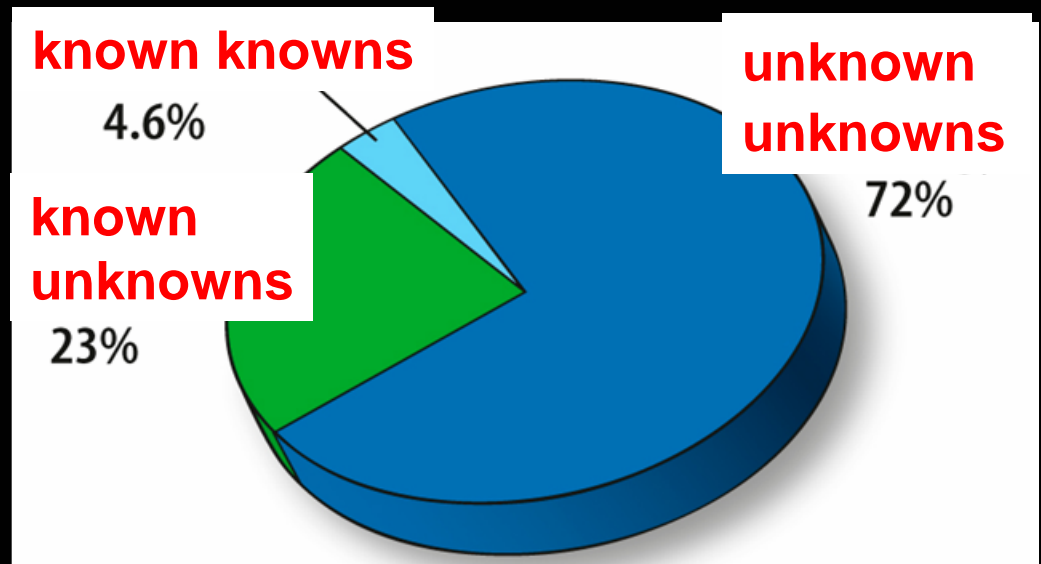


観測的宇宙論の展望



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤靖

理論天文学懇談会シンポジウム

15:15-15:55 2011年11月6日@国立天文台

宇宙論の研究年表

1916	一般相対論	アインシュタイン
1917	宇宙定数の導入と静的宇宙モデル	アインシュタイン
1922	膨張宇宙の一般解の発見	フリードマン
1929	宇宙膨張(ハッブルの法則)の発見	ハッブル
1931	宇宙定数導入の撤回	アインシュタイン
1948	ビッグバン宇宙モデルと元素合成理論	アルファー・ベータ・ガモフ
1950	宇宙初期における陽子・中性子比の導出	林忠四郎
1965	宇宙マイクロ波背景輻射の発見	ペンジアス・ウィルソン
1967	銀河の2点相関関数の巾法則の発見	東辻浩夫・木原太郎
1975	世界初の大構造形成数値シミュレーション	三好和憲・木原太郎
1980	CfA銀河サーベイによる宇宙の大構造の発見	ゲラー・ハクラ
1981	インフレーション宇宙モデル	佐藤勝彦、グース
1985	冷たい暗黒物質による構造形成標準モデル確立	デビス・エフスタチュウ・フレンク・ホワイト
1992	COBE衛星による宇宙マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見	マーサー、スムート
1998	Ia型超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見	超新星宇宙論グループ他
2003	SDSSによる銀河・クエーサーカタログ初期成果の発表	SDSS グループ(日本人メンバー13名)
2003	WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度地図の精密測定	WMAPチーム(日本人メンバー 小松英一郎)

観測的宇宙論の発見年表

1929	宇宙膨張(ハッブルの法則)の発見	ハッブル
1965	宇宙マイクロ波背景輻射の発見	ペンジアス・ウィルソン
1967	銀河の2点相関関数の巾法則の発見	東辻浩夫・木原太郎
1975	世界初の大構造形成数値シミュレーション	三好和憲・木原太郎
1980	CfA銀河サーベイによる宇宙の大構造の発見	ゲラー・ハクラ
1985	冷たい暗黒物質構造形成標準モデル確立	デイビス・エフスタチウ・フレンク・ホワイト
1992	宇宙マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見	マーサー、スムート
1998	Ia型超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見	超新星宇宙論グループ他
2003	SDSSによる銀河・クエーサーカタログ初期成果の発表	SDSS グループ(日本人メンバー13名)
2003	WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度地図の精密測定	WMAPチーム (日本人メンバー 小松英一郎)

1978 Nobel Prize in Physics

- Arno Penzias and Robert Wilson
- For the discovery of cosmic microwave background radiation



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

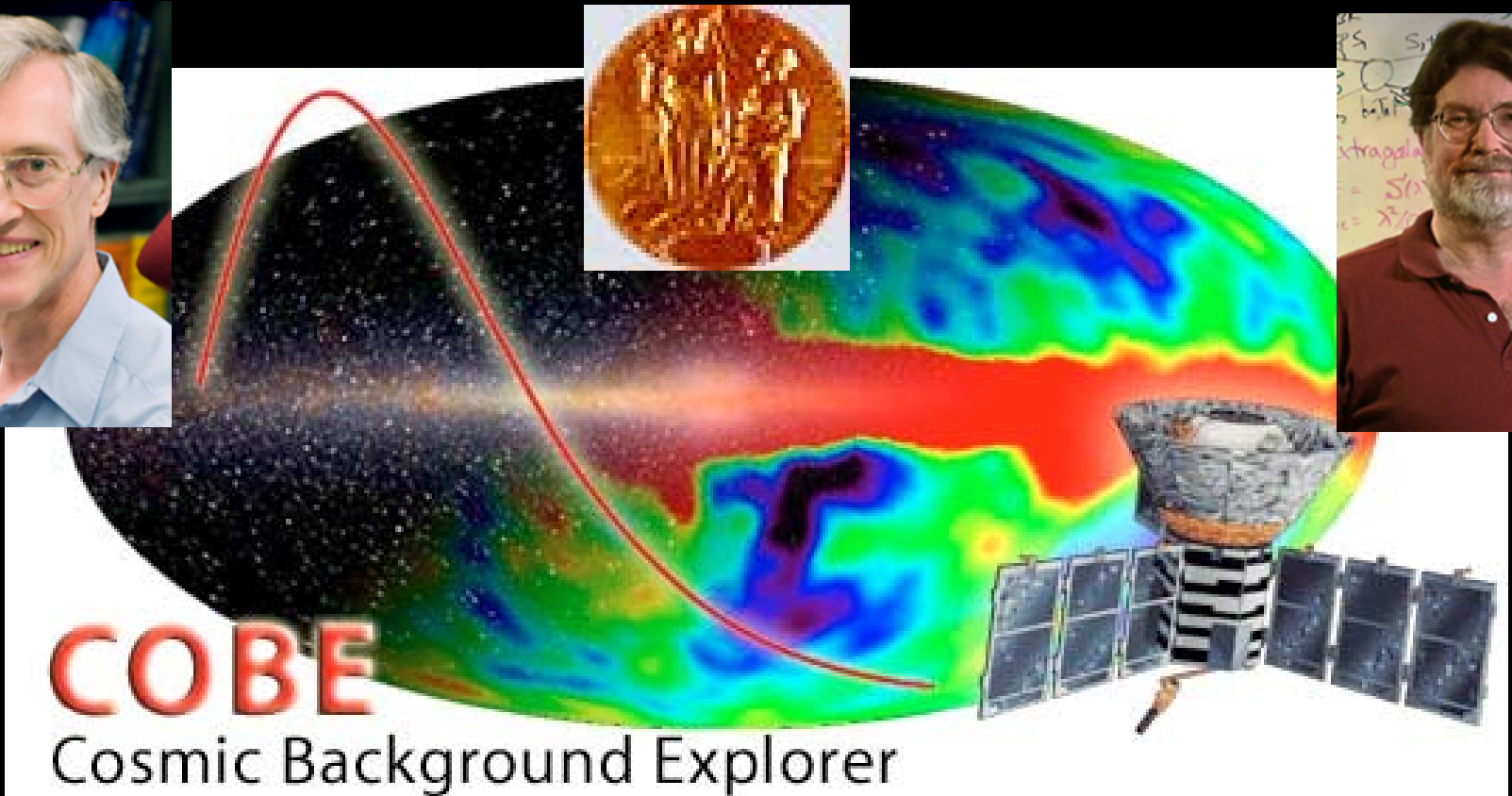
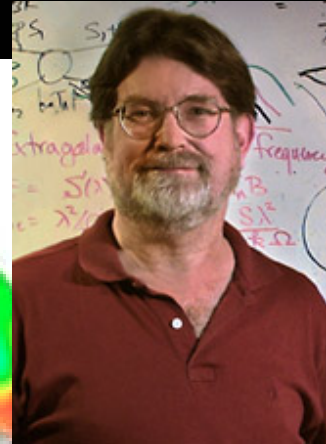
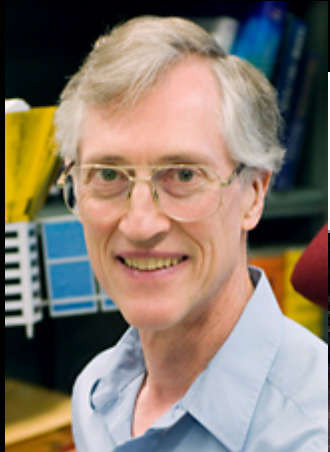
A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

The Astrophysical Journal 142(1965)419

2006 Nobel Prize in Physics



- John Mather and George Smoot

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



ハッブルの法則か、ルメートルの法則か？

- 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(この事実の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
 - これは単なるミスではあり得ないが、誰が何のためにやったのかは不明

英訳版では削除されている箇所 (1)

- 55 -

période de la lumière reçue et δt_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

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

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.

- 56 -

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),

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

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_E (19), il vient :

$$y = 0,0465.$$

On a alors :

$$R = R_E \sqrt{y} = 0,215 R_E = 1,83 \times 10^{23} \text{ cm.} = 6 \times 10^9 \text{ parsecs}$$

$$R_0 = R y = R_E y^2 = 8,5 \times 10^{26} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^8 \text{ parsecs}$$

$$= 9 \times 10^8 \text{ années de lumière.}$$

(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 $1,16 \times 10^6$ 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 relativiste 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 ⁽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^c 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 ⁽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⁾.

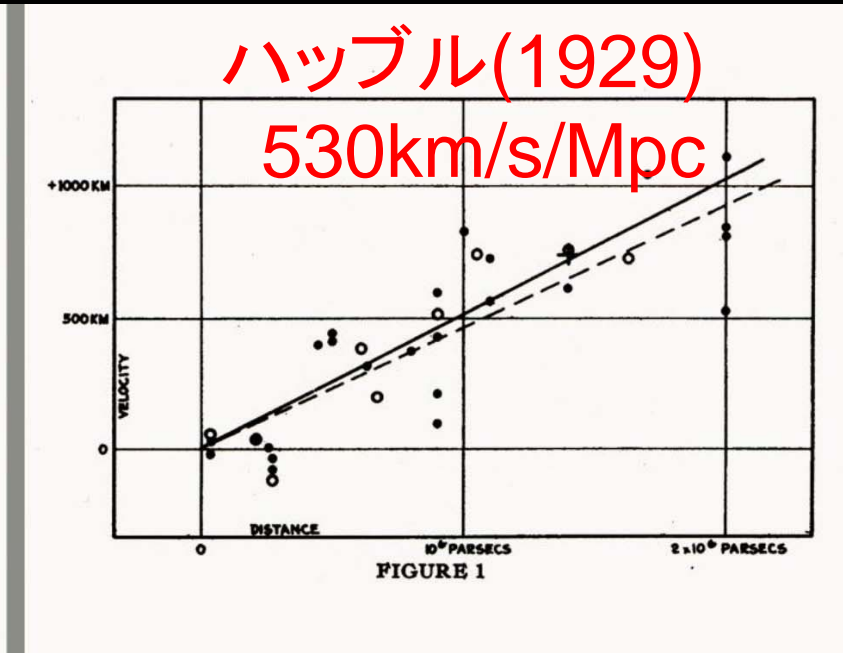
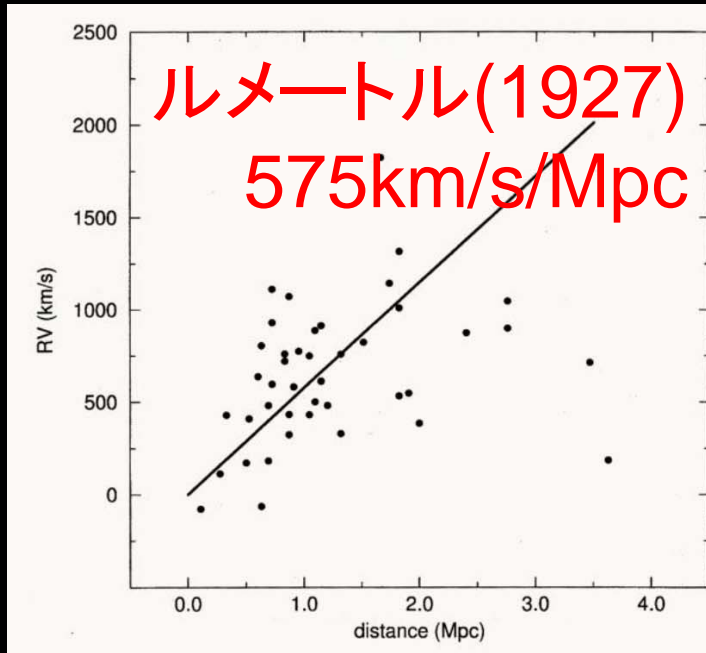
Nous adopterons donc

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

(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 $1,16 \times 10^6$ 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

最近20年間の観測的進展

- ダークマターの存在の確立
- 超新星1987Aからのニュートリノの検出
 - ニュートリノ天文学
- 太陽系外惑星の発見
- ガンマ線バーストの宇宙論的天体説の確定
- 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見
 - ダークエネルギーの存在／一般相対論の限界？
- 広域銀河3次元地図作成と遠方銀河の地平線拡大
 - スローンサーベイ、ハッブル望遠鏡、すばる望遠鏡
- 宇宙マイクロ波背景輻射による精密宇宙論
 - 標準ダークマターモデル(インフレーションによるゆらぎ、冷たいダークマター、ダークエネルギー)

残された課題と謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
 - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
 - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
 - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
 - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
 - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見・起源・進化**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
 - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性

(天文学)研究スタイルの必然的進化: 太陽系外惑星探査を例として

今はどの時期なのかを見極めることが本質

ブレイク
スルー

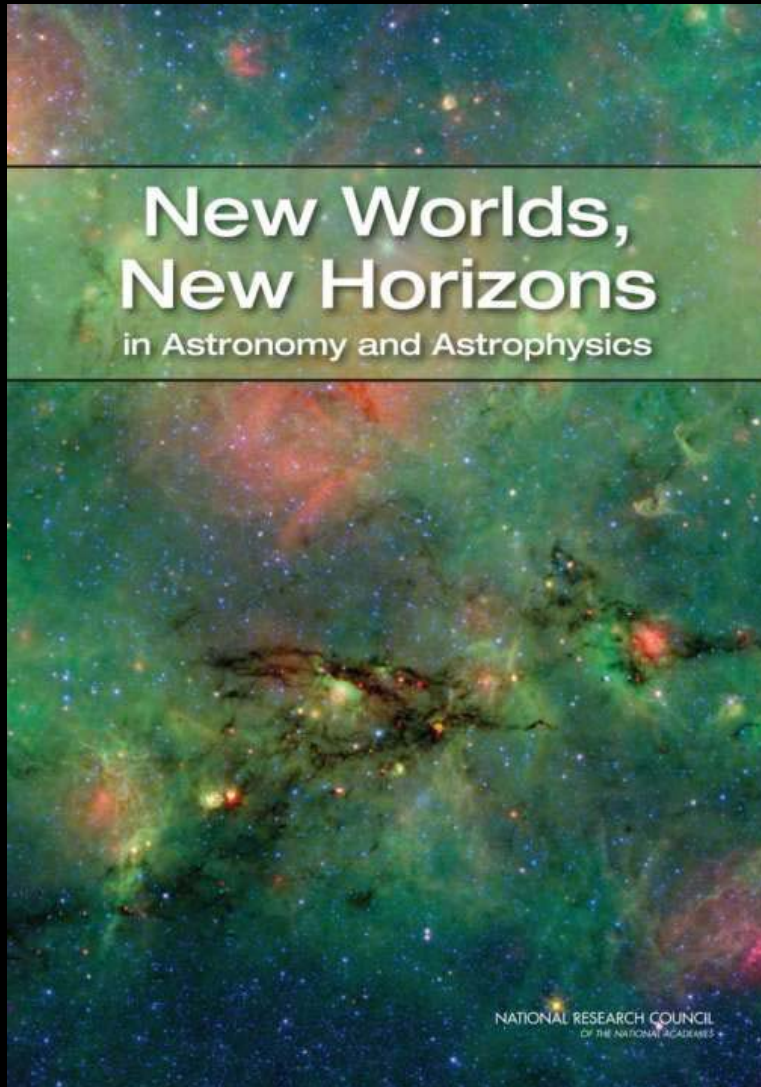
1995年
系外惑星発見

2009年
系外惑星専用
衛星Kepler
打ち上げ

20XX年
ハビタブル惑星
発見???

	地上からの系外 惑星探査	スペースからの 系外惑星探査	系外惑星上の生命 探査
紀元前 ~1995年	山師、先駆者 ハイリスク ・ノーリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン	論外: 危ない人々、十分 成功して失うもの がない人
1995年 ~2009年	ゴールドラッシュ ハイリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン
2009年 ~ 20xx年	定着 ローリスク ・ハイリターン	実現 ローリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン
20xx年~	統計を稼ぐ ローリスク ・ローリターン	定着 ローリスク ・ローリターン	実現? ローリスク ・ハイリターン?

Astro2010: decadal survey



- *Cosmic Dawn*
- *New Worlds*
- *Physics of the Universe*

August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

The Science Frontier:

discovery areas

and principal questions (1)

■ Discovery areas

- Identification and characterization of nearby habitable exoplanets 第二の地球
- Gravitational wave astronomy 重力波天文学
- Time-domain astronomy 突発・激変天体
近地球接近天体
- Astrometry 銀河系・宇宙の精密測量
- The epoch of reionization 宇宙の再電離

The Science Frontier: discovery areas and **principal questions (2)**

■ **Questions:**

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

The Science Frontier: discovery areas and **principal questions (3)**

■ **Questions:**

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

Dark matter and dark energy: 21st century clouds over the universe?



http://www.physics.gla.ac.uk/Physics3/Kelvin_online/clouds.htm

- Lord Kelvin @ Royal society on April 27, 1900
 - beauty and clearness of theory was overshadowed by two clouds
- Dark matter and dark energy in the 21st century
 - Two dark clouds in astronomy? → No !
 - Two probes of new physics? → Yes (hopefully)

アメリカを代表するかつての哲学者かつ詩人： ドナルド・ラムズフェルド第21代国防長官



The Unknown

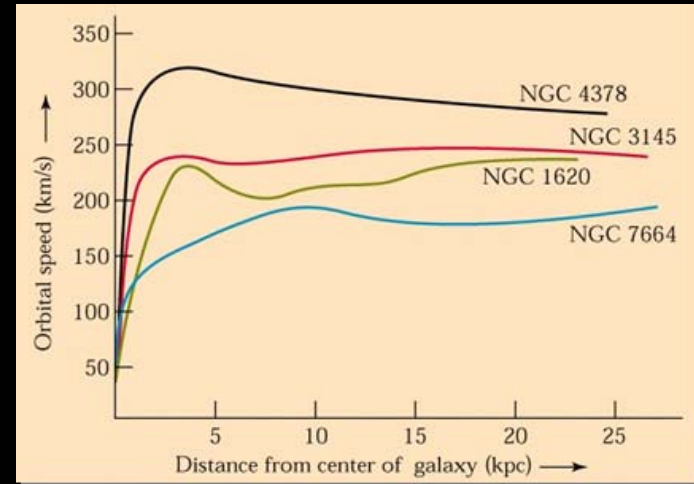
As we know,
There are **known knows.**
There are things we know we
know.
We also know
There are **known unknowns.**
That is to say
We know there are some things
We do not know.
But there are also **unknown un-**
knowns,
The ones we don't know
We don't know.

—Feb. 12, 2002, Department of
Defense news briefing

2003年『やさしい英語普及運動』から、『関係代名詞や従属節を多用し、なおかつ
接続詞の乱用による長いセンテンスを使用した、わかりにくい英語の演説、発言』
をすることを顕彰して『フット・イン・マウス(意味不明な迷言)賞』受賞

Observational signatures of dark matter

- Flat rotation curves of galaxies
- Multiple images of quasars due to gravitational lensing

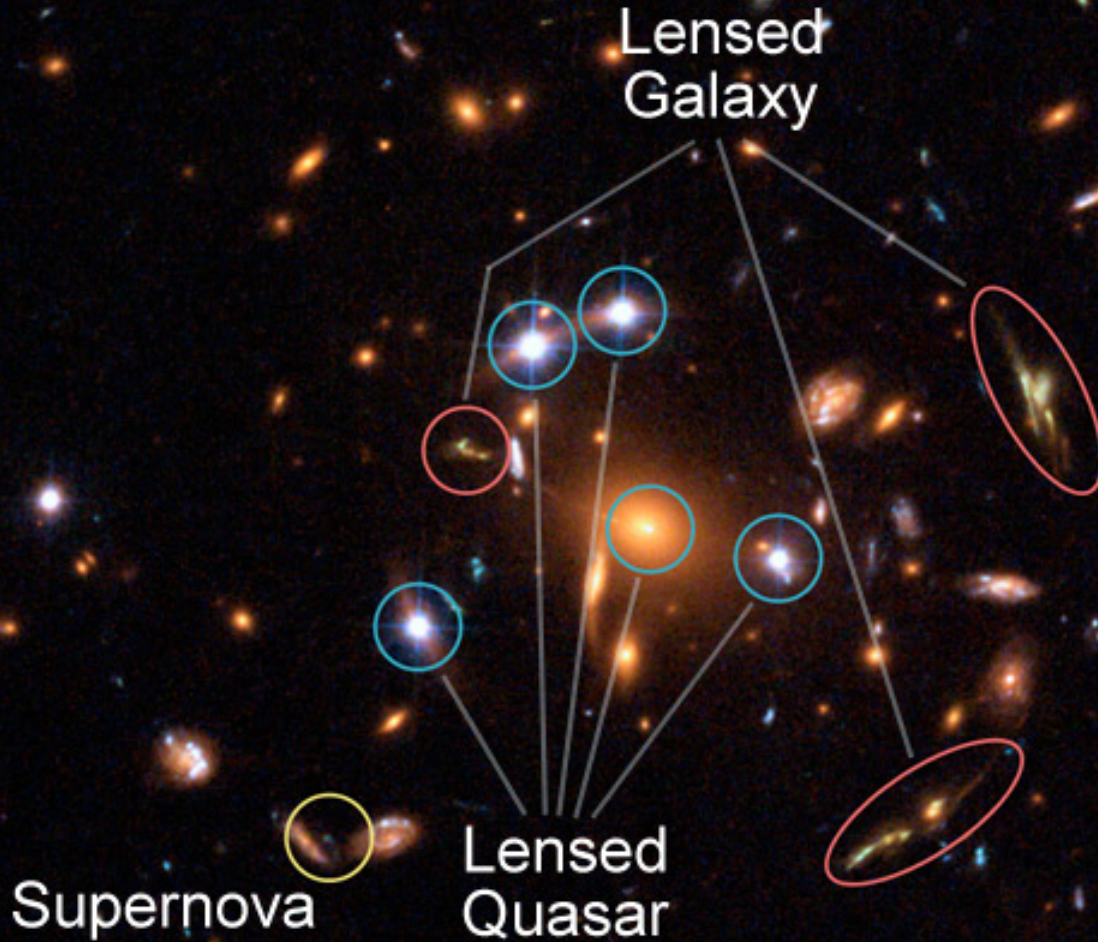


- Bullet clusters



Galaxy Cluster SDSS J1004+4112
HST ACS/WFC

Gravitational lens
SDSS J1004+4112



10''

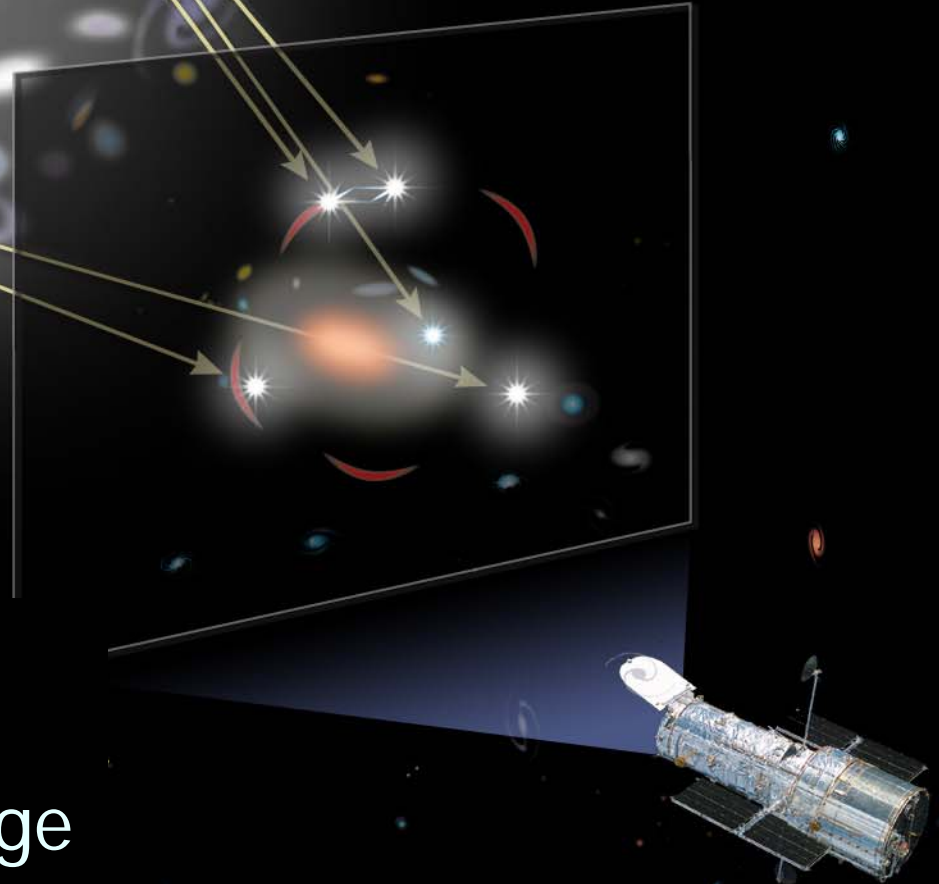
Light emitted from
quasar bends around
intervening galaxy cluster,
producing lensed images*

QSO at 10 billion
light years away

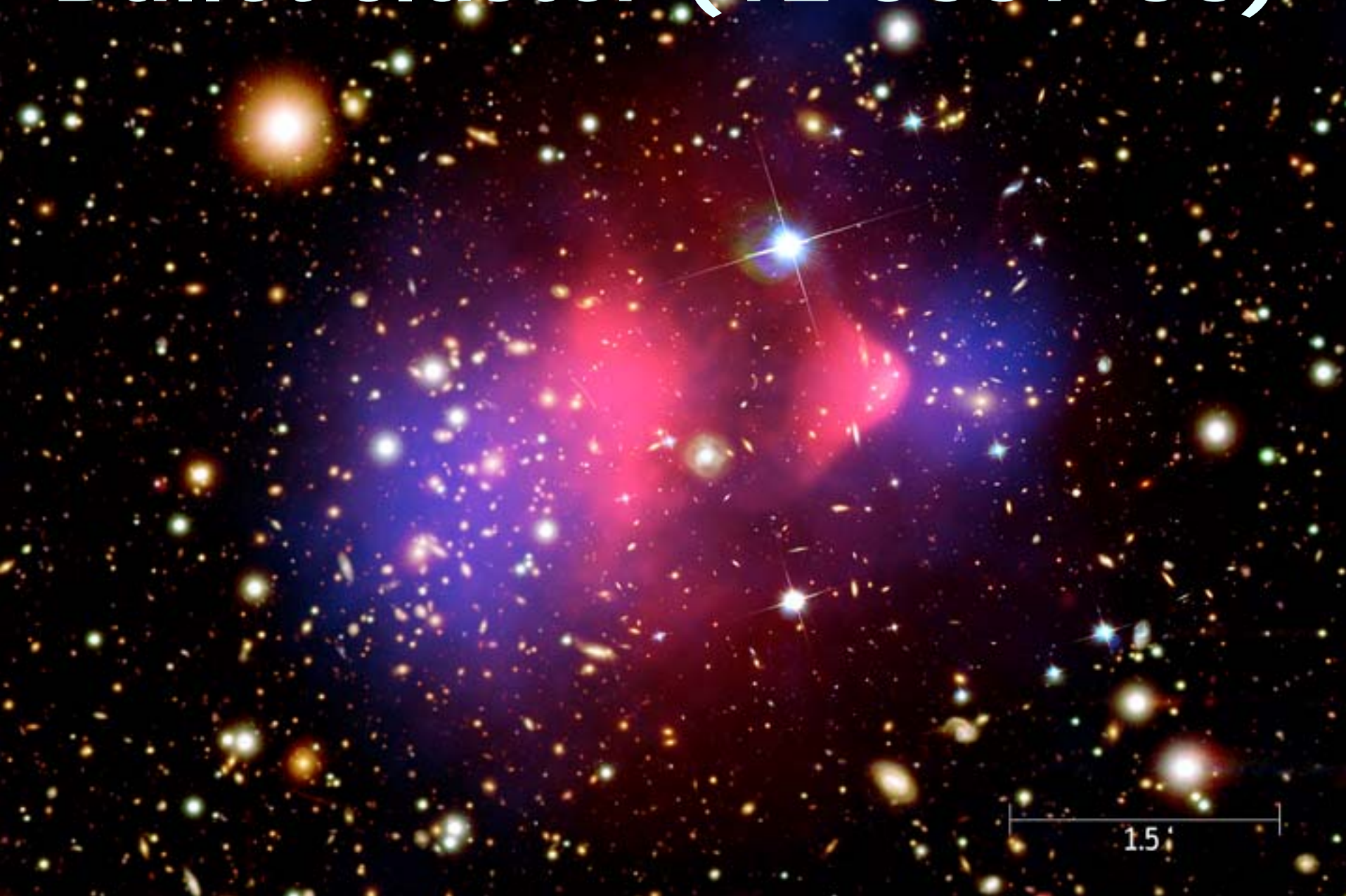
Galaxy cluster at 6 billion light
years away



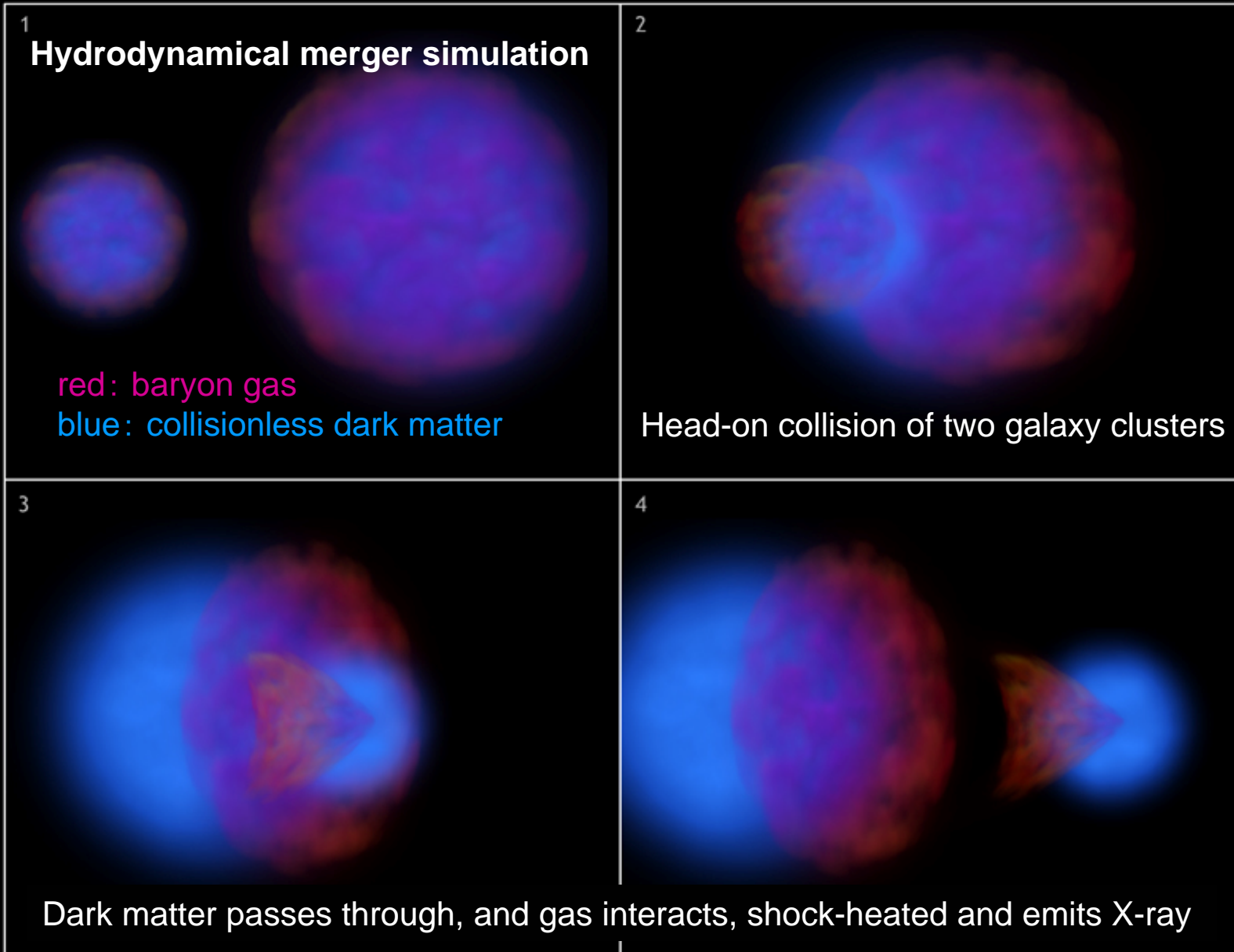
Gravitational lens
SDSS J1004+4112 :
general relativistic mirage



Bullet cluster (1E 0657-56)



Implies *collisionless* dark matter



Dark matter: from astronomy to physics

- **Astronomical observations** unambiguously proved the existence of dark matter
 - *Astronomy does not require any specific form of Lagrangian of dark matter particles*
 - ***From unknown unknowns to known unknowns***
- On-going/up-coming **physics experiments** will identify the elementary particle responsible for dark matter in the universe
 - *Particle physics will specify the Lagrangian*
 - ***From known unknowns to known knowns***

Are there any unknown unknowns that distribute homogeneously in the universe ?

- Objects are usually identified only through differential measurements
 - Visible matter: contrast between dark and bright regions
 - Dark matter: spatial clustering dynamically and gravitationally traced by visible stars, galaxies and quasars
- Is it possible to identify the existence of a homogeneously distributed component ?
 - differential measurements in time domain (cosmic acceleration, structure growth)

Expanding the expanding universe

- *Expand* the “size” of the universe

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

- current size:

$a(t_0)$ \Leftrightarrow the value itself has no physical meaning

- current expansion rate: the Hubble constant

$$H_0 \equiv \left. \frac{da/dt}{a} \right|_{t_0} \quad \Leftrightarrow \text{unpredictable: basically determined by the initial condition (can be either negative or positive)}$$

- current acceleration rate: the deceleration parameter

$$q_0 \equiv - \left. \frac{a d^2a/dt^2}{(da/dt)^2} \right|_{t_0} \quad \Leftrightarrow \text{related to the cosmic energy density via the Einstein eq. (should be positive)}$$

Universe *should not* be accelerated !

■ Newton's inverse square law

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

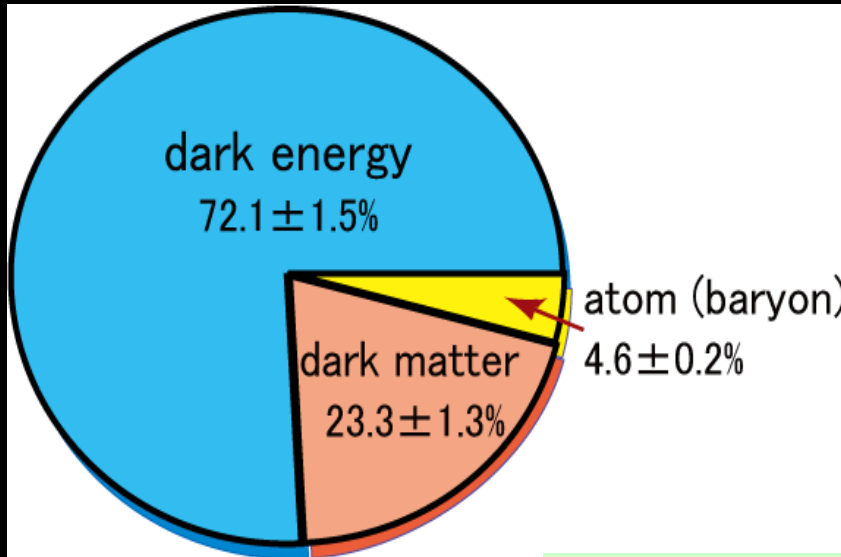
■ Einstein's general relativity

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

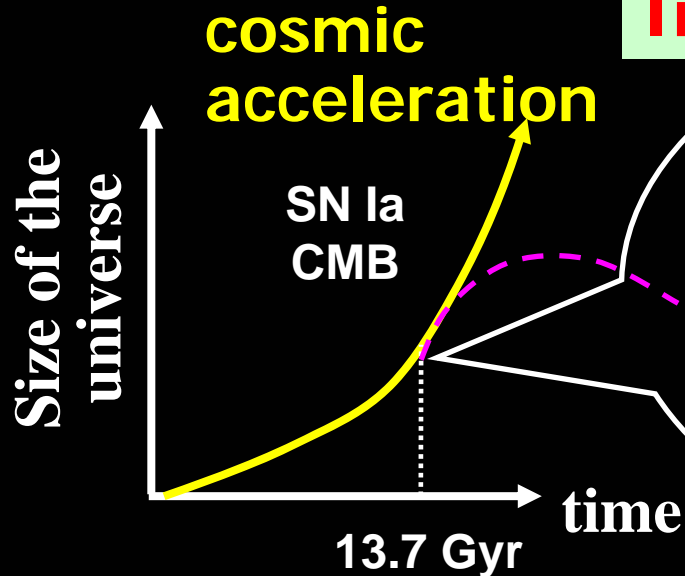
- Pressure contributes to gravity
- Negative pressure required for acceleration
 - Cosmological constant: $p_{DE} = -\rho_{DE}$
 - More generally, dark energy: $p_{DE} = w \rho_{DE}$ with $w < -1/3$

■ General relativity is inaccurate at cosmological scales ? (modified gravity theories)

Cosmic acceleration vs. dark energy

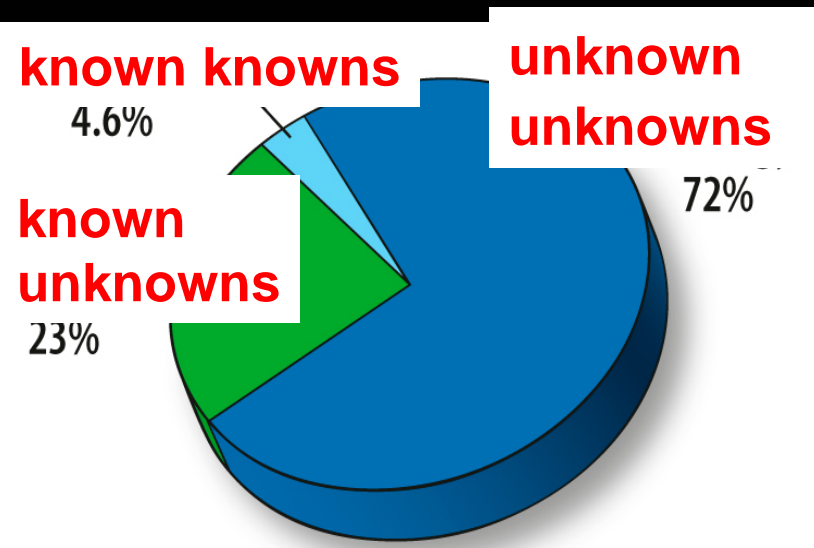


Implies something unknown !



Universal repulsion?
Cosmological constant?
Dark energy?
Modified gravity?

Composition of the universe



atom
(baryons)

■ ordinary matter makes up merely 5 percent

dark matter

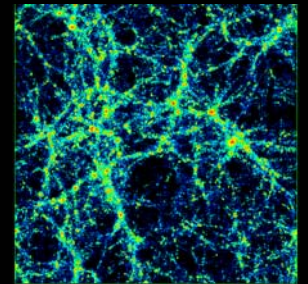
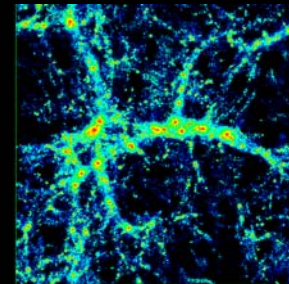
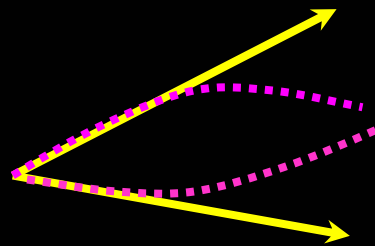
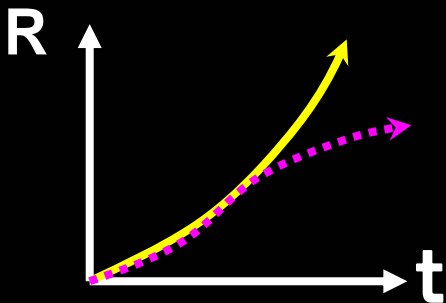
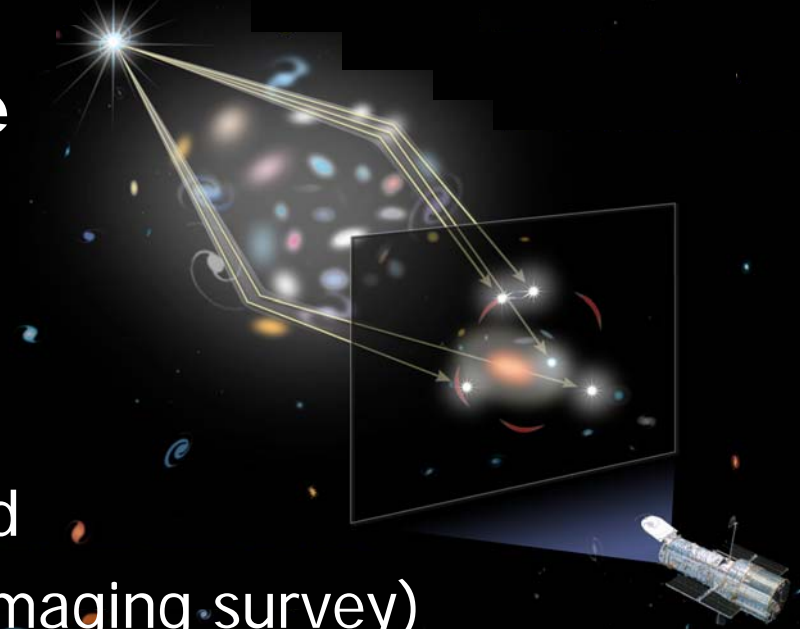
■ galaxies and clusters are surrounded by invisible mass an order-of-magnitude more massive than their visible part

dark energy

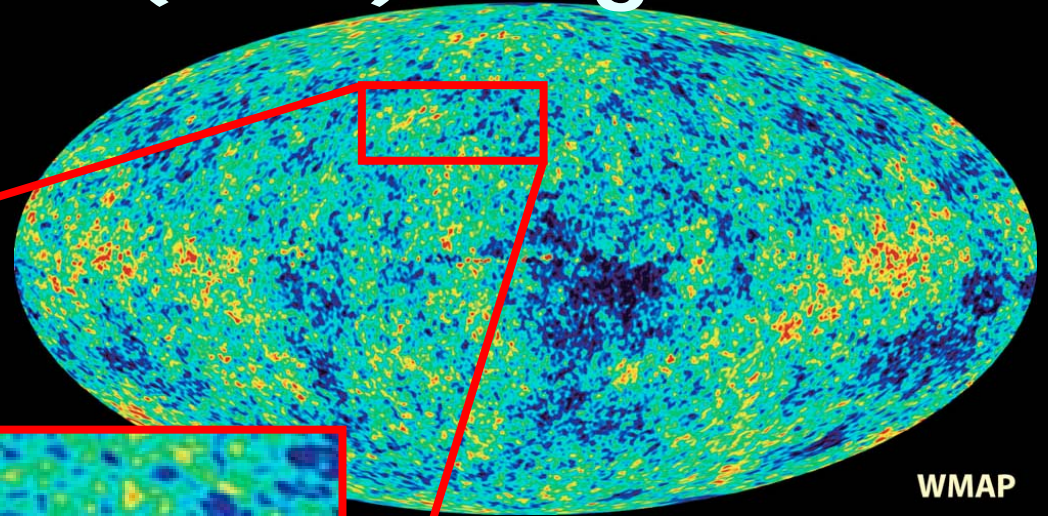
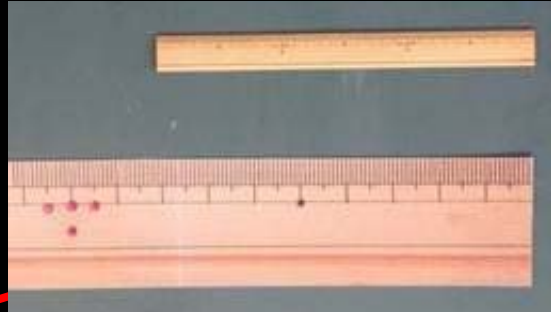
- even more exotic component !
- homogeneously fills the universe (unclustered component)
- repulsive force (negative pressure; $P = -\rho$?)
- Einstein's cosmological constant ?
- or just an illusion ...

Observational signatures of dark energy

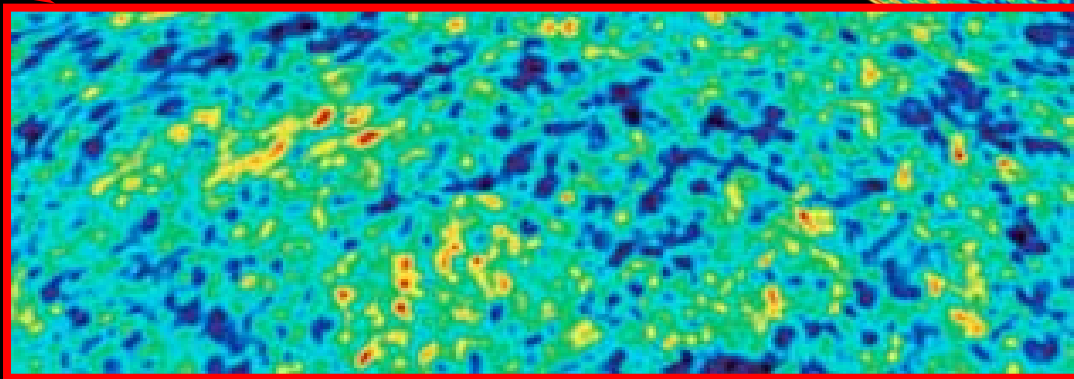
- cosmic acceleration
- geometry of the universe
- evolution of structure
- **4 major probes**
 - Supernova Hubble diagram
 - Cosmic Microwave Background
 - Gravitational lensing (galaxy imaging survey)
 - *Baryon Acoustic Oscillation (galaxy redshift survey)*



Standard ruler: baryon acoustic oscillation (BAO) length



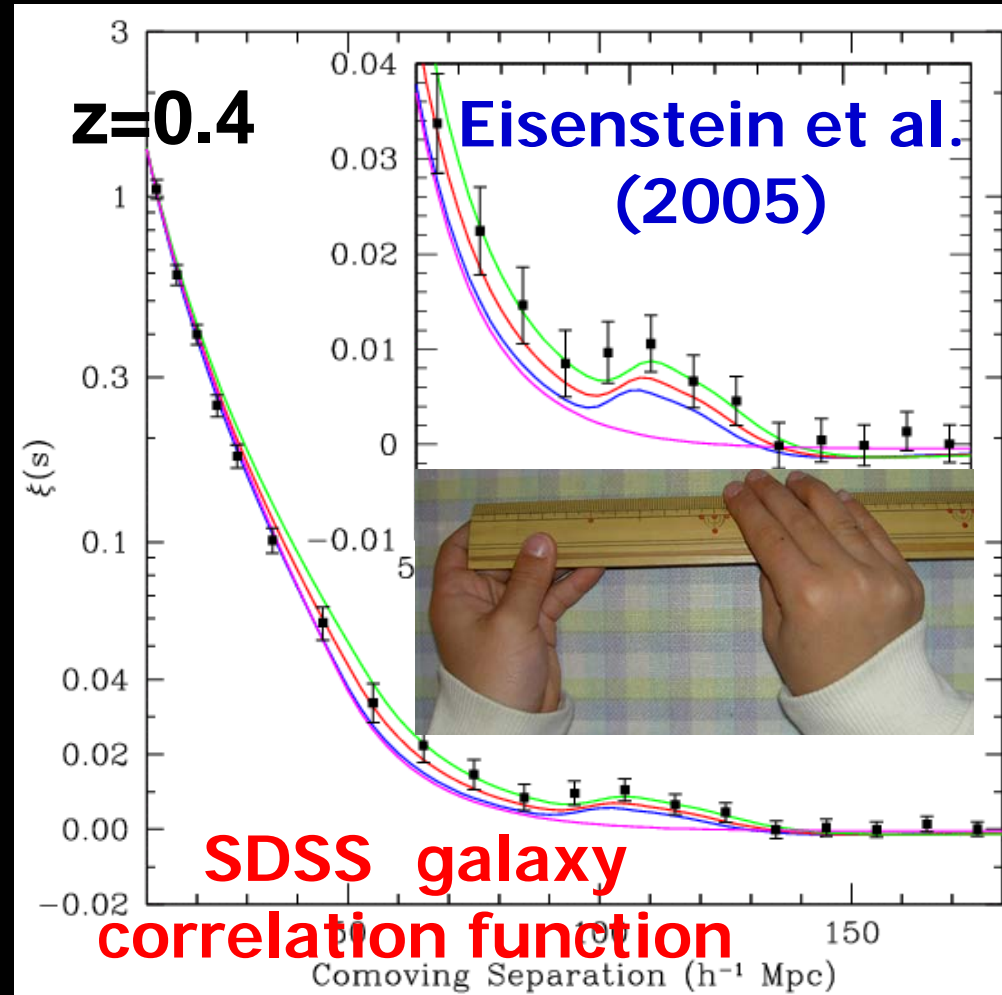
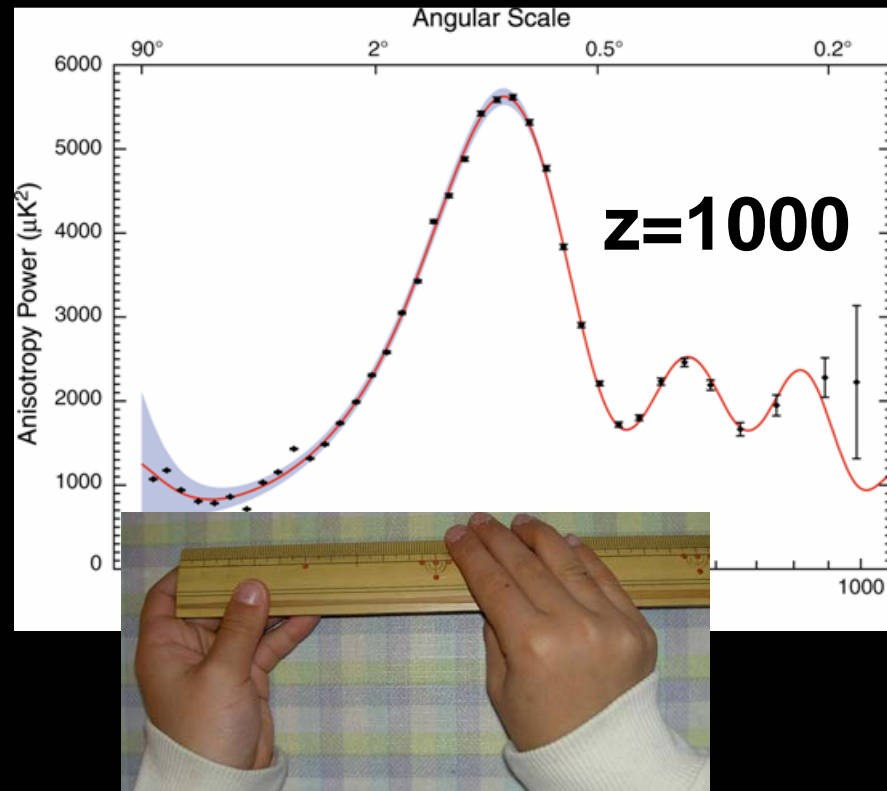
WMAP



- Sound horizon length at recombination ($\doteq c_s \times 0.37 \text{ Myr}$)
 - $r_s = 147 (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25} (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08} \text{ Mpc}$
- Estimate the distance to the CMB last-scattering surface using the above as a standard ruler

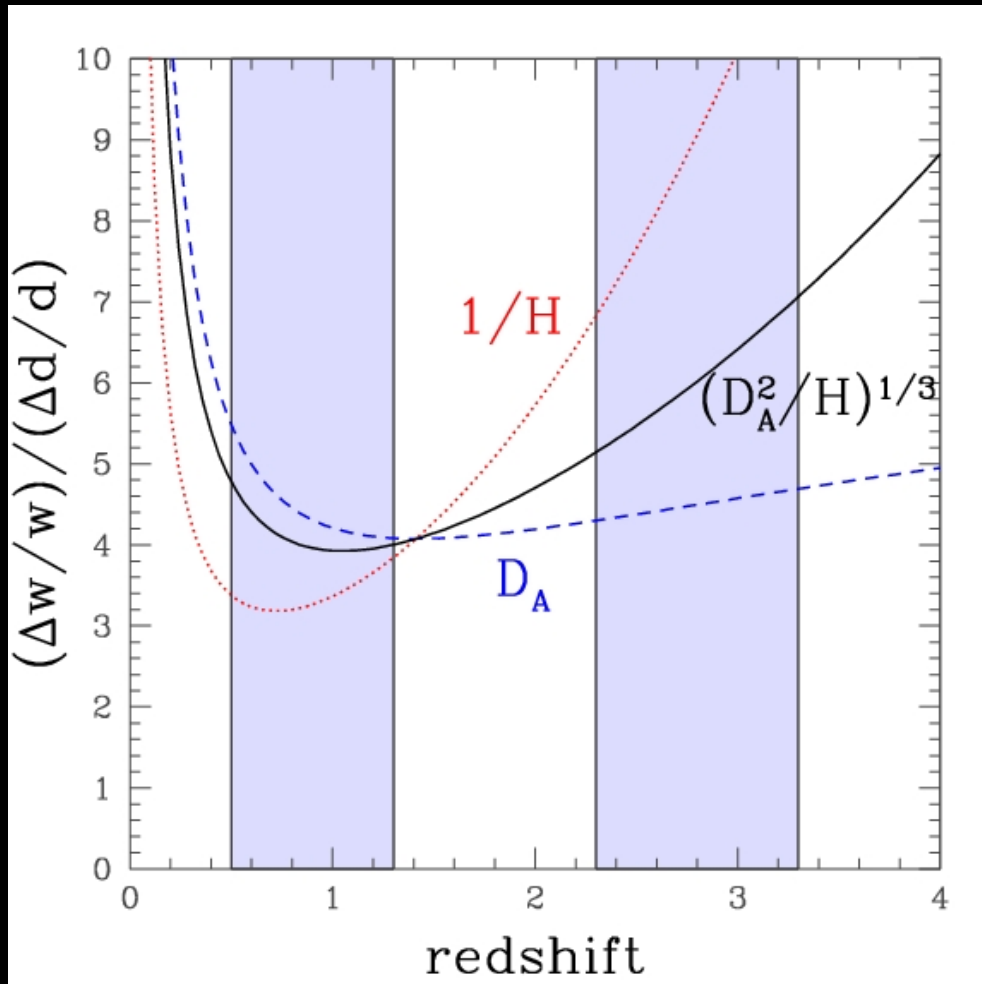
Acoustic oscillations detected

CMB photons
WMAP 3yr
(Spergel et al. 2007)



$$r_s = 147 \left(0.13 / \Omega_m h^2 \right)^{0.25} \left(0.024 / \Omega_b h^2 \right)^{0.08} \text{ Mpc}$$

Required accuracy of the BAO scale measurement to constrain w

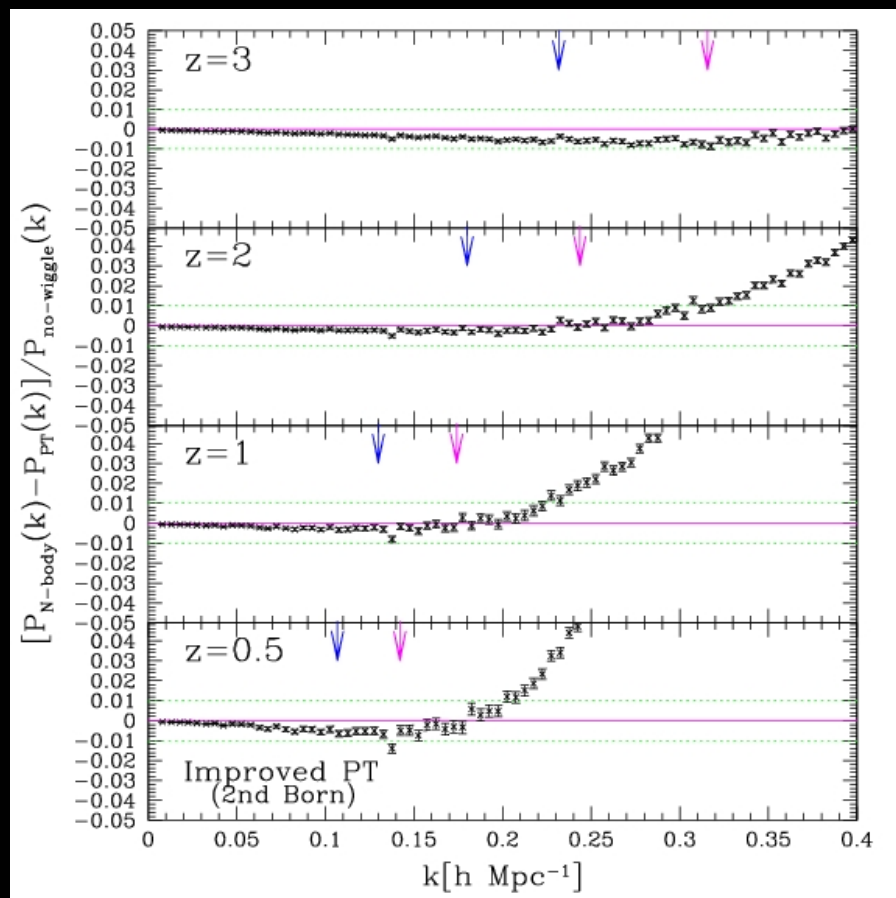
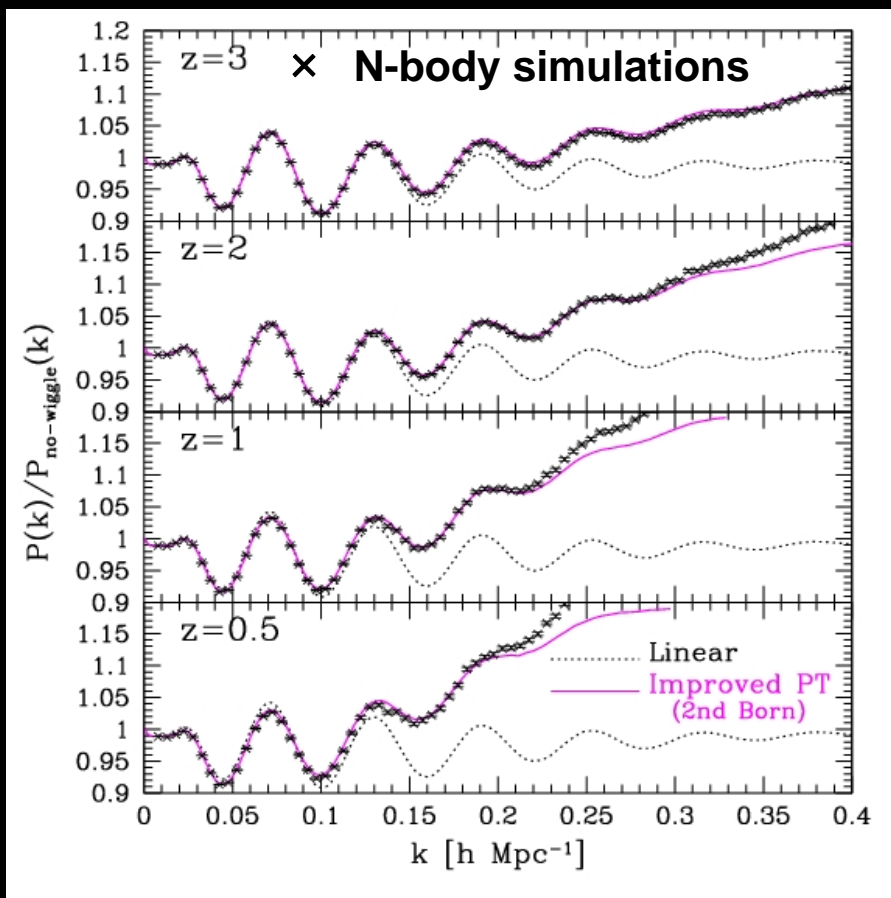


- 3% accuracy of w requires to determine BAO scale at $z=1$ within $<1\%$
- \Rightarrow ***Needs bigger surveys of galaxies***

Nishimichi et al. (2007)

Sub-percent level accuracy is demanding even for theoretical templates

- Best analytic model of nonlinear gravitational evolution: Taruya et al. (2009, 2010, 2011)



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

Tohoku
Univ.

NAOJ

Hiroshima
Univ.

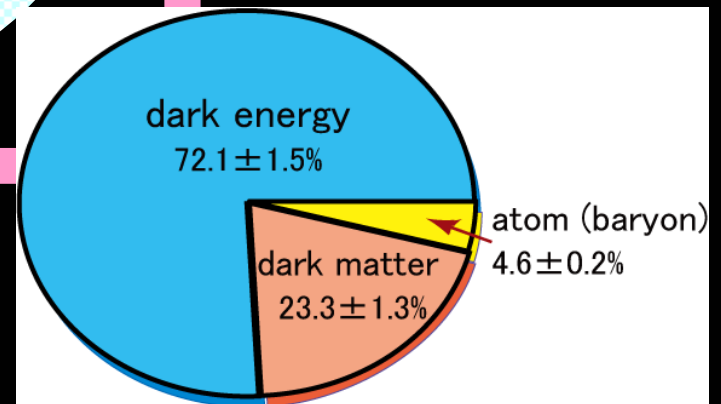
Kyoto
Univ.

Nagoya
Univ.

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

Modified gravity
Extra-dimension
backreaction

Theoretical model
Baryon oscillation
Weak lens mapping



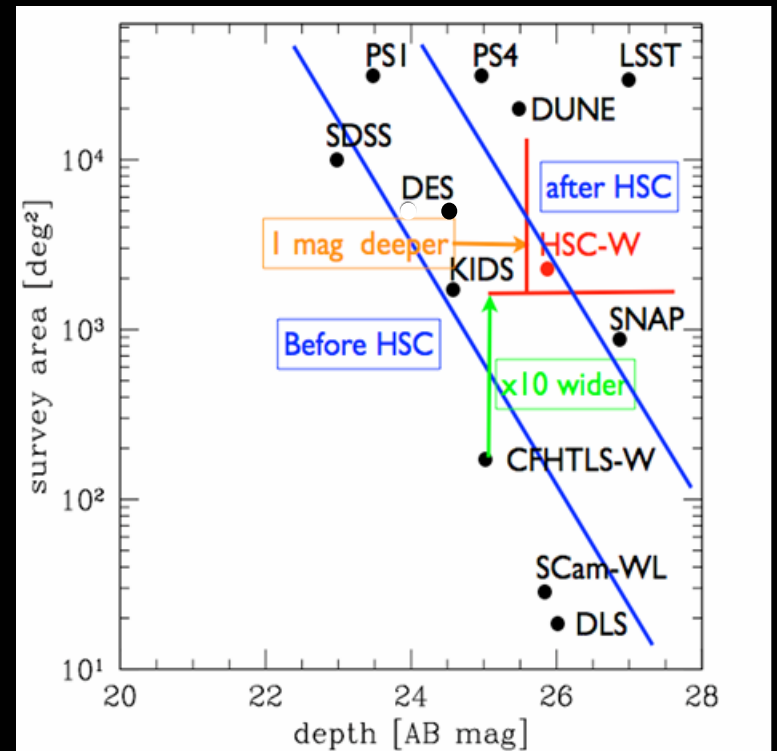
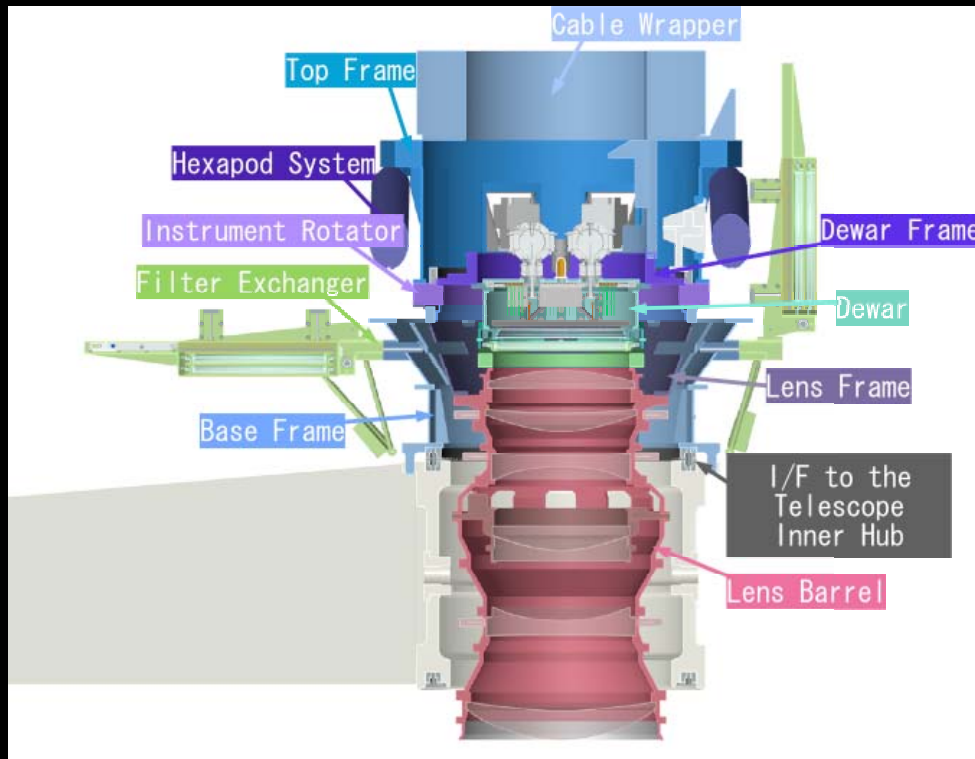
Galaxy survey project: SuMIRe

Subaru **M**easurement of **I**maging and **R**edshift of the universe

- **PI: Hitoshi Murayama** (director of IPMU, U. of Tokyo)
 - Japanese Institutes in charge: IPMU, The University of Tokyo, NAOJ, , ,
- **Imaging survey with HSC** (Hyper-Suprime Cam)
 - Japan + Princeton + ASIAA (Taiwan)
- **Spectroscopic survey with PFS** (Prime Focus Spectrograph)
 - Japan + US, Taiwan, France, Brazil, , ,

HSC: Hyper-Suprime Cam

- **Japan+Princeton+ASIAA (2012-2016)**
 - Imaging galaxy survey (1.5deg FOV) g,r,i,z,Y
 - 200 nights for 1500 deg² wide survey for weak lensing
 - 100 nights for deep surveys of galaxies

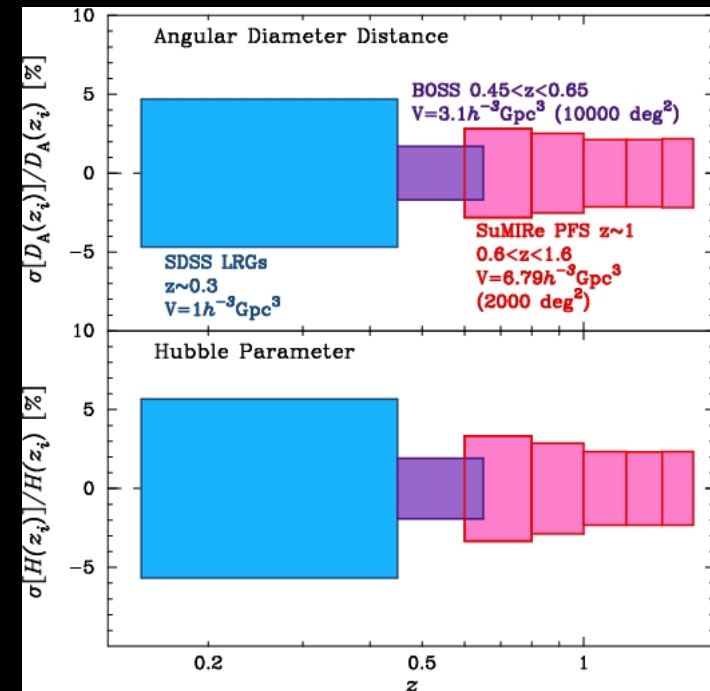
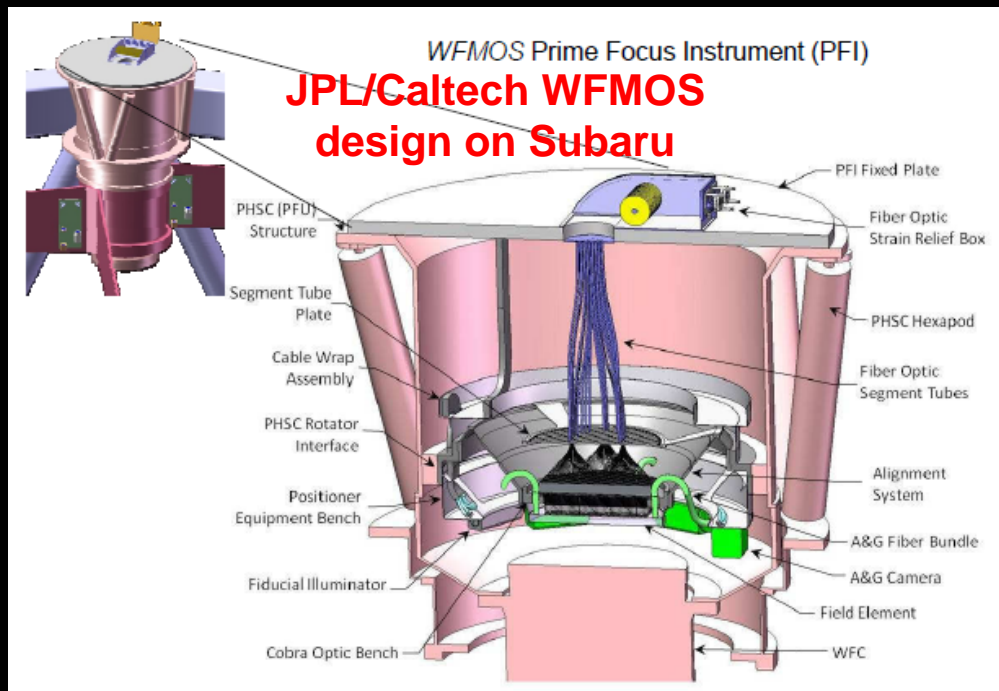


Presented at DENET-Princeton conference (2009) by Satoshi Miyazaki (NAOJ)

PFS: Prime Focus Spectrograph

■ Japan+ (2016-2020 ???)

- Spectroscopic galaxy survey (1.3deg FOV)
- 2500 fibers, 10000 galaxy redshifts a night
- BAO, galactic evolution, Galactic archaeology



presented at DENET summer school (2009)
 by Mike Seiffert (JPL/Caltech)

Courtesy of
 Masahiro Takada (IPMU)

Dark energy research is good or bad for astronomy ?

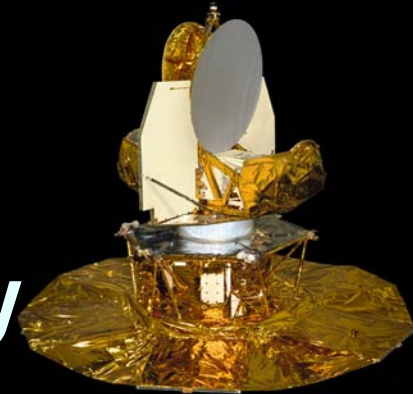
Fundamentalist physics: why dark energy is bad for astronomy

Simon D.M. White, astro-ph/0704.2291

- **Fundamentalist:** high-energy experiments
 - Pursuit of a single truth (LHC, WMAP)
 - Huge international collaborations
- **Universalist:** astronomical observations
 - Multi-purpose (Hubble Space Telescope, SDSS)
 - Relatively small groups
- **Different culture, personal perspective and/or preference, a matter of taste**



Two very successful but quite different projects in astronomy



HST (universalist)

An observatory

Designed for general tasks

Serving a diverse community

Programme built through proposals

Many teams of all sizes

Many results unanticipated

Nourishes astrophysics skills

Public support as a facility

WMAP (fundamentalist)

An experiment

Designed for a specific task

Serving a single, coherent community

Programme set at design

A single moderately large team

Main results 'planned'

Nourishes data-processing/
statistics skills

Public impact through results

Which is happier, the town mouse or the country mouse ?



Le Rat de Ville & le Rat des Champs.

Town mouse ?

**Large Hadron Collider
experiments**

High-energy physicists

Germany in EU

**dark energy
cosmology**

Country mouse ?

Desk-top experiments

Amateur astronomers

Greece in EU

**extrasolar planet
hunting**

Towards bigger science or downsizing ?

Nightfall: We didn't know anything



(Alisa Haba)

- no “night” on “Lagash” except the total eclipse due to another inner planet every 2049 years
- People realized the true world for the first time through the darkness full of “stars”

Hopefully soon, we will recognize that we didn't know anything!

known knows

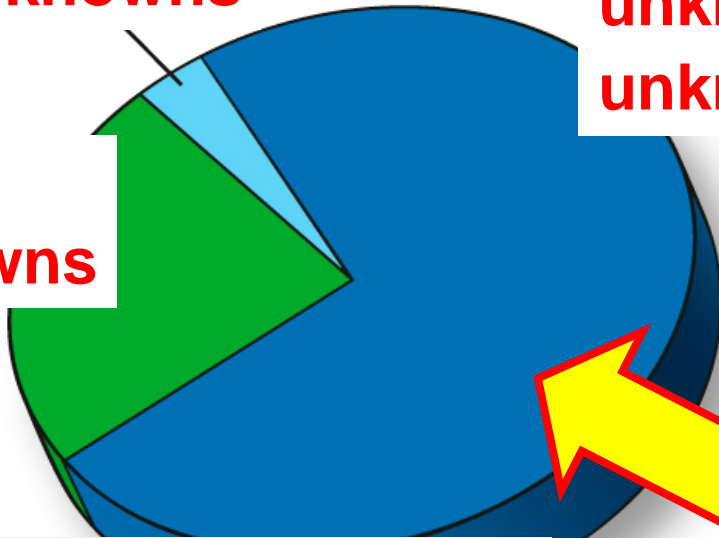
4.6%

known unknowns

23%

unknown unknowns

72%



Our current-best picture of the universe

Ancient Indian picture



baryons

dark matter

dark energy

Have we made progress at all ?

<PI> \doteq 1 の法則? (Suto 2011)

- P: probability that a discovery/hypothesis is correct
- I: impact that the discovery/hypothesis has on science *if it is correct*
- <PI>: expectation value of the impact of the discovery/hypothesis
- ほとんどの発見あるいは仮説は、インパクトが強いものほど怪しい(大発見が何の前触れもなくいきなり登場する可能性は極めて低い)

<PI> ≒ 1 の法則の具体的例

- 宝くじは1等であれ、ハズレであれ戻ってくるお金の期待値はさほど変わらない
 - 宝くじ一等： $I=1\text{億円}/300\text{円}$ 、 $P=1/1000\text{万}$
 - 宝くじ末等： $I=300\text{円}/300\text{円}$ 、 $P=1/10$
- 研究もまた同じ、超大ホームランと地道な積み重ねも科学に与えるインパクトの「期待値」はさほど変わらない
 - 本当ならば物理の歴史を塗り替えるがとてもありそうにない ($I \gg 1$ & $P \ll 1$)
 - 超光速ニュートリノ、ブレインワールド、余次元、素粒子的宇宙論のほとんどの研究、SETI、、、
 - 確実であり地道な研究が大事だが、だからといってそのどれか一つだけが科学的ブレイクスルーを生み出すわけではない ($I \sim 1$ & $P \sim 1$)
 - 銀河サーベイデータ解析、摂動論、観測的宇宙論のほとんどの研究、、、

<PI> ≒ 1 の法則から学ぶべきこと

- 心しておくべきこと： いくらPが小さくとも、宝くじに当選している人は毎回必ず存在する
 - 購入者数Nが、 $1/P$ 以上であるおかげ
 - どれほど怪しげな研究であっても、研究者人口が多ければ、そのなかのどれかは正しく大きなインパクトを与え得る
 - 一等宝くじ的研究(一部の個人プレーによる牽引)
 - 素粒子的宇宙論の研究者数が多いことの必要性
 - 個々の研究は地道でも、多数で進める事で大きな成果をあげるスタイル
 - 末等宝くじ的研究(コミュニティーが一丸となって牽引)
 - 観測的宇宙論の研究者数が多いことの必要性
- どちらを選ぶかは、若い皆さんの考え次第