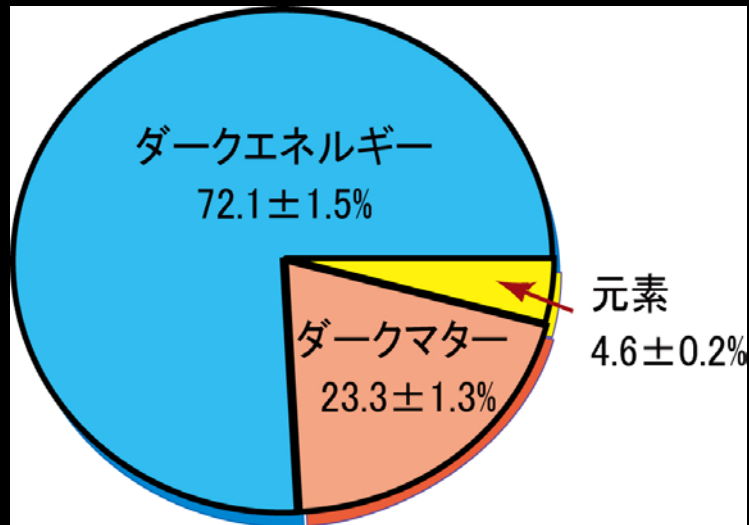


# DENETの成果

(AAPPS Bulletin Vol.20-21, pp.22-24)

- 海外で5つの国際会議を開催
  - 2007 Decrypting the universe – Large Surveys for Cosmology@Edinburgh
  - 2008 Cosmology Near and Far; Science with WFMOS@Hawaii
  - 2009 Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe@Princeton
  - 2010 The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010@Caltech
  - 2011 The Accelerating Universe@IAP
- 国内で5つのサマースクール、5つの国際会議を主催・共催
- すばるを用いたダークエネルギーのための銀河サーベイの国際共同プロジェクトの推進
  - SuMIRe HSC: Hyper Suprime-Cam (PI:宮崎聡)
  - SuMIRe PFS: Prime Focus Spectrograph (PI:村山齊)

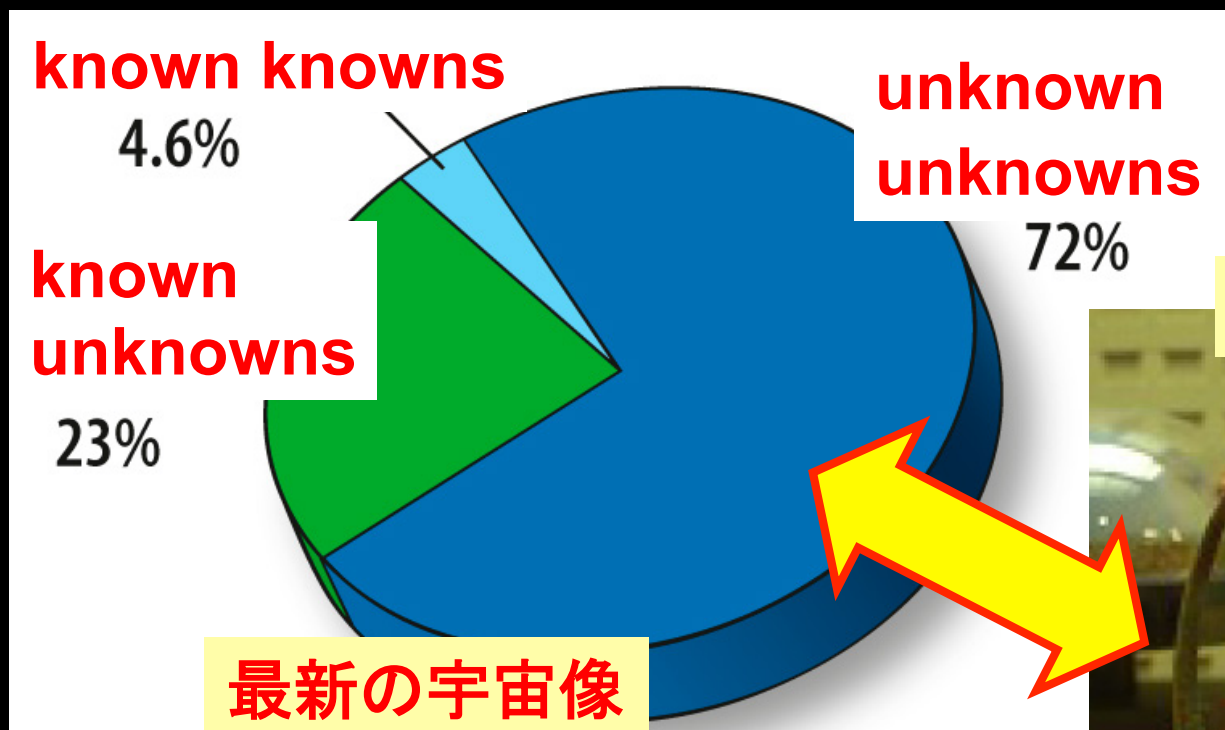
# 20世紀の天文学が見た夜空ノムコウ 「宇宙は何からできているか？」



- 我々の体をはじめ、地上のすべての物質は**元素**から成る
  - しかし宇宙全体を考えると、元素の割合は5%以下
  - 光は出さず重力だけを及ぼす**ダークマター**が約2割
  - 残る7割以上は、宇宙を一様に満たす**ダークエネルギー**
- 
- 目に見えない ≠ 存在しない
  - 宇宙は目に見えない存在に支配されている？



# 我々は何も知らなかった (アイザック・アシモフ 『夜来たる』)



最新の宇宙像

古代インドの宇宙象



- どちらが優れているのかは自明ではない
- 「皆様の目は節穴でございますか？」(謎解きはDENETの後で)

# 宇宙線・宇宙物理領域、素粒子論領域合同シンポジウム（世話人：早田次郎）

## “加速膨張を続ける宇宙論”

- 13:30-13:50 宇宙の加速膨張とは
- 13:50-14:35 超新星観測によるダークエネルギー研究（土居守）
- 14:35-15:20 ダークエネルギーか修正重力理論か（小林努）
- 15:30-16:15 バリオン音響振動で探るダークエネルギー（松原隆彦）
- 16:15-17:00 すばるSuMIReプロジェクトで探るダークエネルギー（高田昌広）