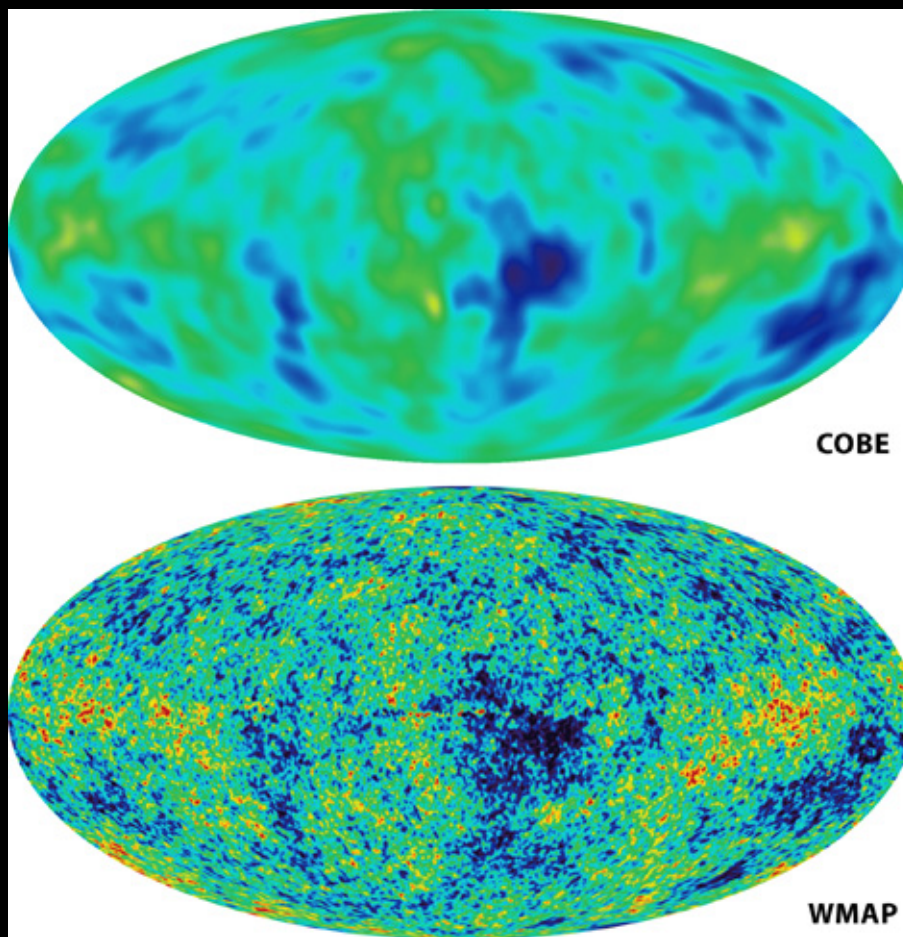
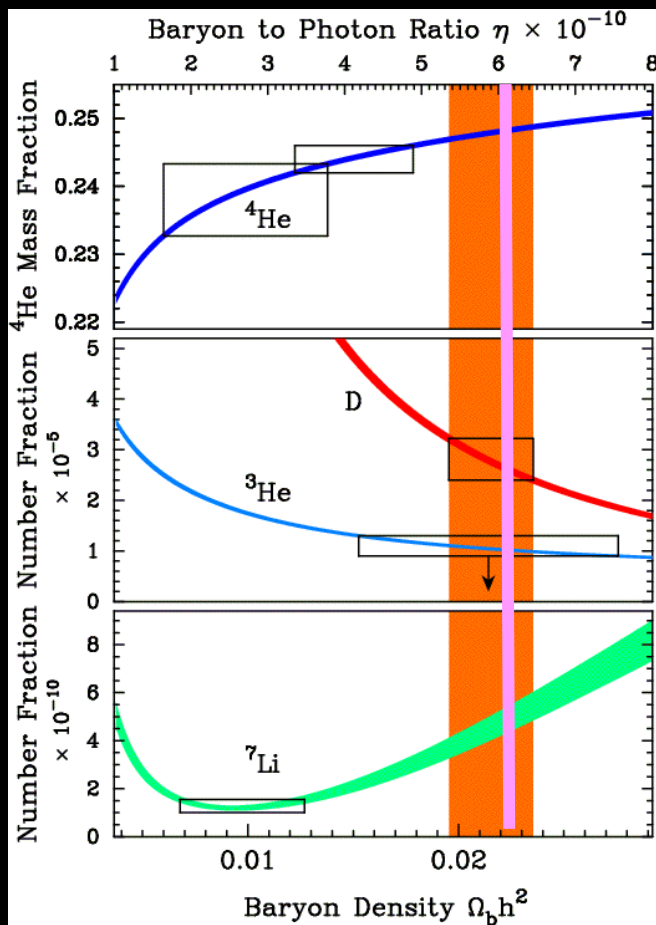


# ビッグバン元素合成とマイクロ波背景輻射



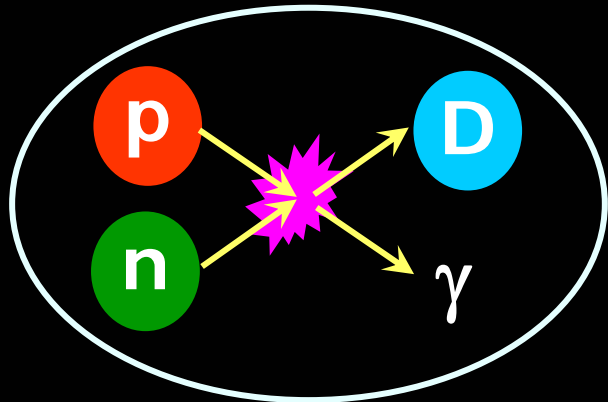
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2007年1月22日 宇宙物理学講義第12回資料

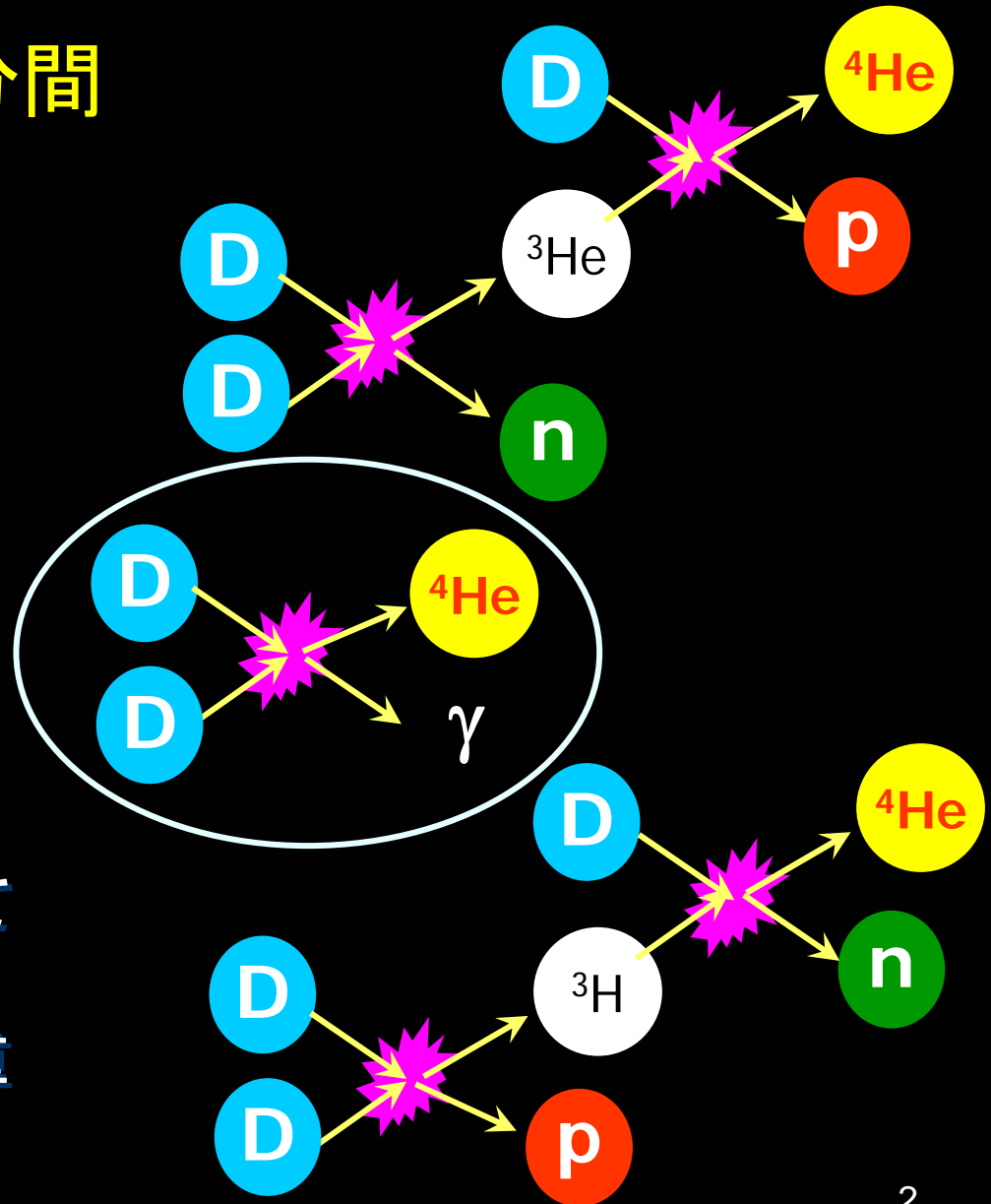
# ビッグバン元素合成反応

## ■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

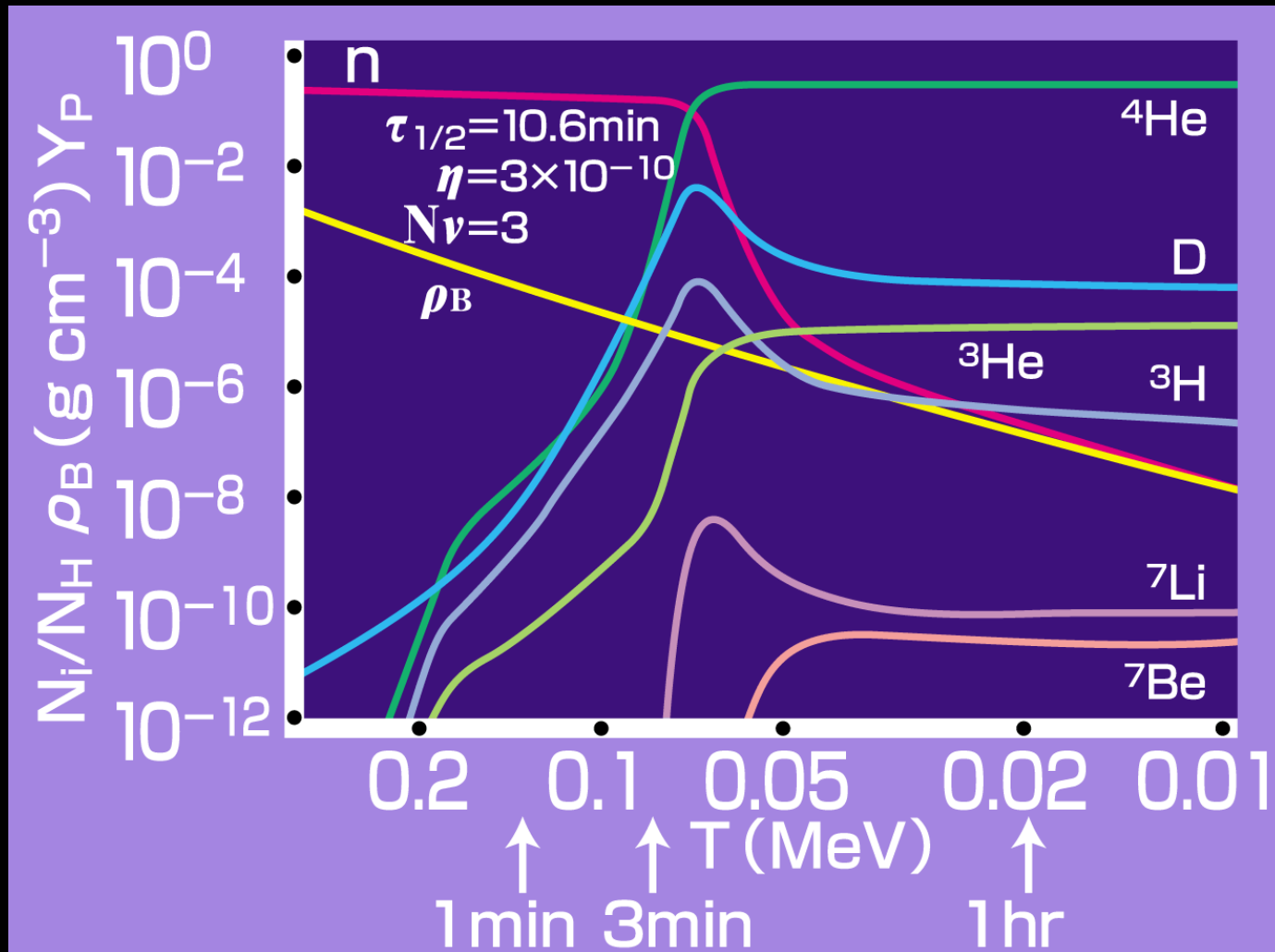


- 重水素は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下 (宇宙誕生後約3分後) となって初めて十分な重水素が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



# 初期宇宙の軽元素量進化

- ヘリウムの質量存在比 25%が自然に説明される



# ヘリウムより重い元素の合成は難しい

p	1	2																		
n	H	He	3	4																
0	<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> He	Li	Be	5	6														
1	<sup>2</sup> D	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> Li	<del><sup>5</sup>He</del>	B	C	7													
2	<sup>3</sup> T	<sup>4</sup> He	<del><sup>5</sup>Li</del>	<sup>6</sup> Be	<del><sup>7</sup>B</del>	<del><sup>8</sup>C</del>	N	8												
3	<sup>4</sup> H	<del><sup>5</sup>He</del>	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Be	<del><sup>8</sup>B</del>	<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> N	0	9	10										
4	<del><sup>5</sup>H</del>	<sup>6</sup> He	<sup>7</sup> Li	<del><sup>8</sup>Be</del>	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> N	<sup>12</sup> O	F	Ne										
5	<sup>6</sup> H	<sup>7</sup> He	<del><sup>8</sup>Li</del>	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> F	<sup>15</sup> Ne	11									
6	<sup>7</sup> H	<del><sup>8</sup>He</del>	<sup>9</sup> Li	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> F	<sup>16</sup> Ne	Na									
	7	<sup>9</sup> He	<sup>10</sup> Li	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Na									
	8	<sup>10</sup> He	<sup>11</sup> Li	<sup>12</sup> Be	<sup>13</sup> B	<sup>14</sup> C	<sup>15</sup> N	<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> F	<sup>18</sup> Ne	<sup>19</sup> Na									

■ 質量数5と8の安定元素がない！

■ He+p, He+n, He+Heなどの反応は起こらない

不安定
半減期 10~ 100日
天然 放射性
安定

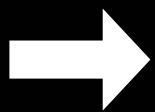
# 星での元素合成とビッグバン元素合成

## ■ 星の内部での元素合成

- トリプルアルファ反応と呼ばれる過程を通じて、ヘリウム以上の重元素(炭素、窒素、酸素など)を合成することが可能
- ヘリウムと重元素がほぼ同じ量だけつくられる(質量比にして、水素75%、ヘリウム13%、それ以上の重元素12%)

## ■ ビッグバン元素合成

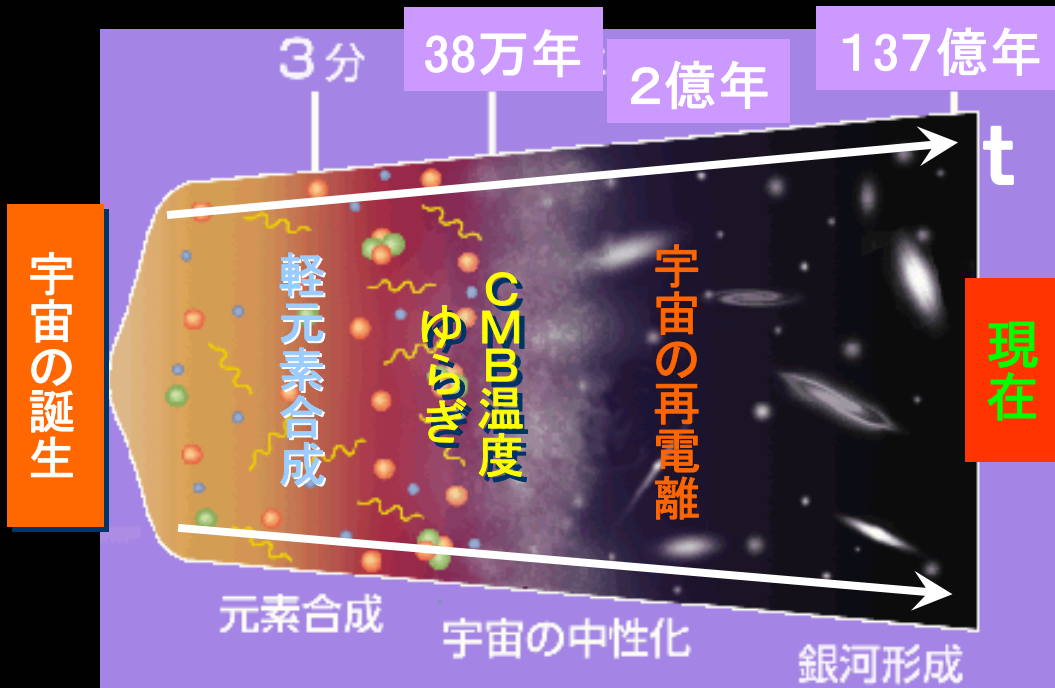
- ヘリウム以上の重元素は合成されず、元素合成開始直前に存在した中性子がほとんどすべてヘリウムになる
- 宇宙誕生1分後の陽子と中性子の個数密度比( $n_p:n_n$ )はおおよそ7:1(弱い相互作用の理論からの予言: 林忠四郎 1952)



$$\frac{m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_{\text{H}} n_{\text{H}} + m_{\text{He}} n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n / 2)}{(n_p - n_n) + 4(n_n / 2)} \approx \frac{1}{4} (!)$$

# 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

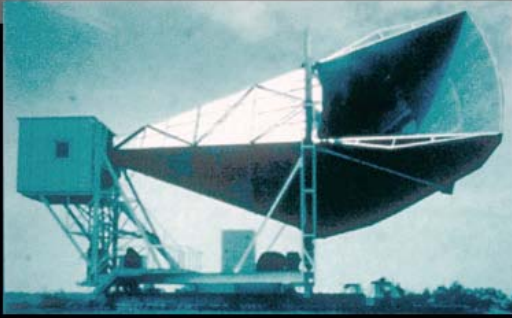
銀河団の形成

宇宙の大構造

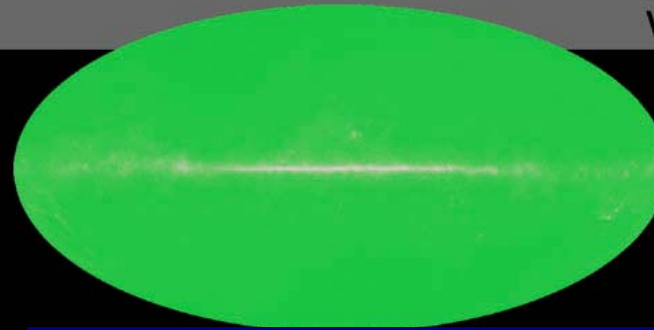


# CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

1965

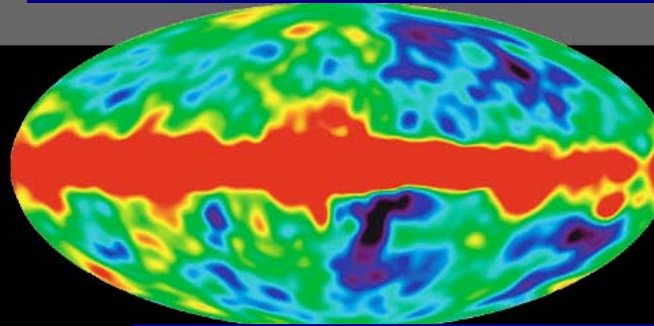
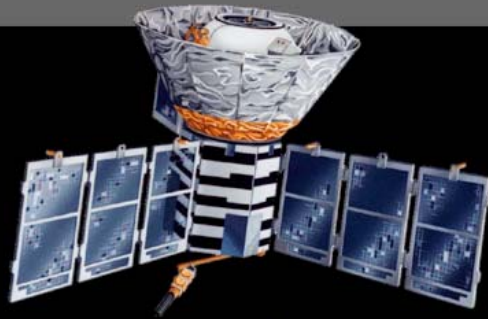


Penzias and  
Wilson



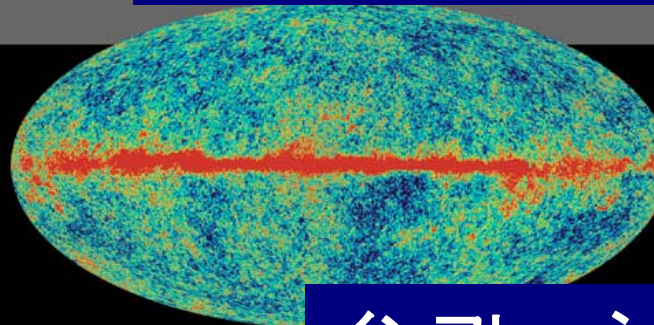
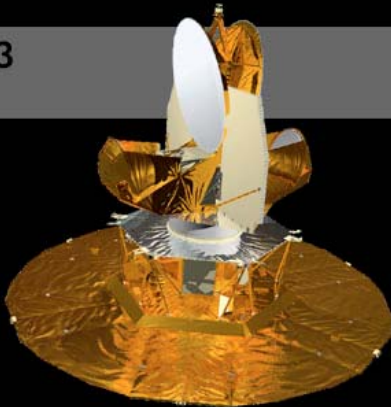
CMBの発見・宇宙の等方性

1992



10万分の1の非等方性発見

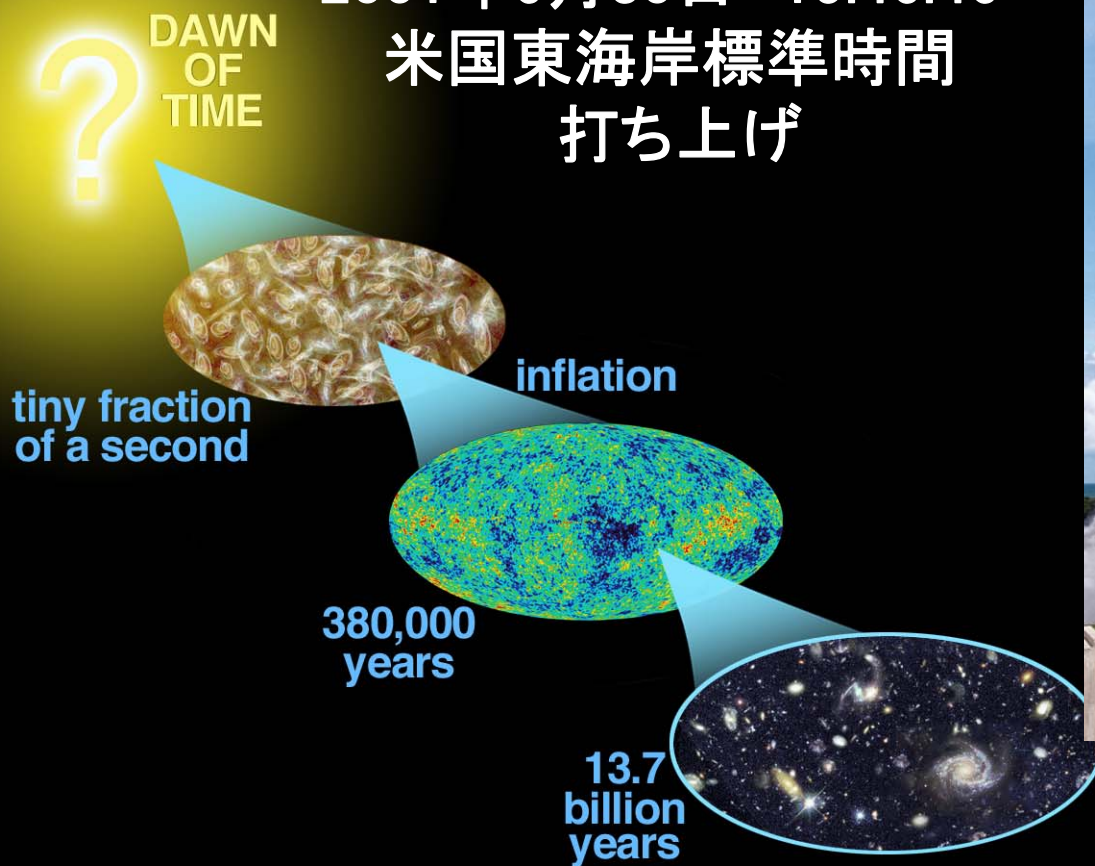
2003



インフレーション理論の検証

# WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

2001年6月30日 15:46:46  
米国東海岸標準時間  
打ち上げ

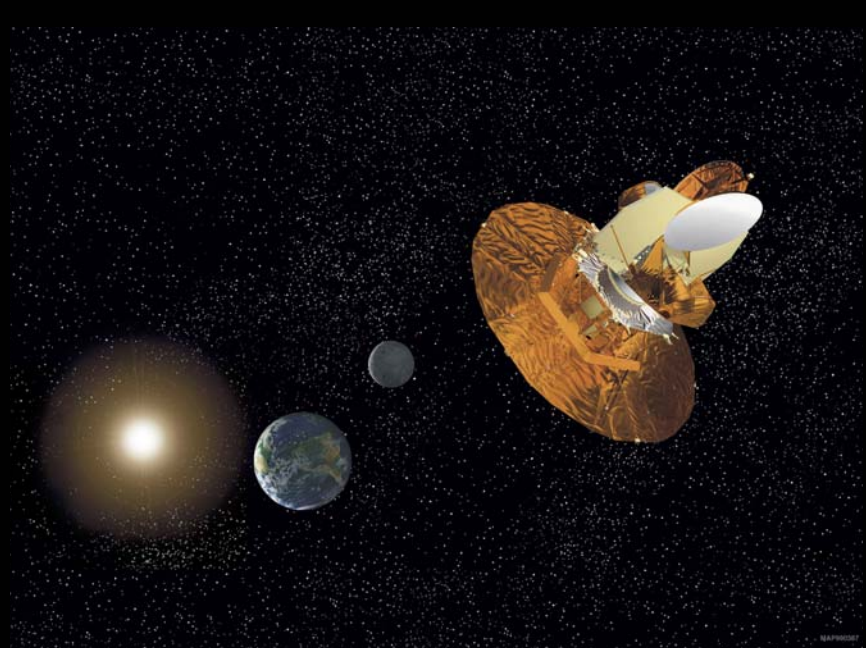
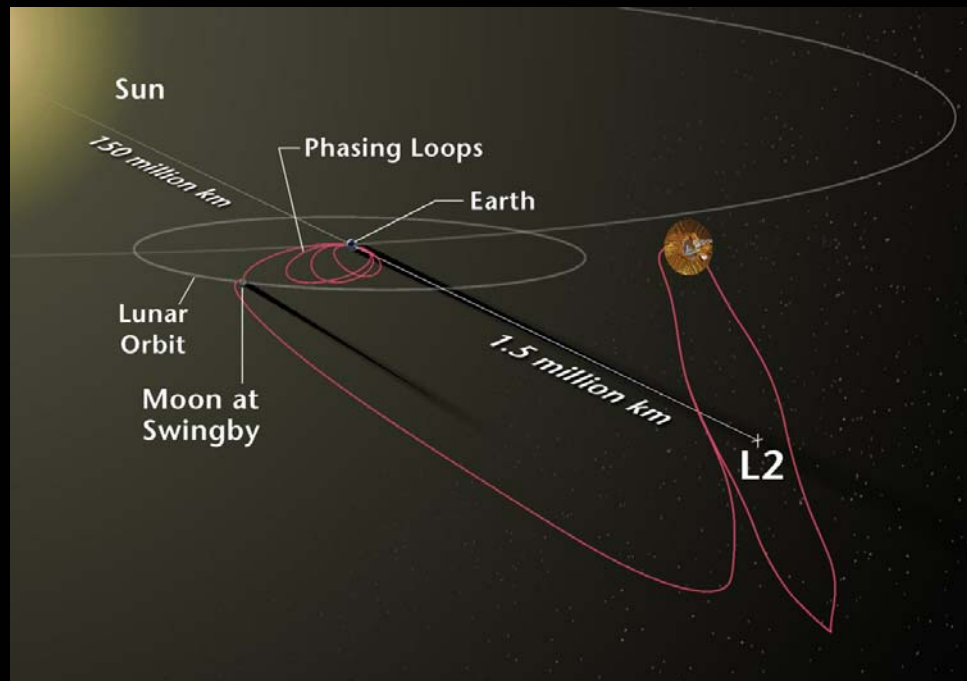


**NASA/WMAP**  
サイエンスチーム提供

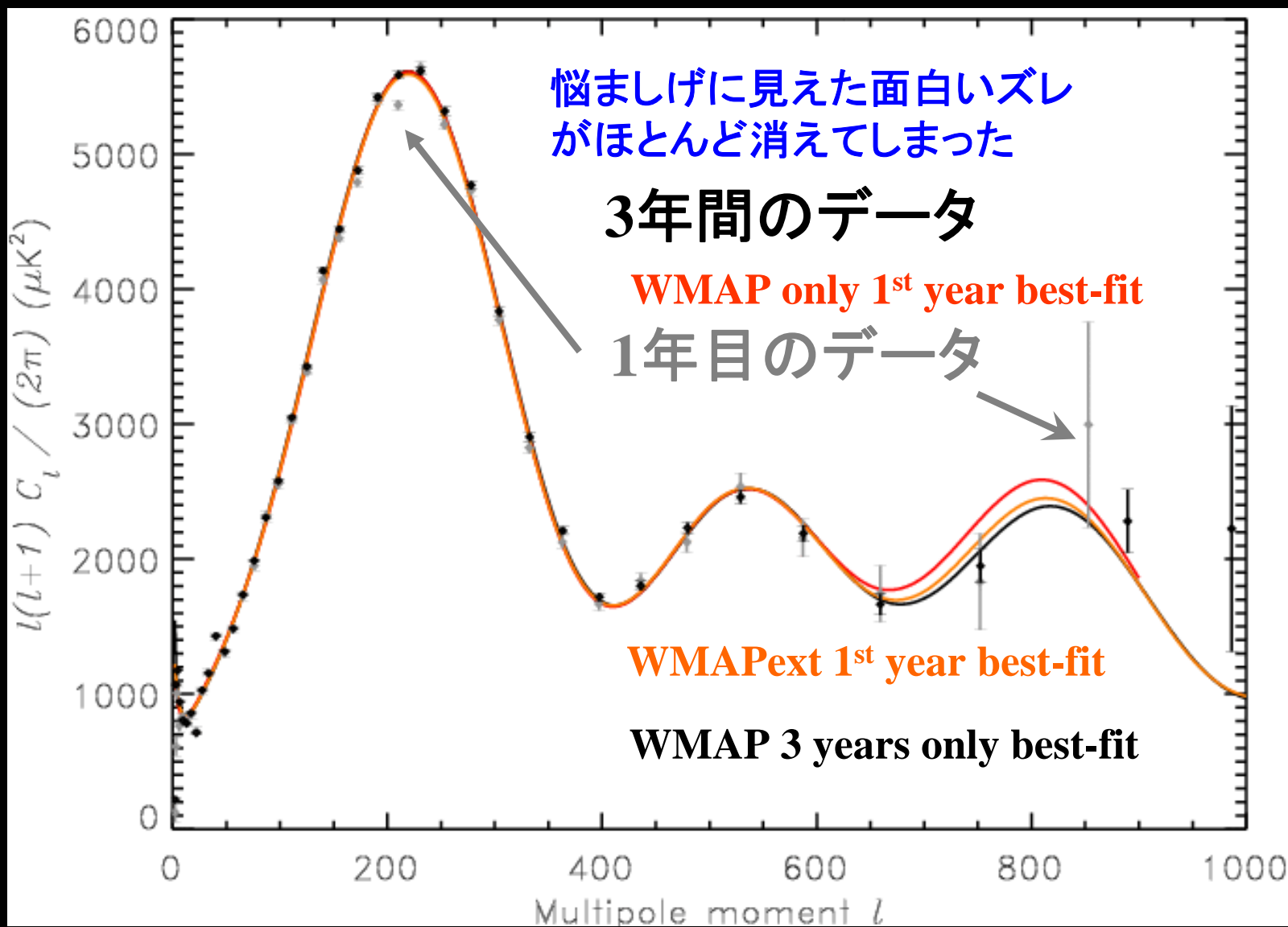
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>



# WMAP 衛星打ち上げ



# WMAP3年温度ゆらぎ角度パワースペクトル

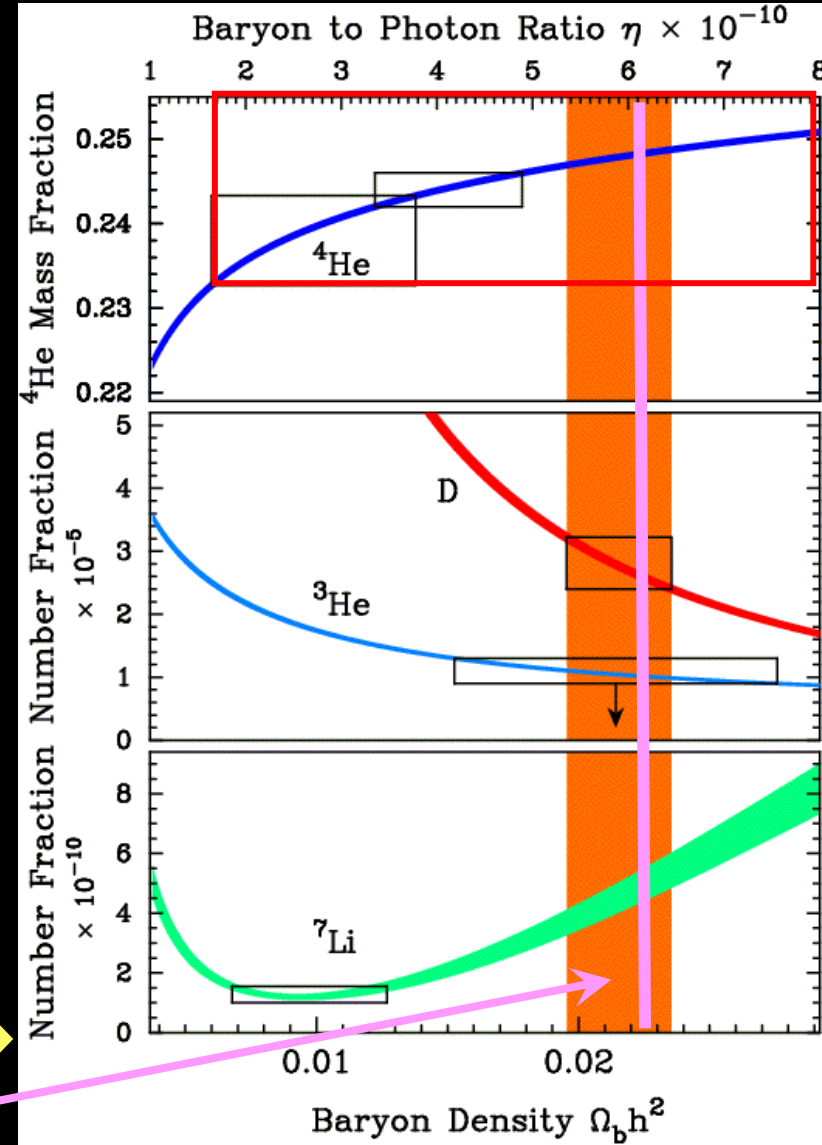
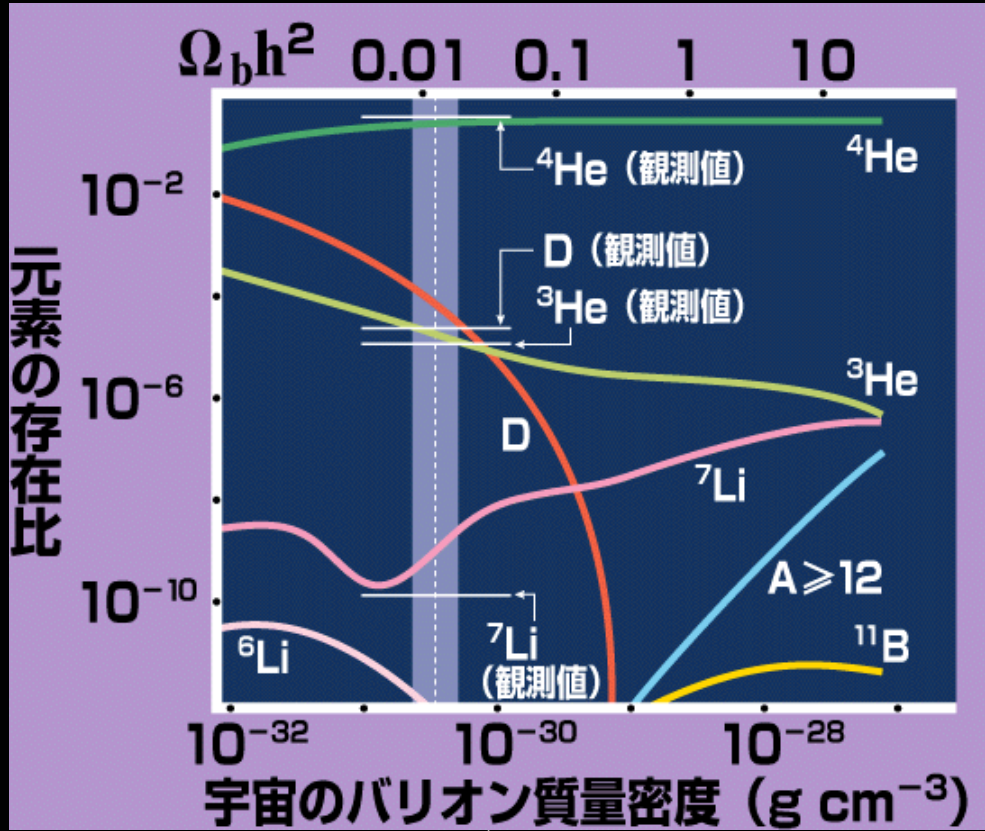


# バリオン密度とビッグバン元素合成

		CMB-based BBN prediction	Observed Value
重水素	$10^5 y_D^{FIT}$	$2.58^{+0.14}_{-0.13}$	1.6 - 4.0
ヘリウム3	$10^5 y_3$	$1.05 \pm 0.03 \pm 0.03$ (syst.)	$< 1.1 \pm 0.2$
ヘリウム4	$Y_P$	$0.24815 \pm 0.00033 \pm 0.0006$ (syst.)	0.232 - 0.258
リチウム	[Li]	$2.64 \pm 0.03$	2.2 - 2.4

- WMAPデータ:  $\eta_{10} = 6.0965 \pm 0.2055$
- リチウムだけはWMAPの値を入れたときのBBNの予言が観測値よりも2倍程度大きめ
  - 観測から推定する際の系統誤差? (そもそもヘリウム4も重水素も10年前の観測推定値から系統的にずれてしまっているという歴史は教訓的)
  - 初代星による破壊?
  - 初期宇宙の未知の物理過程?

# バリオン量：軽元素合成理論・観測との比較



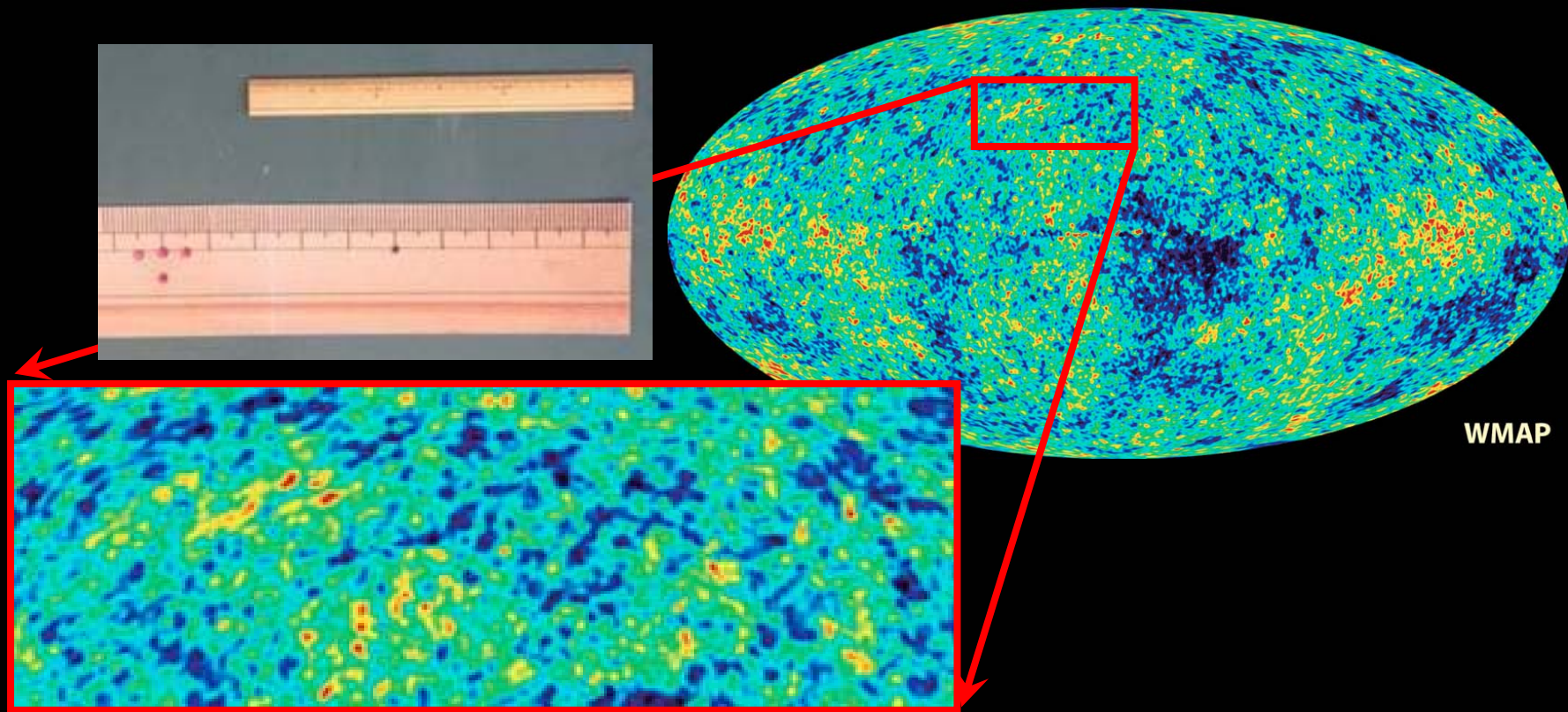
$\Omega_b h^2 = (0.015 \pm 0.002)$  : 1990年代前半

$\Omega_b h^2 = (0.021 \pm 0.002)$  : WMAP直前

$\Omega_b h^2 = (0.0224 \pm 0.0009)$  : WMAP



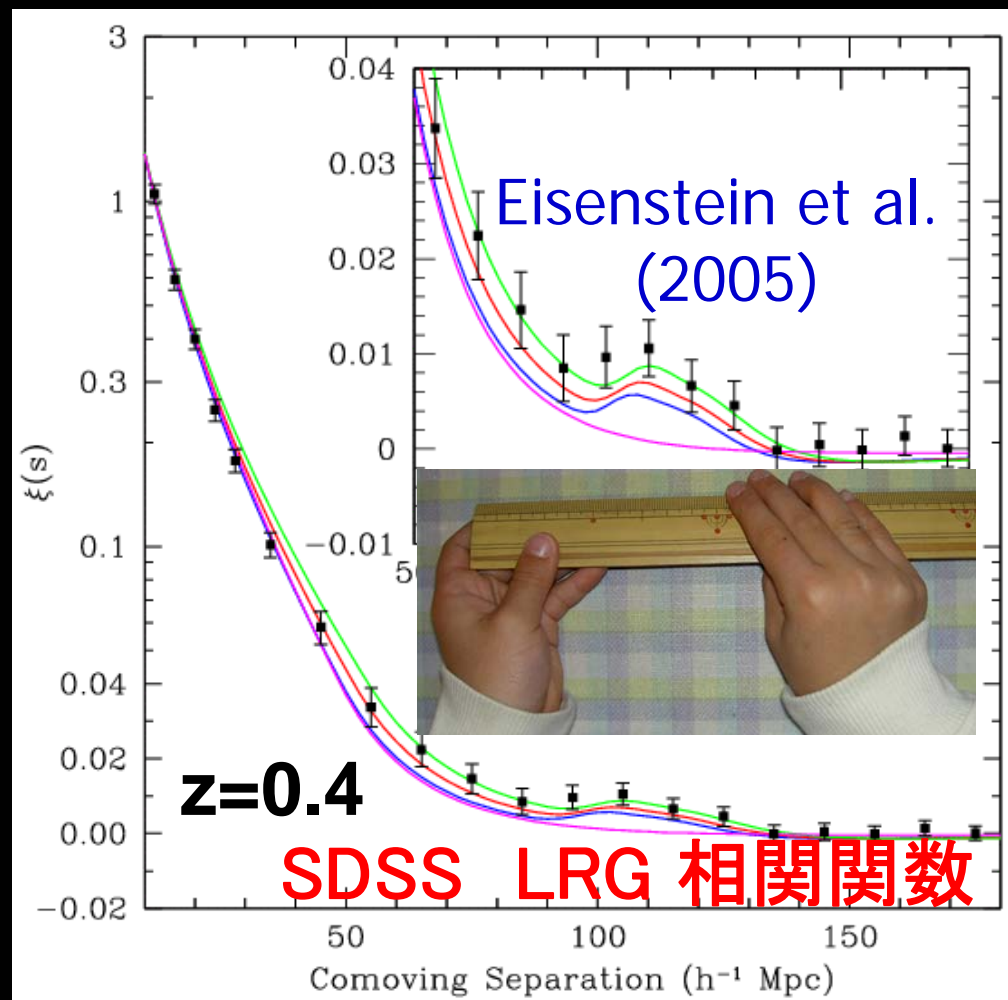
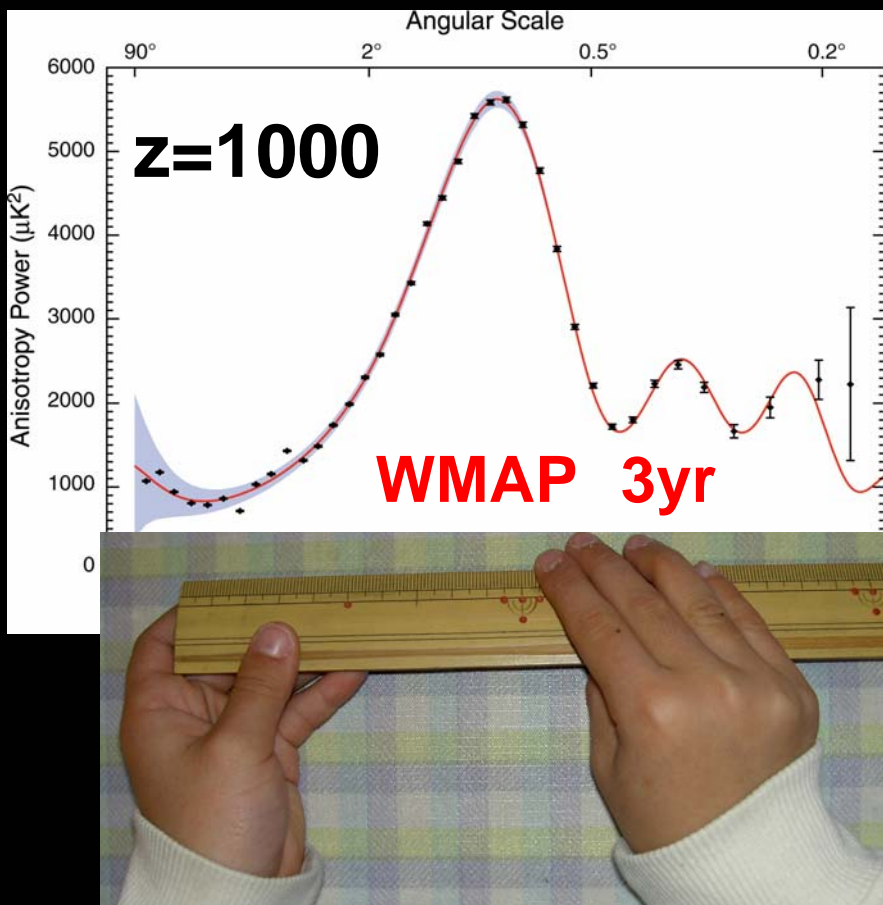
# CMB中のバリオン・光子弾性振動の痕跡



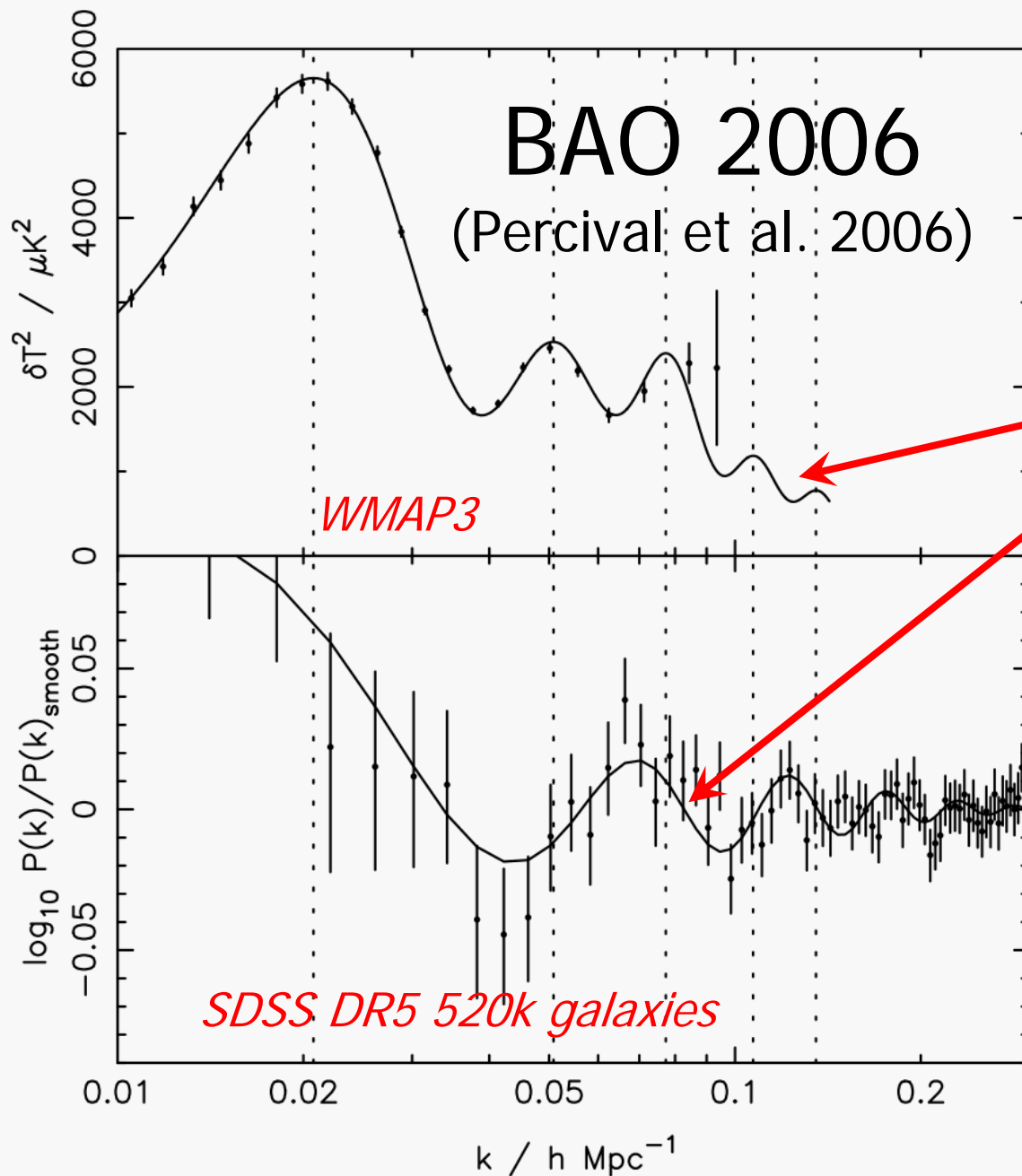
- 再結合時の音波の地平線長 (= 音速 × 宇宙時刻)
  - $147 (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25} (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08} \text{ Mpc}$
- これを幾何学的な標準ものさしとして、宇宙の距離を決定



# CMBとバリオン弾性振動 (BAO)



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



$\Omega_m = 0.24$  best  
fit WMAP model

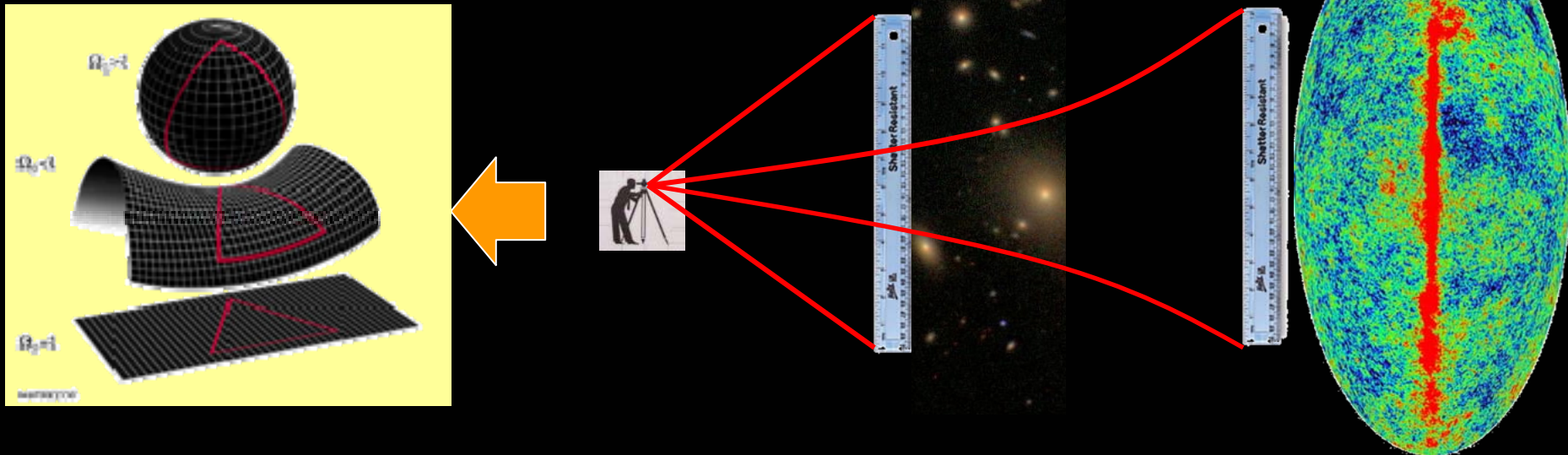
Miller et al. 2001, Percival et al. 2001, Tegmark et al. 2001, Cole et al. 2005, Eisenstein et al. 2005, Hutsei 2006, Blake et al. 2006, Padmanabhan et al. 2006

**(from Bob Nichol)**

# 標準ものさしとしてのBAO

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

- 観測対象までの距離を推定できる
- 銀河サーベイを用いた暗黒エネルギー探査の有力な方法論



Picture credit: Bob Nichol

# 天体物理学被引用回数ランキング(1)

1	<input type="checkbox"/> <a href="#">2003ApJS..148..175S</a>	3715.000 09/2003 <a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">N</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Spergel, D. N.; Verde, L.; Peiris, H. V.; Komatsu, E.; Nolta, M. R.; Bennett, C. L.; Halpern, M.; Hinshaw, G.; Jarosik, N.; Kogut, A.; and 7 coauthors	First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters
<b>WMAPの1年目のデータ</b>		
2	<input type="checkbox"/> <a href="#">1981PhRvB..23.5048P</a>	3694.000 05/1981 <a href="#">E</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a>
	Perdew, J. P.; Zunger, Alex	Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems
3	<input type="checkbox"/> <a href="#">1998ApJ...500..525S</a>	3574.000 06/1998 <a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Schlegel, David J.; Finkbeiner, Douglas P.; Davis, Marc	Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds
<b>天の川銀河ダスト分布地図</b>		
4	<input type="checkbox"/> <a href="#">1973A&amp;A...24..337S</a>	3446.000 00/1973 <a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Shakura, N. I.; Sunyaev, R. A.	Black holes in binary systems. Observational appearance.
<b>ブラックホール周りの標準降着円盤モデル</b>		
5	<input type="checkbox"/> <a href="#">1989GeCoA..53..197A</a>	3130.000 01/1989 <a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Anders, E.; Grevesse, N.	Abundances of the elements - Meteoritic and solar

# 天体物理学被引用回数ランキング(2)

6	<input type="checkbox"/> <a href="#">1979ApJS...40....1K</a>	2833.000 05/1979	<a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">D</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">O</a> <a href="#">U</a>	Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars <b>恒星大気モデル</b>
7	<input type="checkbox"/> <a href="#">1980PhRvL..45..566C</a>	2754.000 08/1980	<a href="#">E</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a>	Ceperley, D. M.; Alder, B. J. Ground state of the electron gas by a stochastic method
8	<input type="checkbox"/> <a href="#">1999ApJ...517..565P</a>	2672.000 06/1999	<a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">D</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">N</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Perlmutter, S.; Aldering, G.; Goldhaber, G.; Knop, R. A.; Nugent, P.; Castro, P. G.; Deustua, S.; Fabbro, S.; Goobar, A.; Groom, D. E.; <b>and 23</b> <b>coauthors</b>
9	<input type="checkbox"/> <a href="#">1998AJ....116.1009R</a>	2618.000 09/1998	<a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">D</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">N</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Riess, Adam G.; Filippenko, Alexei V.; Challis, Peter; Clocchiatti, Alejandro; Diercks, Alan; Garnavich, Peter M.; Gilliland, Ron L.; Hogan, Craig J.; Jha, Saurabh; Kirshner, Robert P.; <b>and</b> <b>10 coauthors</b>
10	<input type="checkbox"/> <a href="#">1981PhRvD..23..347G</a>	2485.000 01/1981	<a href="#">=</a> <a href="#">=</a> <a href="#">=</a>	<b>インフレーション宇宙モデルの提唱</b> Guth, Alan H. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems



# 天体物理学被引用回数ランキング(3)

11	<input type="checkbox"/> <a href="#">1989ApJ...345..245C</a>	2476.000 10/1989 <a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Cardelli, Jason A.; Clayton, Geoffrey C.; Mathis, John S.	The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction <b>異なる観測波長間での星間吸収効果</b>
12	<input type="checkbox"/> <a href="#">1966ARA&amp;A...4..193J</a>	2454.000 00/1966 <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a>
	Johnson, Harold L.	Astronomical Measurements in the Infrared
13	<input type="checkbox"/> <a href="#">1992AJ....104..340L</a>	2435.000 07/1992 <a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">D</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">O</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Landolt, Arlo U.	UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator <b>測光標準星</b>
14	<input type="checkbox"/> <a href="#">1999PhRvL..83.3370R</a>	2262.000 10/1999 <a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Randall, Lisa; Sundrum, Raman	Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension <b>ブレインワールドモデルの提案</b>
15	<input type="checkbox"/> <a href="#">1987PASP...99..191S</a>	2250.000 03/1987 <a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Stetson, Peter B.	DAOPHOT - A computer program for crowded-field stellar photometry
16	<input type="checkbox"/> <a href="#">1999PhRvL..83.4690R</a>	2148.000 12/1999 <a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>
	Randall, Lisa; Sundrum, Raman	An Alternative to Compactification <b>ブレインワールドモデルの提案</b>

# 天体物理学被引用回数ランキング(4)

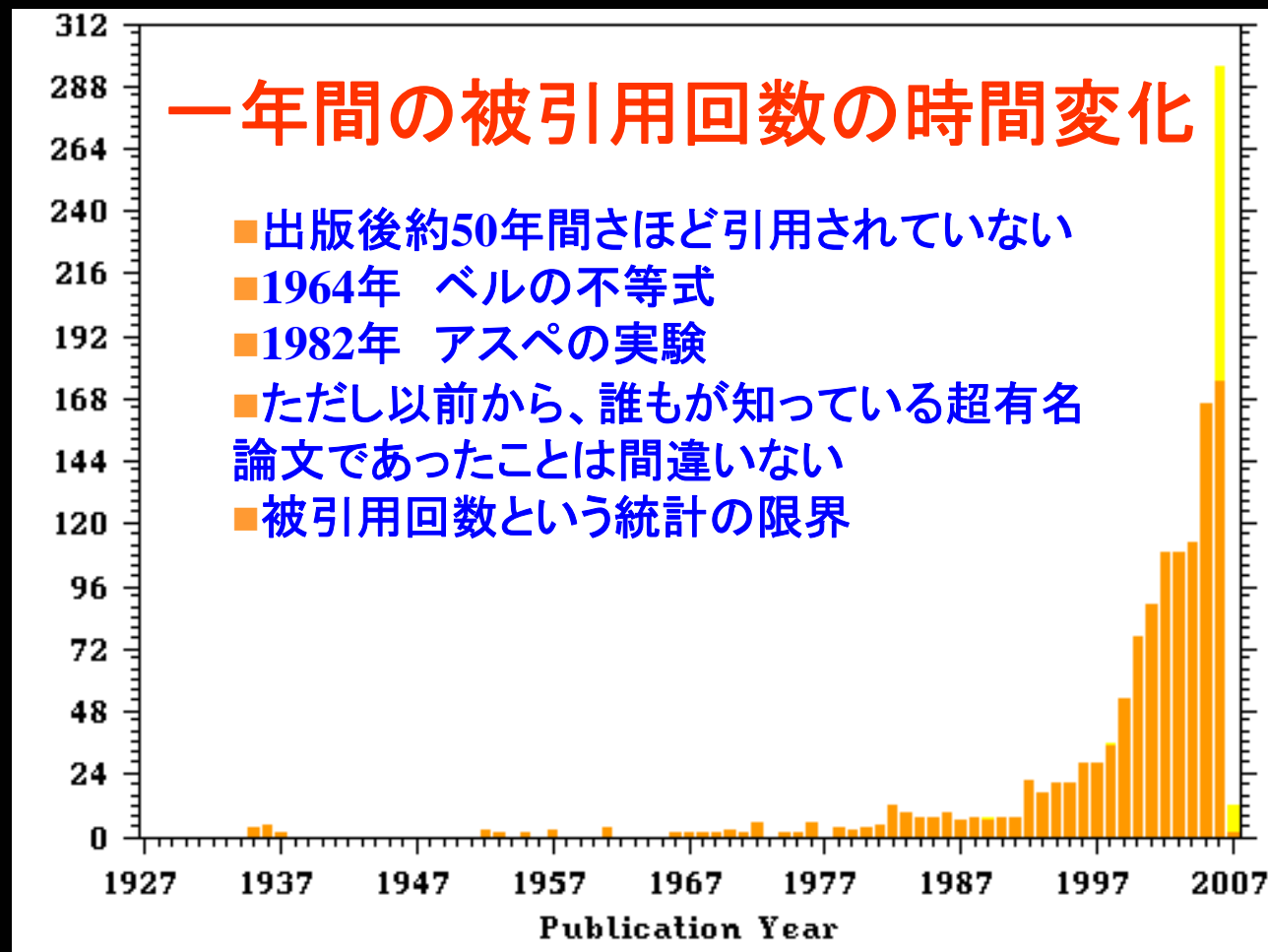
17	<input type="checkbox"/> <a href="#">1955ApJ...121..161S</a>	2047.000 01/1955	<a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Salpeter, Edwin E.	The Luminosity Function and Stellar Evolution. <b>星の初期質量関数</b>
18	<input type="checkbox"/> <a href="#">1984ApJ...285...89D</a>	2044.000 10/1984	<a href="#">S</a> <a href="#">O</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Draine, B. T.; Lee, H. M.	<b>星間ダストの理論モデル</b> Optical properties of interstellar graphite and silicate grains
19	<input type="checkbox"/> <a href="#">1990ARA&amp;A..28..215D</a>	1905.000 00/1990	<a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">T</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">S</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Dickey, John M.; Lockman, Felix J.	H I in the Galaxy <b>天の川銀河内の中性水素分布</b>
20	<input type="checkbox"/> <a href="#">1979ARA&amp;A..17...73S</a>	1884.000 00/1979	<a href="#">A</a> <a href="#">F</a> <a href="#">G</a> <a href="#">T</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a>	Savage, B. D.; Mathis, J. S.	Observed properties of interstellar dust <b>星間ダストの観測的性質</b>
21	<input type="checkbox"/> <a href="#">1997ApJ...490..493N</a>	1813.000 12/1997	<a href="#">A</a> <a href="#">E</a> <a href="#">F</a> <a href="#">X</a> <a href="#">R</a> <a href="#">C</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Navarro, Julio F.; Frenk, Carlos S.; White, Simon D. M.	A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering <b>暗黒物質ハローの普遍的密度プロファイルの提案</b>
22	<input type="checkbox"/> <a href="#">1982AJ....87.1165B</a>	1799.000 08/1982	<a href="#">A</a> <a href="#">U</a> <a href="#">H</a>	Burstein, D.; Heiles, C.	<b>天の川銀河ダスト分布地図</b> Reddenings derived from H I and galaxy counts - Accuracy and maps

# アインシュタイン論文被引用回数ランキング

2	<input type="checkbox"/> <a href="#">1905AnP...322..549E</a>	193.000	00/1905	<b>ブラウン運動</b>	<a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, A.			Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen		
3	<input type="checkbox"/> <a href="#">1905AnP...322..891E</a>	140.000	00/1905	<b>特殊相対論</b>	<a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, A.			Zur Elektrodynamik bewegter Körper		
4	<input type="checkbox"/> <a href="#">1936Sci....84..506E</a>	126.000	12/1936	<b>重カレンズ</b>	<a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, Albert			Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field		
5	<input type="checkbox"/> <a href="#">1945RvMP...17..120E</a>	97.000	04/1945	<a href="#">E</a>	<a href="#">R</a> <a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, Albert; Straus, Ernst G.			The Influence of the Expansion of Space on the Gravitation Fields Surrounding the Individual Stars		
6	<input type="checkbox"/> <a href="#">1916AnP...354..769E</a>	87.000	00/1916	<b>一般相対論</b>	<a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, A.			Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie		
7	<input type="checkbox"/> <a href="#">1917PhyZ...18..121E</a>	86.000	00/1917		<a href="#">C</a>	<a href="#">U</a>
	Einstein, Albert			Zur Quantentheorie der Strahlung		
18	<input type="checkbox"/> <a href="#">1932PNAS...18..213E</a>	27.000		<b>アインシュタイン・ドジッターモデル</b>		<a href="#">U</a>
	Einstein, A.; de Sitter, W.			On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe		

# アインシュタイン論文被引用回数第一位

1  [1935PhRv...47..777E](#) 1319.000 05/1935 [A](#) [E](#) [R](#) [C](#)  
Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?



# アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン 「パラドックス」の原論文

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

- 一つも他の文献を引用していない論文としても有名（このような独創的な論文を書いてみたいという夢を誰でも一度はもつ）
- この論文の内容については、清水明さんによる以下の優れた解説が参考になる

[http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture\\_note/kstext04\\_ohp.pdf](http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture_note/kstext04_ohp.pdf)