

宇宙學新世紀

朱明中

香港中文大學物理系

研資局公眾講座 07/07/2012

Milky Way

Canon EOS 7D
EF-S 10-20mm, F/3.5 @ 10mm,
Tracked with Eyeball CD-1
240s @ ISO 1600 x 10 = 40min
Photo By T. P. Wang @29th May
NT, Australia

宇宙

可見宇宙：

上下四方曰宇
古往今來曰宙

宇宙學：研究宇宙大尺度的結構及演化

宇宙學新世紀

- 宇宙簡史
- 宇宙學新工具: 微波背景輻射、超新星、無線電波、重力透鏡、...
- 懸案: 暗物質、暗能量、反物質、...
- 中大的相關研究

宇宙簡史

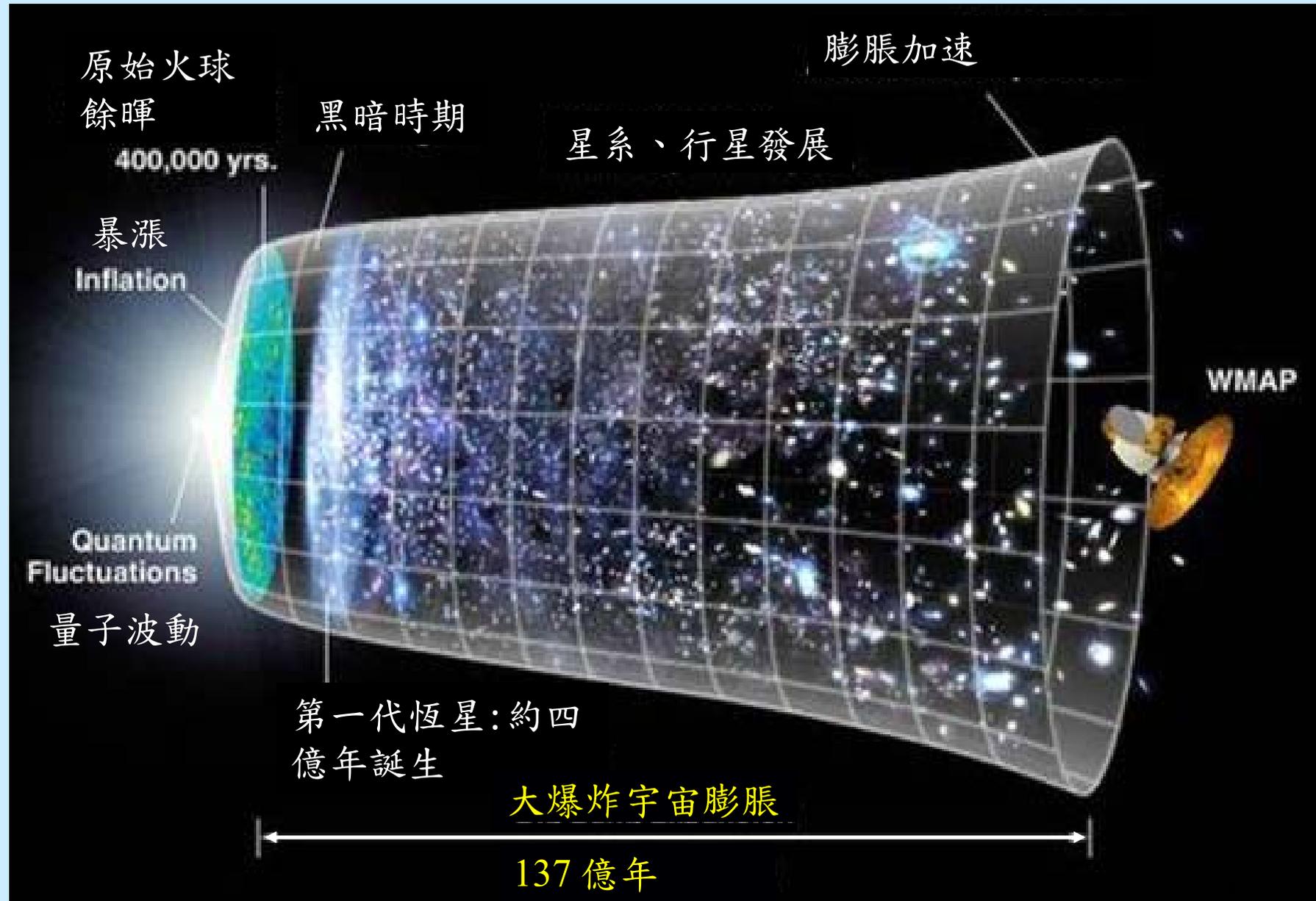


Figure courtesy NASA/WMAP

你看得見的都是歷史 ...
因為光速有限

200s 前 → ← 2,600s 前

← 1.3s 前

2x10⁻⁶s 前

10⁻⁶s 前



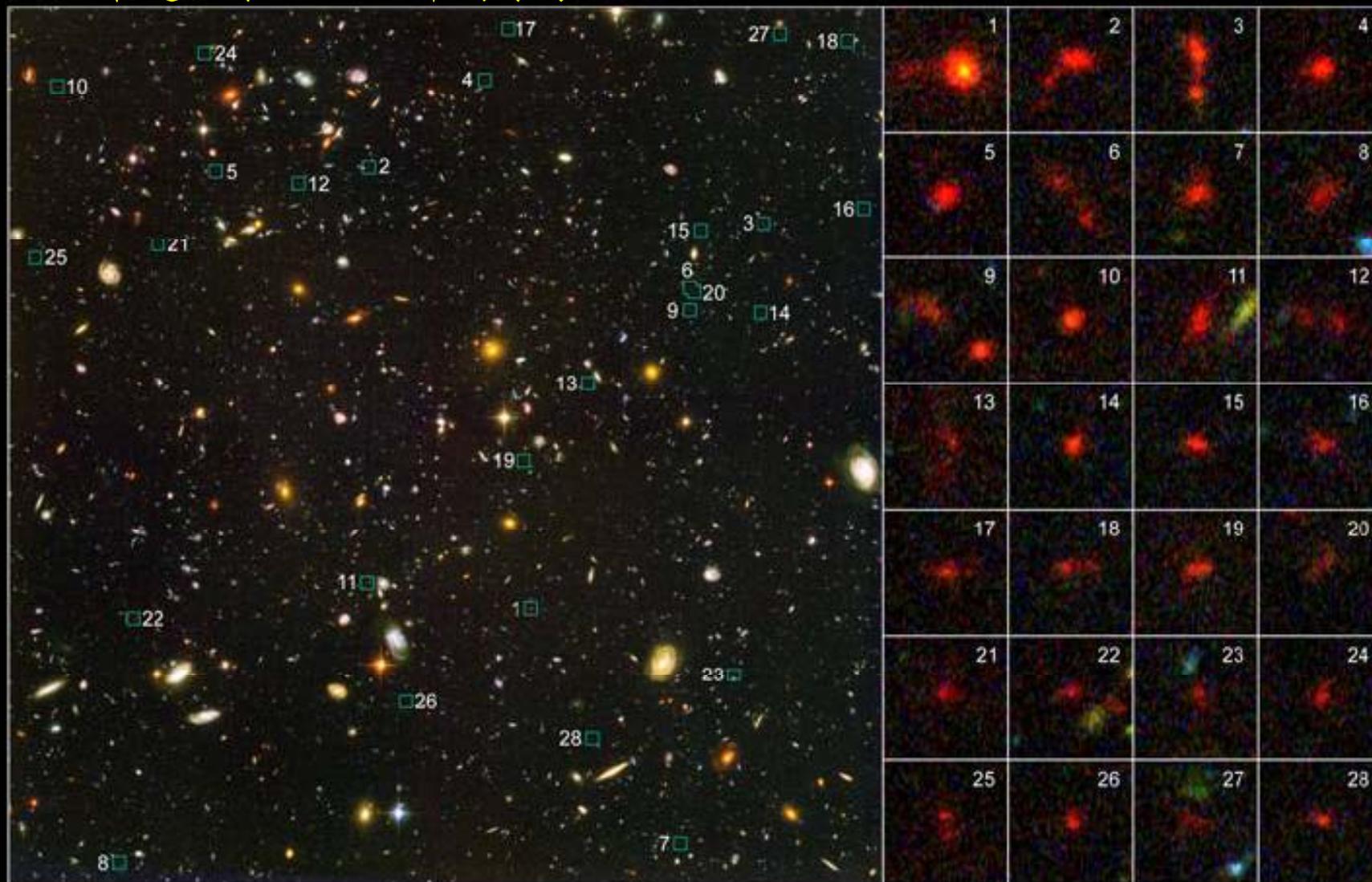
時光機器

宇宙一景

Photo courtesy NASA/STScI



最遠星系: ~130億年前景象!



Distant Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

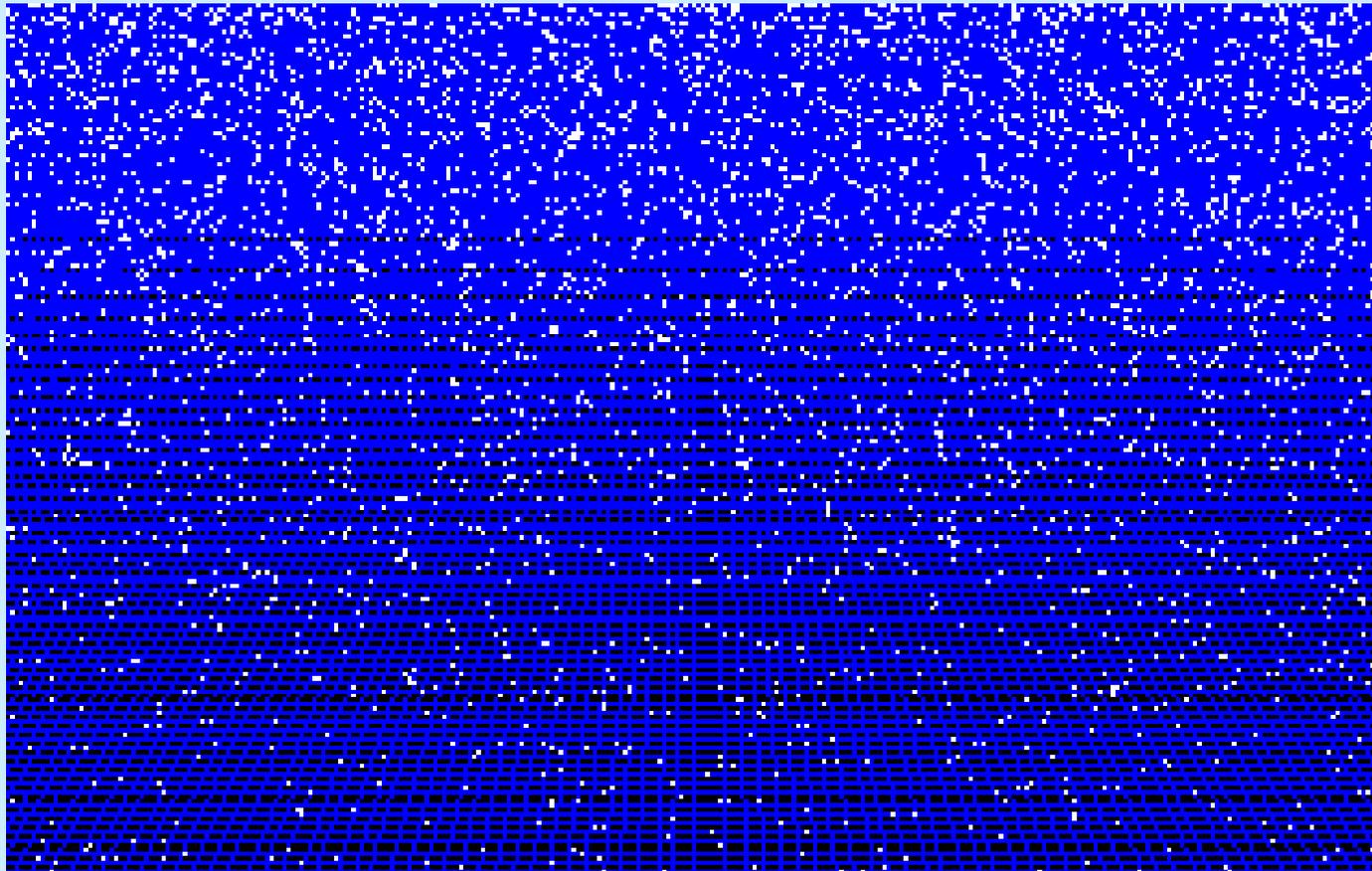
宇宙黑暗期

原始火球 $T \sim 3,000 \text{ K}$, $t \sim 400,000 \text{ 年}$

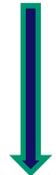
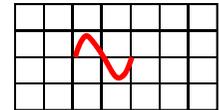


I. 宇宙學新工具: 微波背景輻射

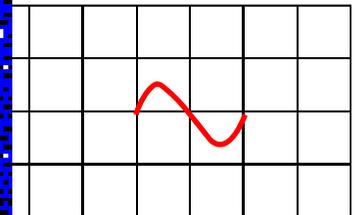
宇宙膨脹



紅光



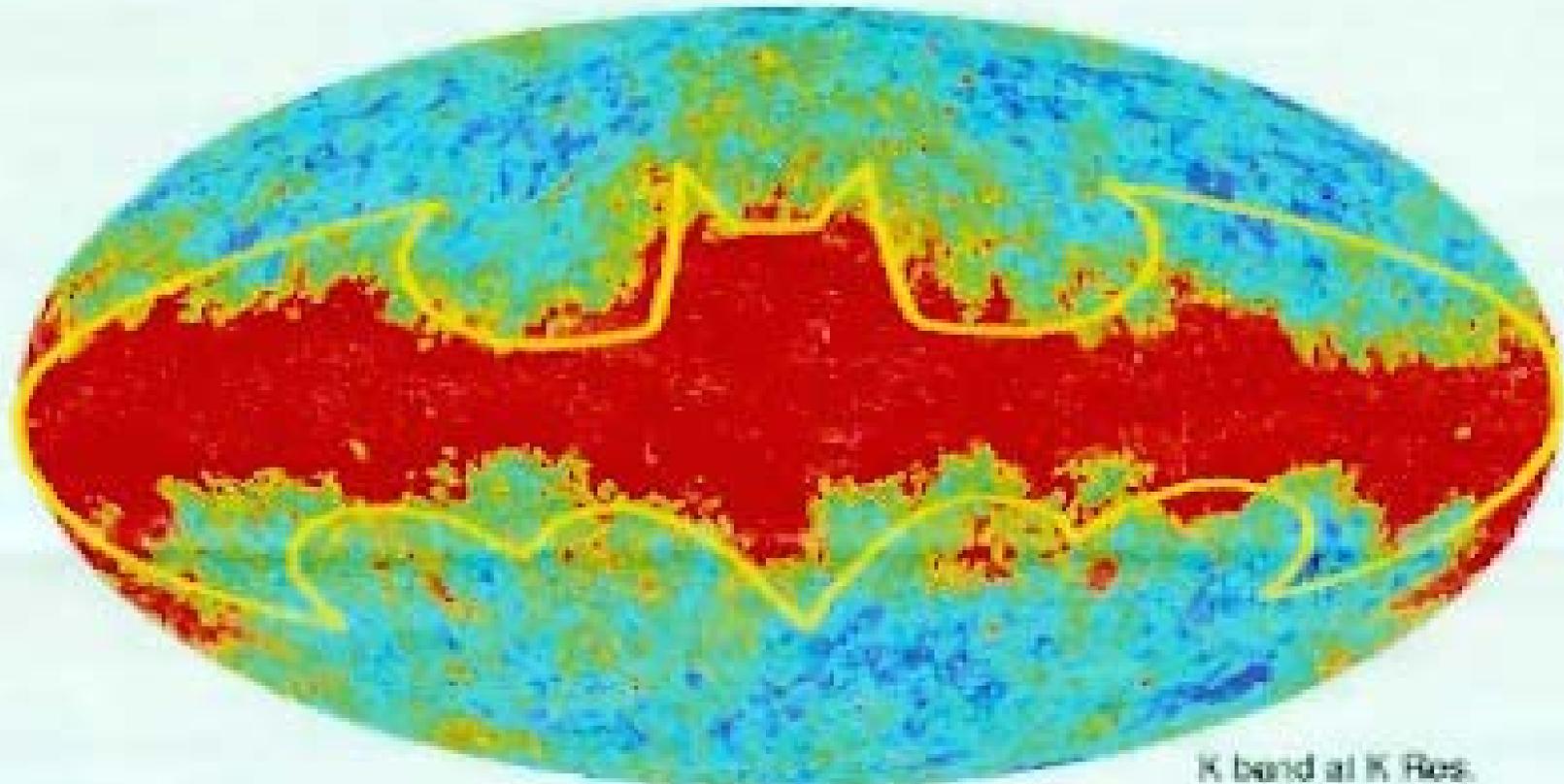
微波



- 觀測: 宇宙膨脹已持續137億年
- 每方向漲大 > 1000倍, 光線的波長亦拉長 (紅光 → 微波)
- 早期宇宙密度及溫度必然很高: 宏轟/大爆炸 *Big Bang*
- 應放射大量輻射 (Gamow 1948): 微波背景輻射 *CMB*

宇宙微波背景輻射測量的歷史

Is the Universe Trying to Tell Us Something?



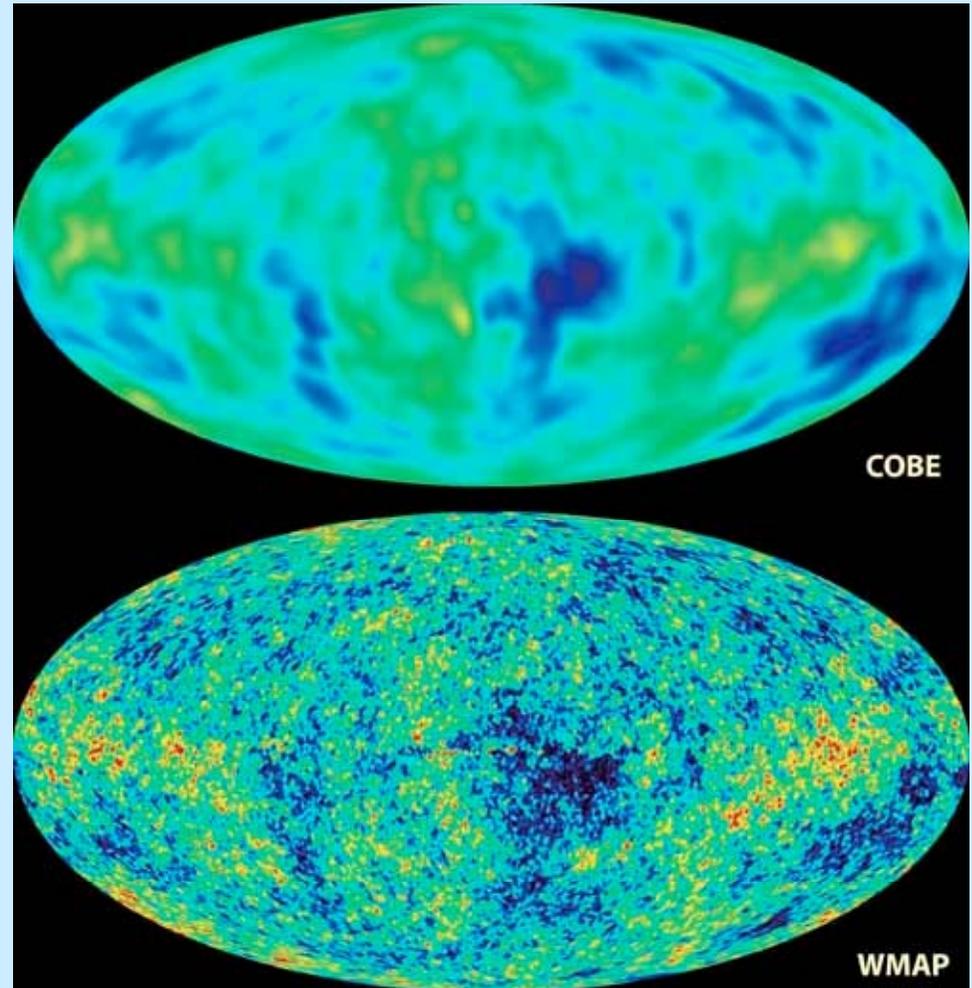
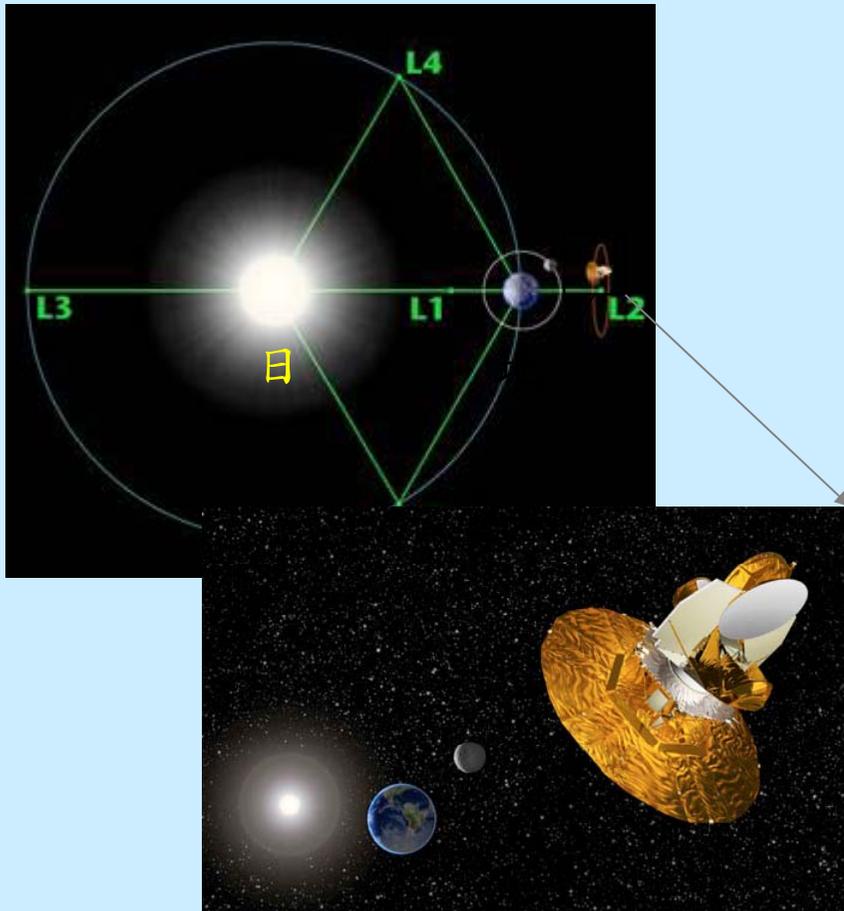
From APS Newsletter

Stephanie Coau of Pennsylvania State University has uncovered the true meaning of the Cosmic Microwave Background.

中央紅色帶為本銀河系的訊號

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

- 1/4/02 發射, 於 L2 點 (離地球 1.5×10^6 km)
- 12/02 開始收集數據
- 解像度 $< 0.3^\circ$; 靈敏度 $\sim 20 \mu\text{K}$



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

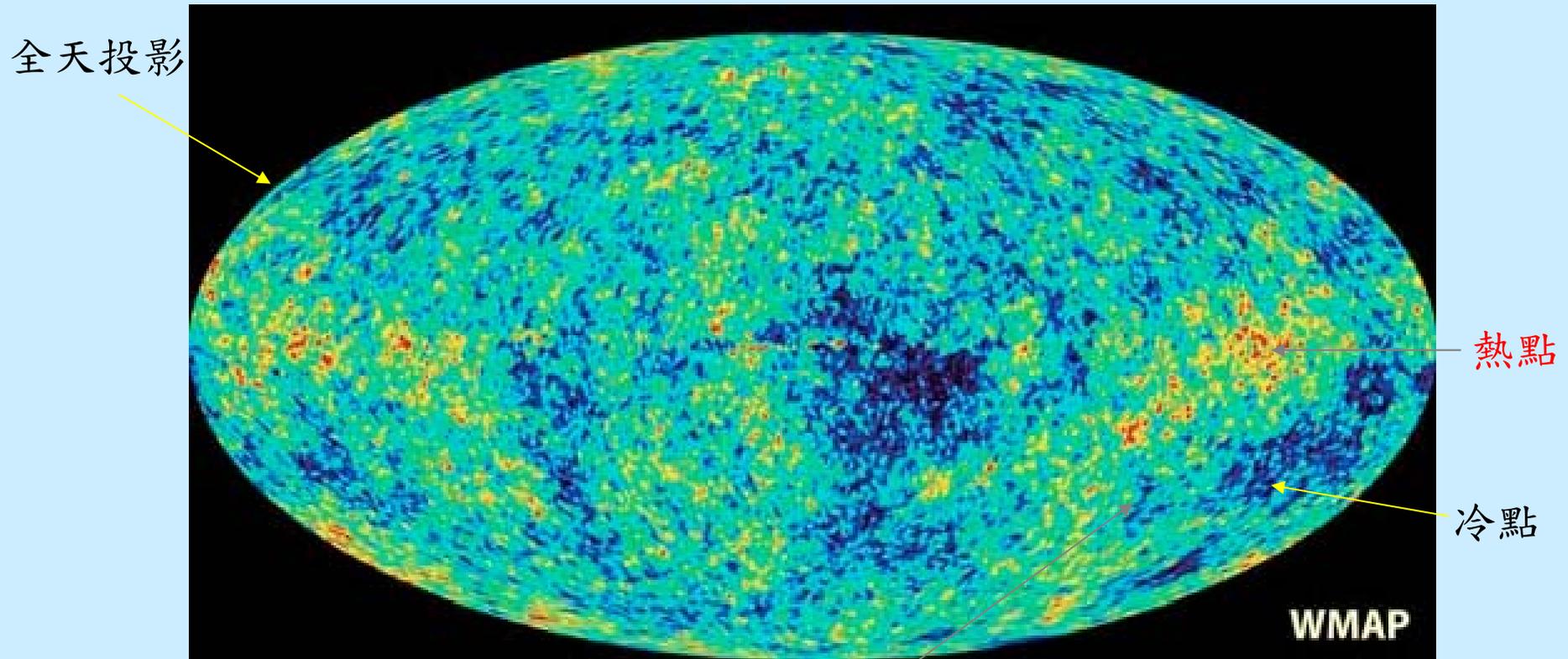
<http://www.sciencemag.org/sciext/btoy2003/>

13

Photos courtesy NASA/WMAP

微波背景輻射異向性

$$T = 2.725 \pm 10^{-5} \text{ K}$$



溫度波動 $\sim 10^{-5} \text{ K}$

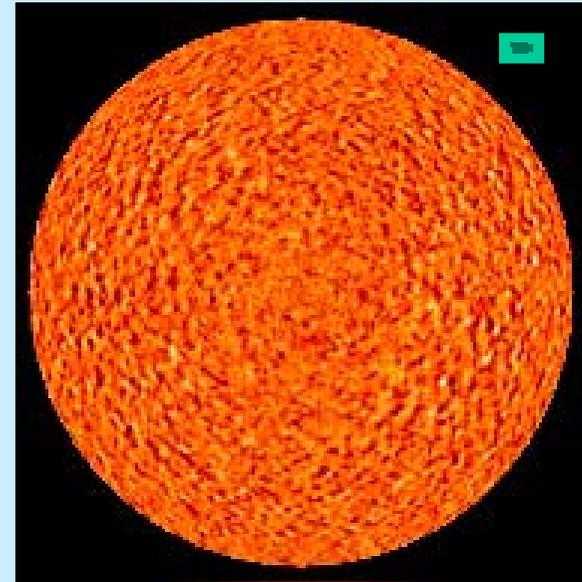
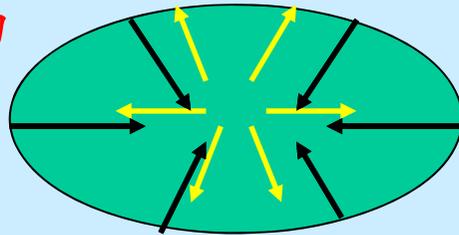
Figure courtesy NASA/WMAP

為甚麼微波背景輻射不均勻？

- 原始火球的振動
- 聲振波動 (*acoustic oscillation*)

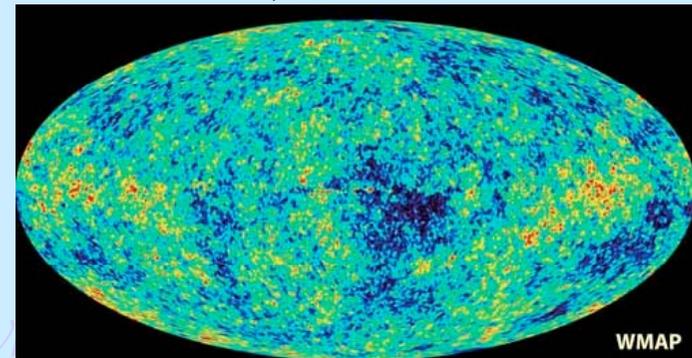
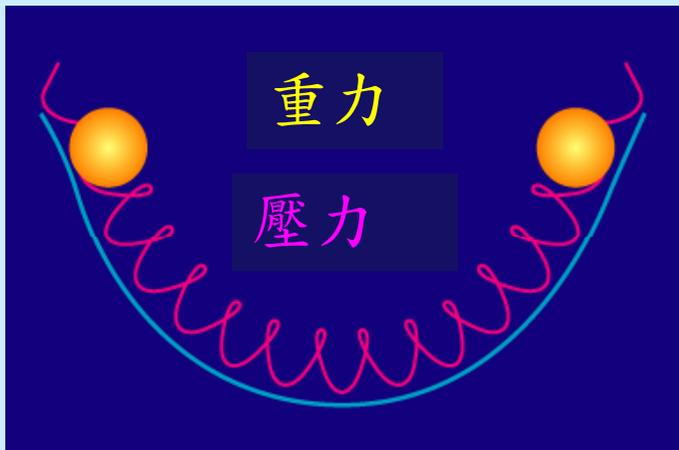
密度／壓力的波動

→ 重力
→ 光子壓力



類比：太陽的振動

密度稍高→重力（引力）稍大於週圍→密度增加→加熱→光子壓力增大→向外膨脹→簡振運動



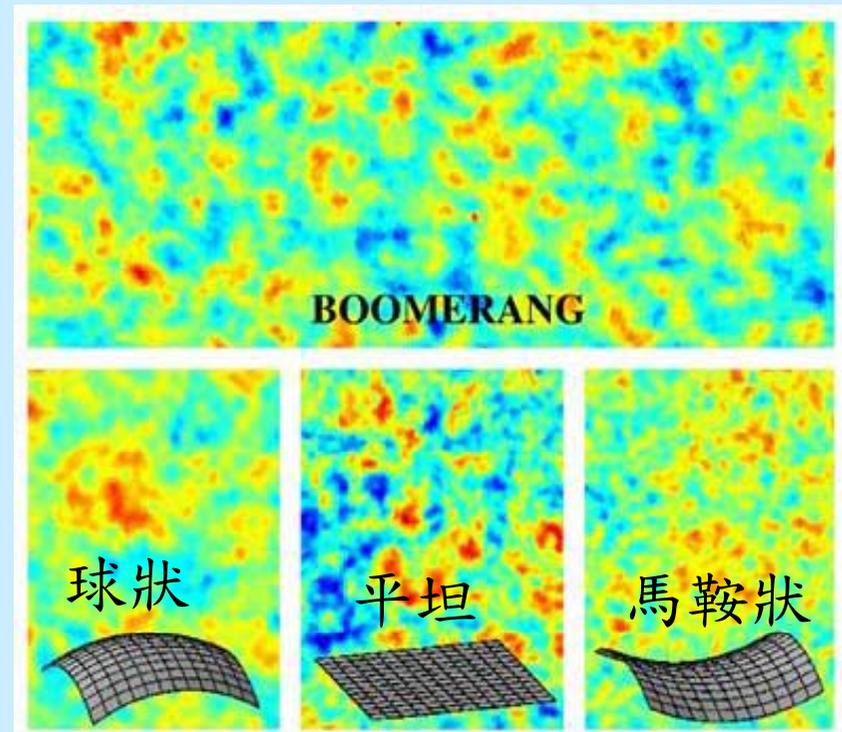
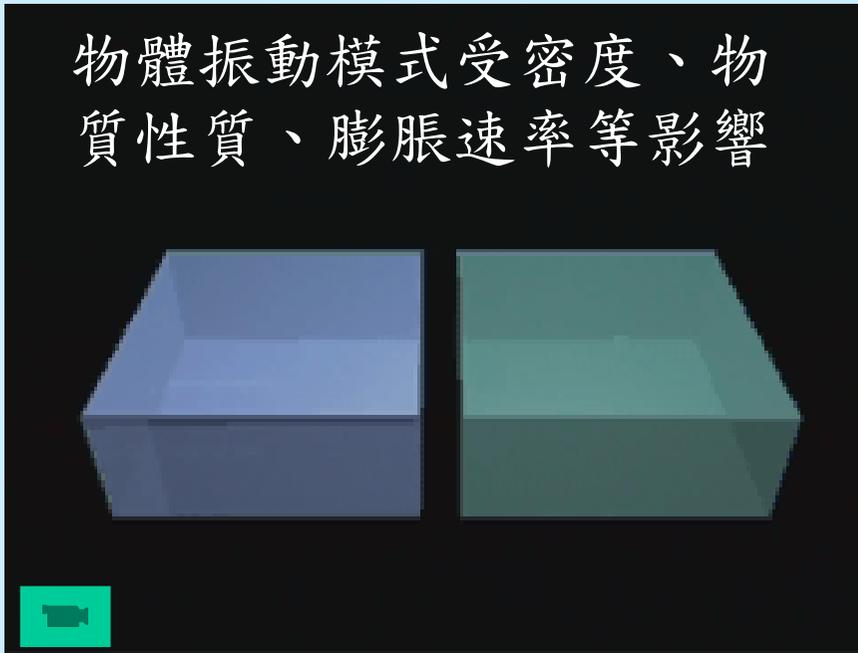
<http://background.uchicago.edu/~whu/Papers/HuW>

<http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/intermediate.html>

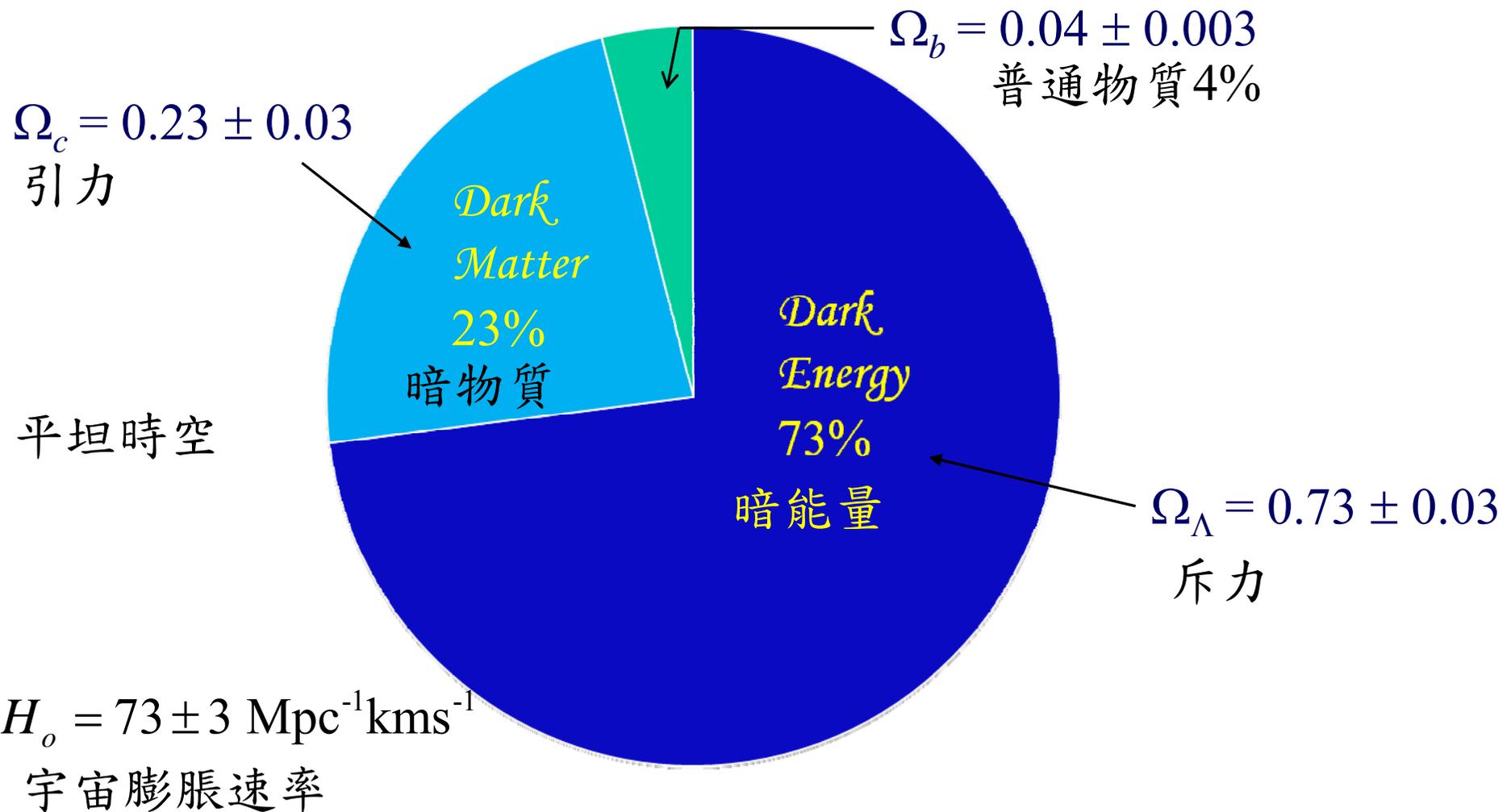
微波背景輻射帶有甚麼資料？

- 黑體輻射 $T = 2.725 \text{ K}$ → 宇宙早期溫度高 ($T \sim 3,000 \text{ K}$, $t \sim 400,000$ 年) → 大爆炸證據
- 背景輻射異向性 → 總物質密度，電子密度(=質子密度)，時空幾何，光子電子比例，宇宙膨脹速率，暗能量，...

物體振動模式受密度、物質性質、膨脹速率等影響



宇宙的質能密度分佈(今天)



由多個獨立的宇宙學觀測(如微波背景、物質分佈等)得知

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

http://www.nasa.gov/home/hqnews/2006/mar/HQ_06097_first_trillionth_WMAP.html

PLANCK

<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>

- 05/2009發射 → L2
- 正在搜集數據
- 解像度比 *WMAP* 高幾倍, 靈敏度 ~ 10倍

Estimated Instrument Performance Goals

Telescope	1.5 m (proj. aperture) aplanatic; shared focal plane; system emissivity 1%									
	Viewing direction offset 85° from spin axis; Field of View 8°									
Instrument	LFI			HFI						
Center Freq. (GHz)	30	44	70	100	143	217	353	545	857	
Detector Technology	HEMT LNA arrays			Bolometer arrays						
Detector Temperature	~20 K			0.1 K						
Cooling Requirements	H ₂ sorption cooler			H ₂ sorption + 4 K J-T stage + Dilution cooler						
Number of Unpol. Detectors	0	0	0	0	4	4	4	4	4	
Number of Linearly Polarised Detectors	4	6	12	8	8	8	8	0	0	
Angular Resolution (FWHM, arcmin)	33	24	14	9.5	7.1	5	5	5	5	
Bandwidth (GHz)	6	8.8	14	33	47	72	116	180	283	
Average $\Delta T/T_I^{\dagger}$ per pixel [#]	2.0	2.7	4.7	2.5	2.2	4.8	14.7	147	6700	
Average $\Delta T/T_{U,Q}^{\ddagger}$ per pixel [#]	2.8	3.9	6.7	4.0	4.2	9.8	29.8			

[†] Sensitivity (1 σ) to intensity (Stokes I) fluctuations observed on the sky, in thermodynamic temperature ($\times 10^{-6}$) units, relative to the average temperature of the CMB (2.73 K), achievable after two sky surveys (14 months).

[#] A pixel is a square whose side is the FWHM extent of the beam.

[‡] Sensitivity (1 σ) to polarised intensity (Stokes U and Q) fluctuations observed on the sky, in thermodynamic temperature ($\times 10^{-6}$) units, relative to the average temperature of the CMB (2.73 K), achievable after two sky surveys (14 months).

PLANCK

Table last updated Feb. 2004

esa ASTROPHYSICS

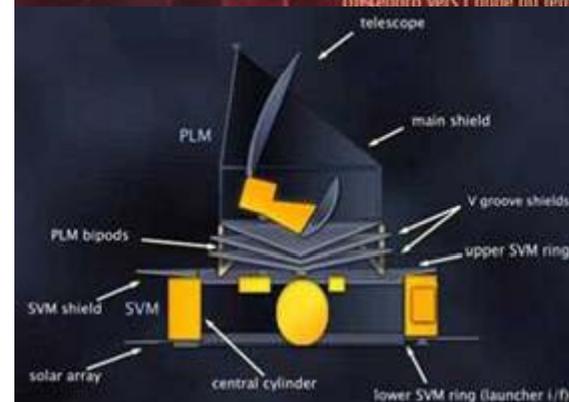


esa



PLANCK

Looking back to the dawn of time
L'innécessaire vers l'aube du temps



II. 懸案: 暗物質、暗能量、反物質

宇宙簡史

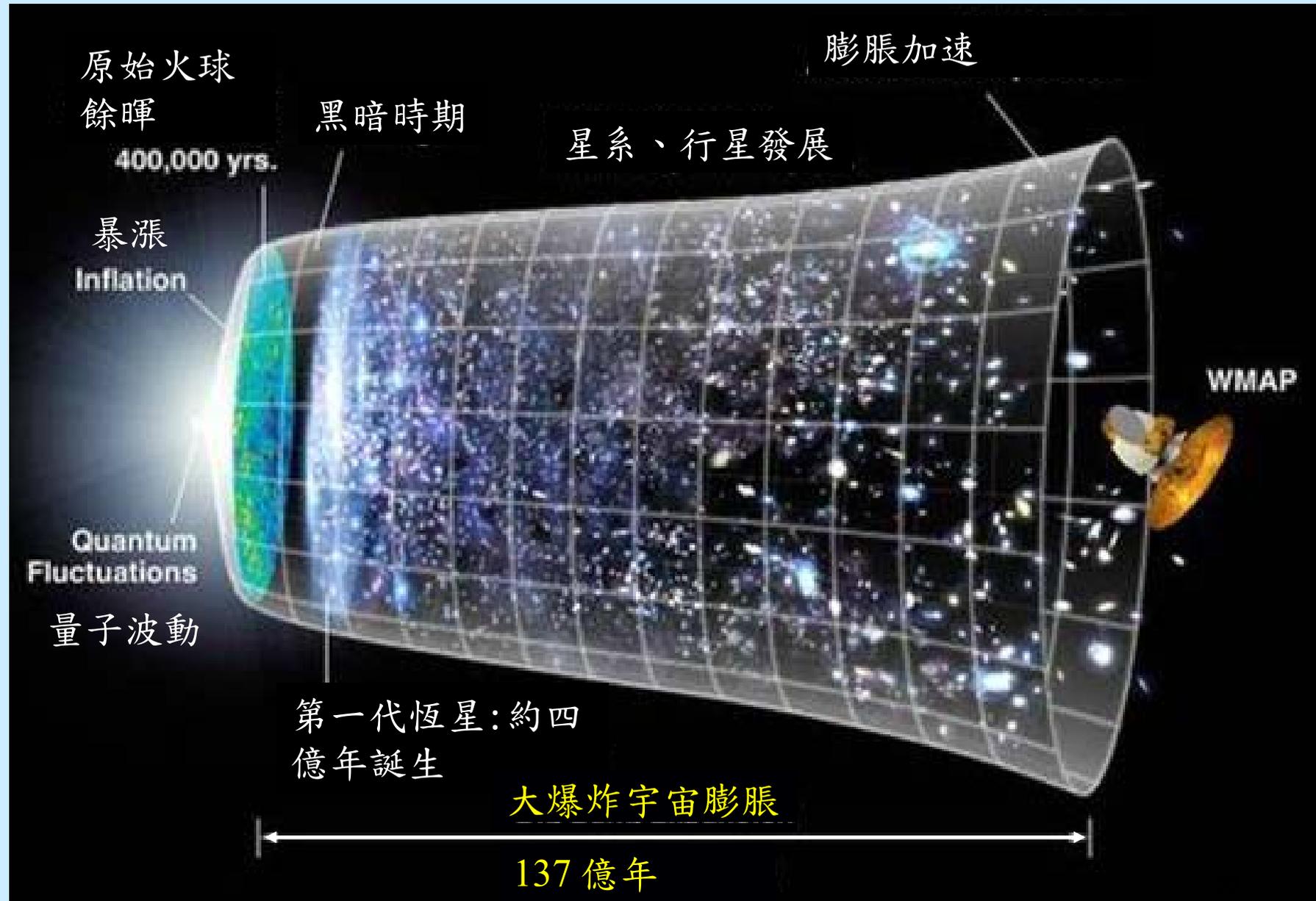
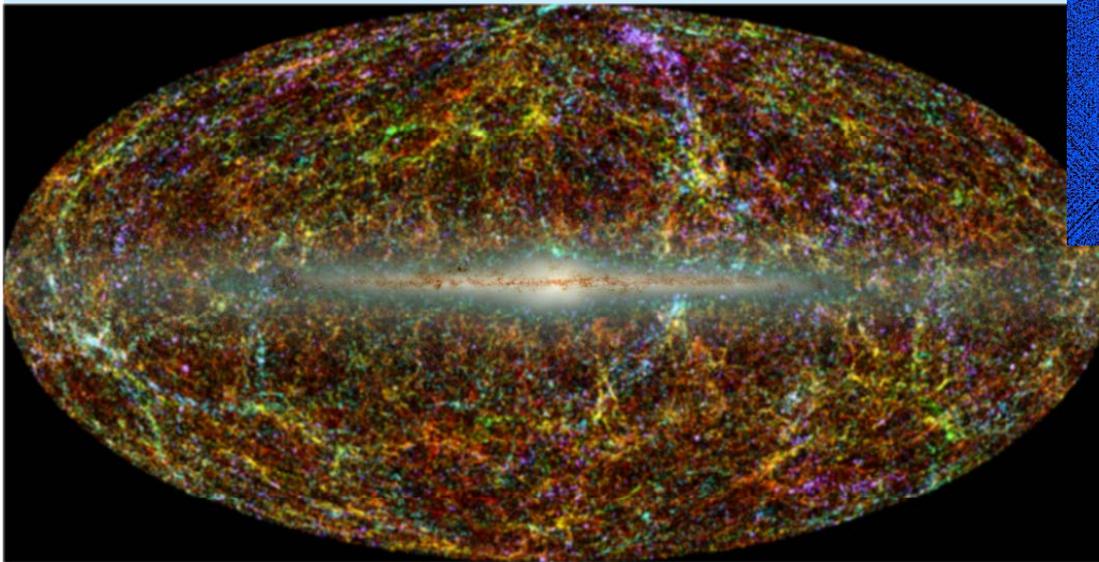
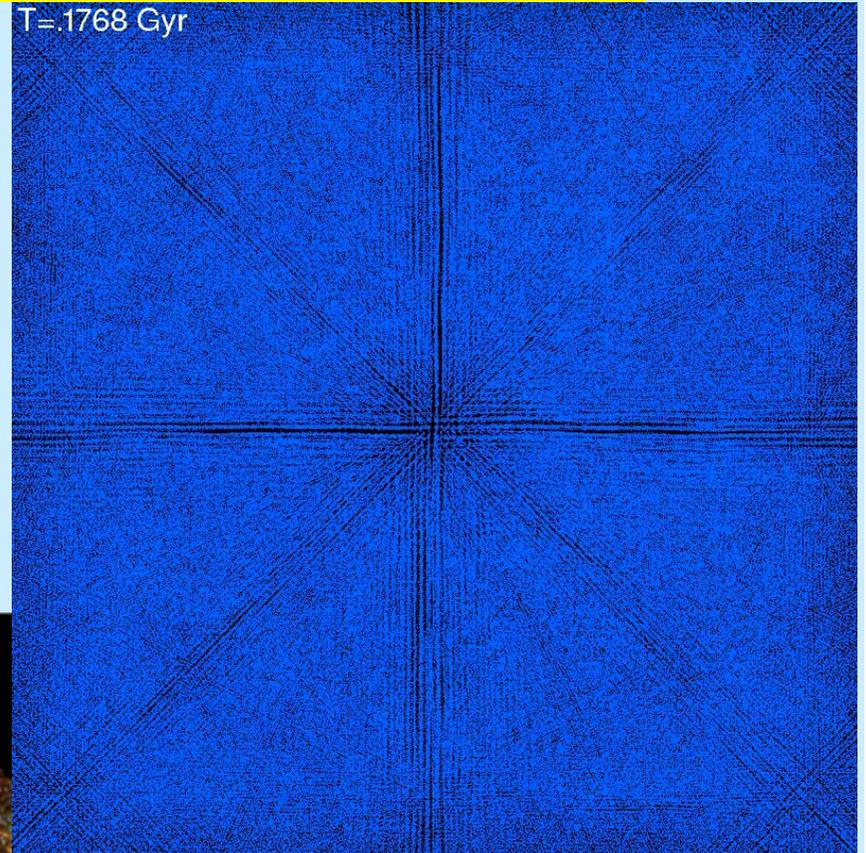


Figure courtesy NASA/WMAP

暗物質與宇宙結構演化

- 宇宙最早期物質均勻分佈
- 今天卻有大小結構(如星系、星系團) → 結構演化
- 重力: 初始些微密度不勻被倍大
- 但須有大量暗物質 (~6x 可見物質)
- 可見物質促成的結構遠少於觀測



Structure formation animation by Cheng Dalong

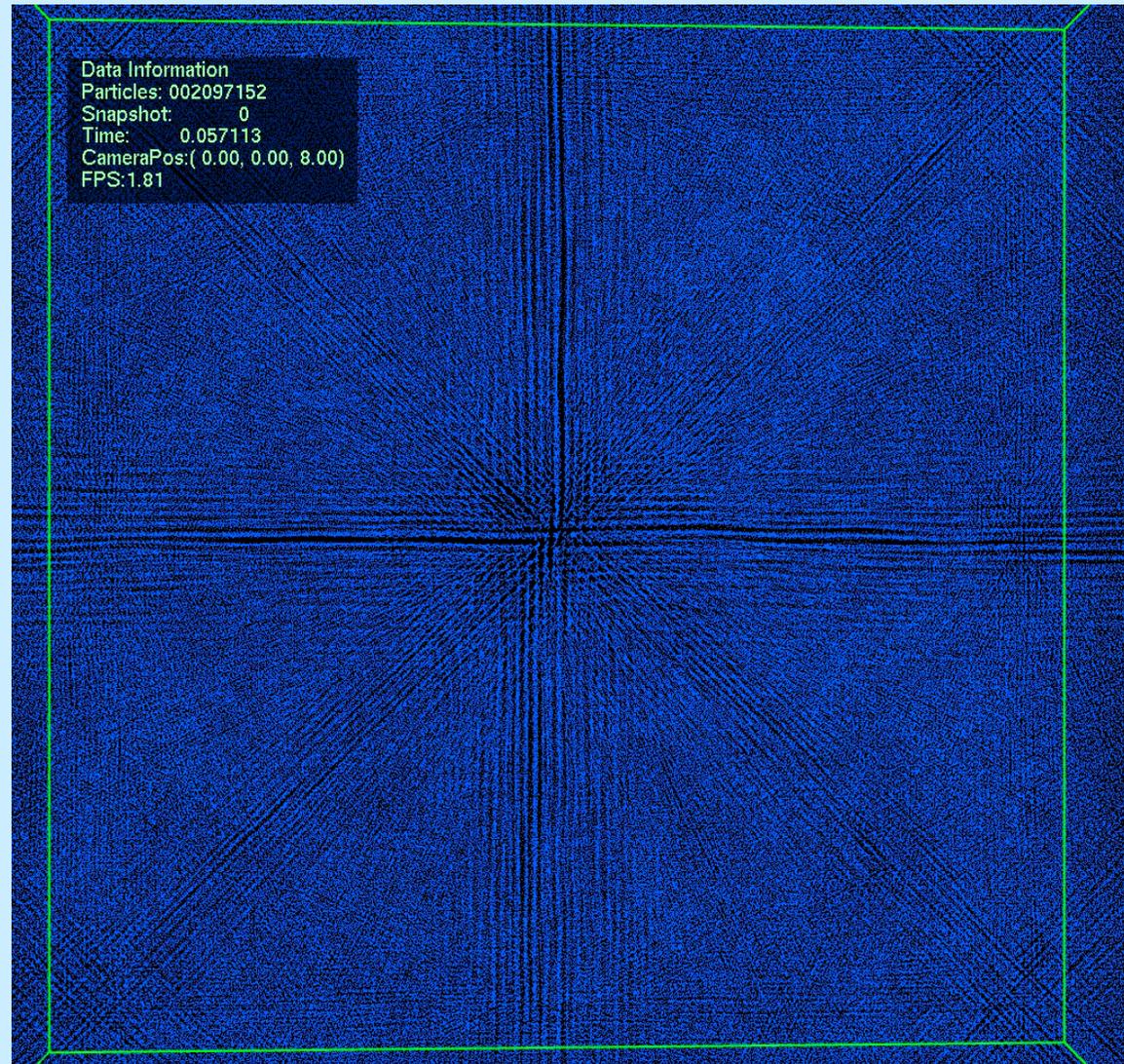
粒子模擬: 粒子以牛頓
重力相互作用

真實觀測數據: <https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/2mass/>

暗物質存在的證據

- 若沒有暗物質：
- 不會形成星系團
- 星系亦不能凝聚
- 宇宙結構演化不符觀測

程大龍計算
及製作
~ 8億光年
 2.1×10^6 粒子



懸案 1: 暗物質是甚麼?

未知□架!

暗物質分類

暗物質粒子: 絕大部份為理論提出但未證實存在的粒子

- 熱暗物質 (*Hot dark matter*) = 質量小、速度~光速的粒子 (如中微子)

- 冷暗物質 (*Cold dark matter*) = 大質量、速度低的粒子

(如各種超對稱粒子 (*supersymmetric partners*))

= *Weakly Interacting Massive Particles*

← 新類型物質，總量
~6x 已知普通物質

↓
有重力及弱作用(?),
沒有強作用及電磁作用

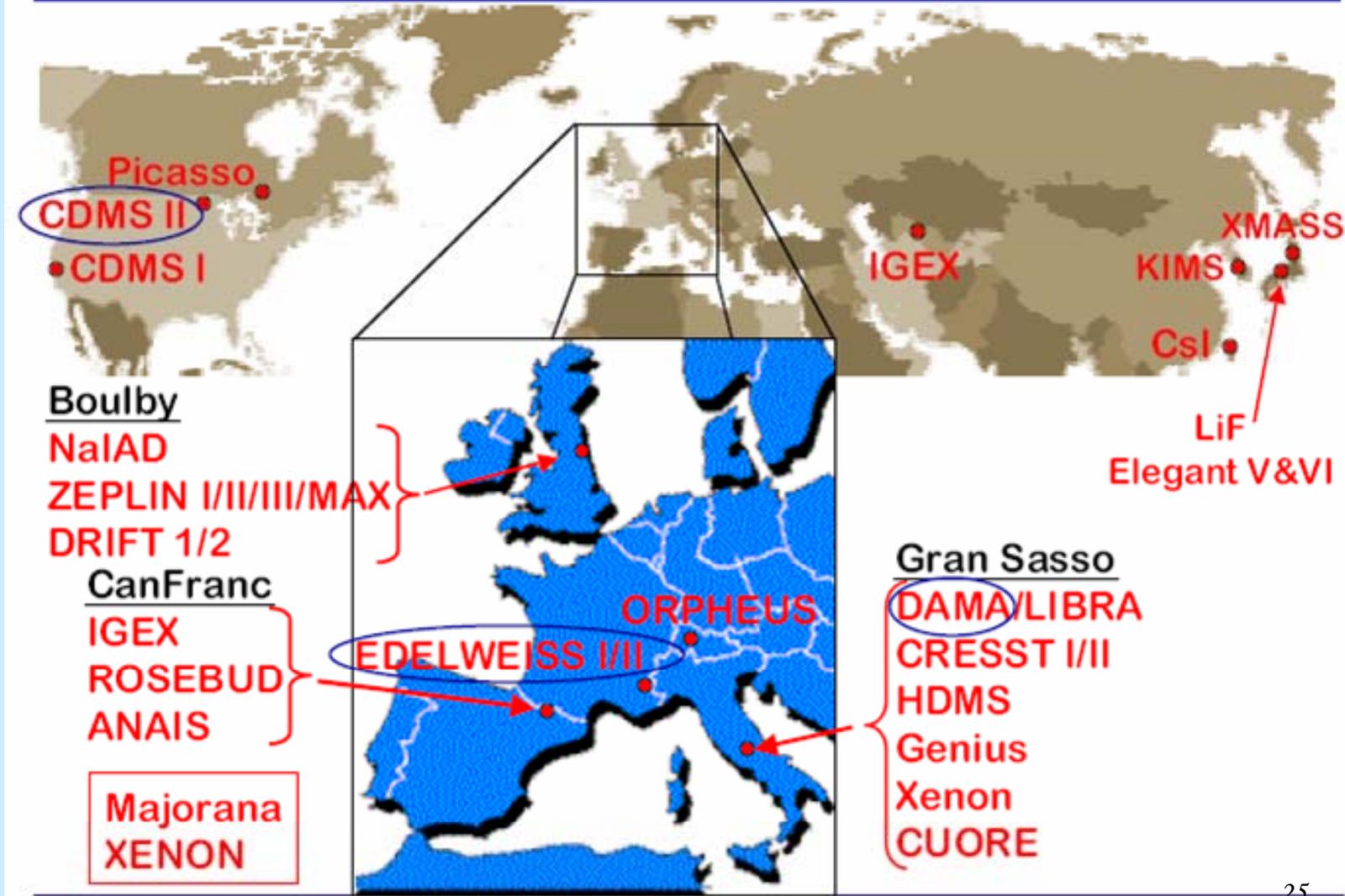
↓
不能靠電磁波(如光)
直接觀測

非重子暗物質不是暗黑色，
而是透明的!



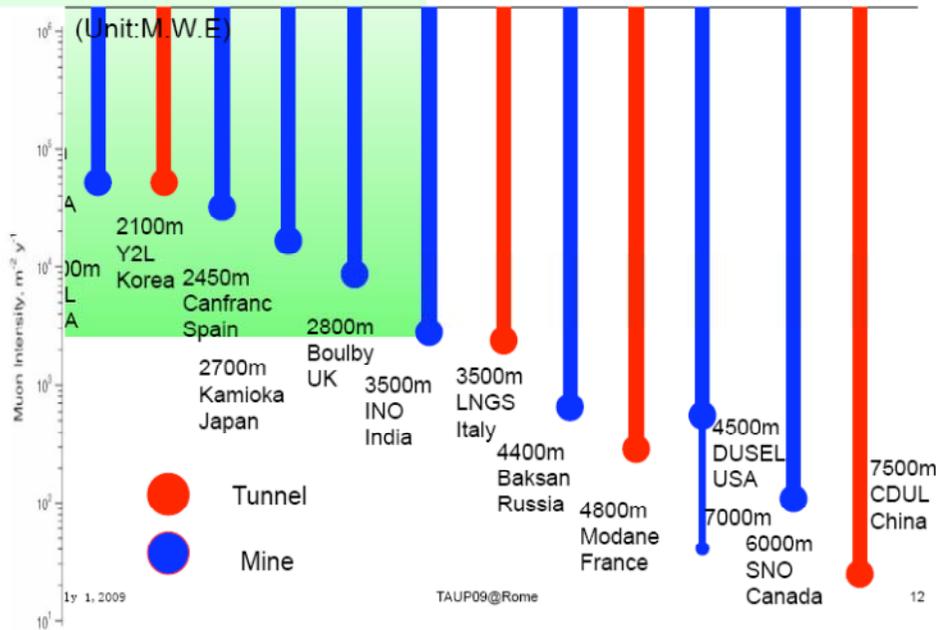
總應有暗物質在附近!

WIMP-detection Experiments Worldwide



中國地下實驗室

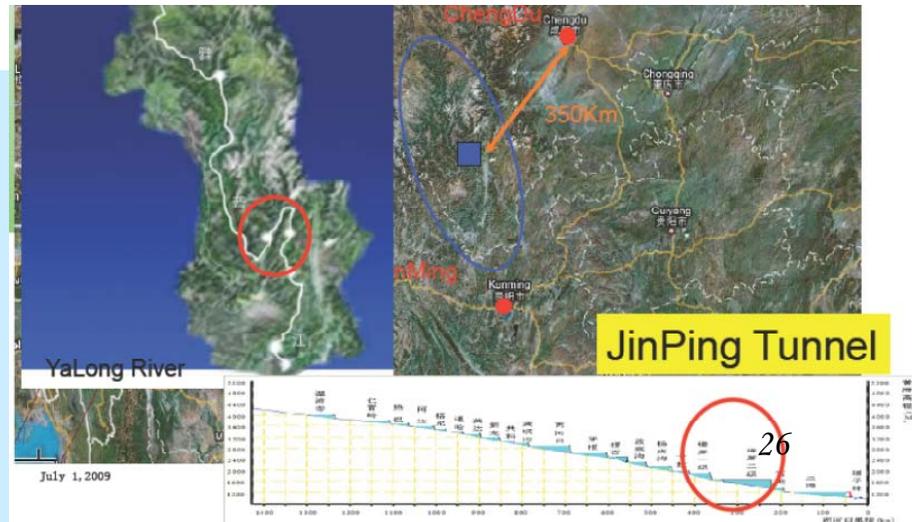
Comparison of main ULs in the world



China Darkmatter EXperiment (CDEX)

J. P. Cheng, Z. Deng, D. Han, K.J. Kang, Y.J. Li, Y.L. Li, Y. Wang,
 Q.F. Wu, Q. Yue, Y.G. Yang, Z. Zhang
 (Tsinghua University, THU)
 K.X. Jing, C.J. Tang, Z.Y. Tang, H.Y. Xing, C. W. Yang, J.J. Zhu
 (Sichuan University, SCU)
 X.Q. Li, Y. Xu, C.X. Yu
 (Nankai University, NKU)
 K.J. Dong, X.C. Ruan, Z.Y. Zhou
 (China Institute of Atomic Energy, CIAE)
 J. Li
 (Institute of High Energy Physics, IHEP)
 Y.H. Chen, B.M. Shen, J.M. Wang, S.Y. Wu, X.H. Zeng
 (Ertan Hydropower Development Company, EHDC)
K.M. Cheung, S.C. Lee
 (National Tsinghua University, NTHU)

H.T. Wang (TEXONO Collaboration), S.K. Kim (KIMS Collaboration) PI

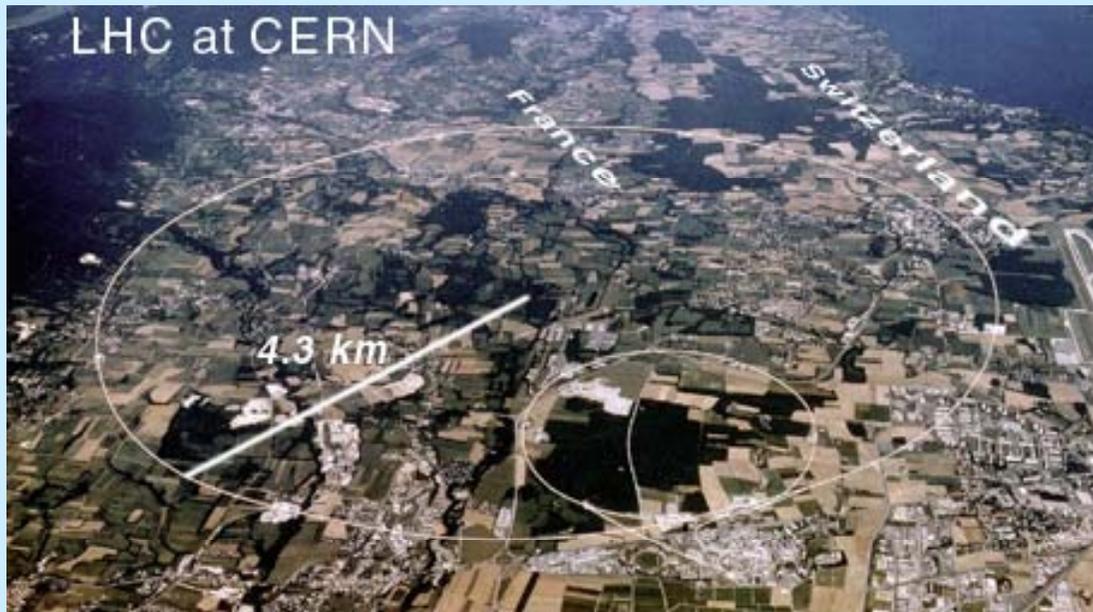


Taken from Qian Yue's talk:

<http://taup2009.lngs.infn.it/slides/jul1/yue.pdf>

Large Hadron Collider

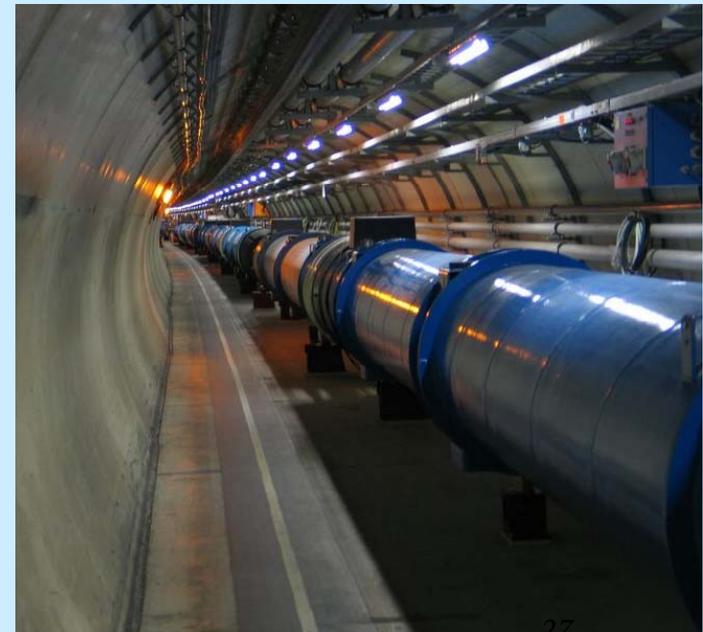
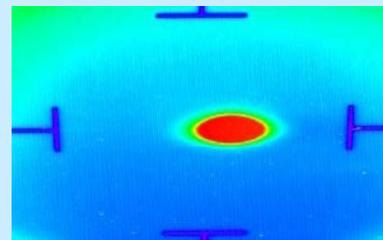
大型強子對撞器



CERN: 世界最大的基礎物理實驗室



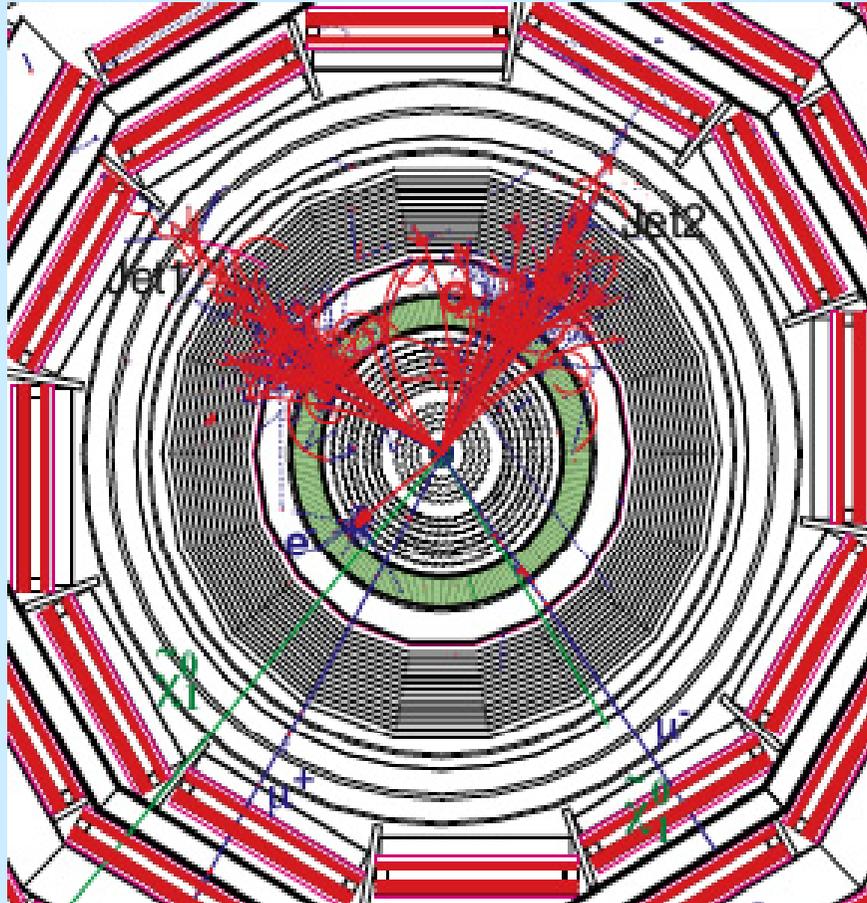
質子加速至 $v = 99.999999\% c$ (7 TeV)
粒子束: 2808小束 $\times 1.15 \times 10^{11}$ 質子 (mm x cm)
總能量 = 362 MJ
~ 時速 150 km 火車的動能
可把 500kg 的銅燒溶



LHC: 87.5 億美元建造費

<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>

LHC 製造超對稱粒子



找尋「失蹤」能量

例: 粒子撞擊後產生兩粒穩定
超對稱粒子，離開探測器

$$E \rightarrow mc^2$$

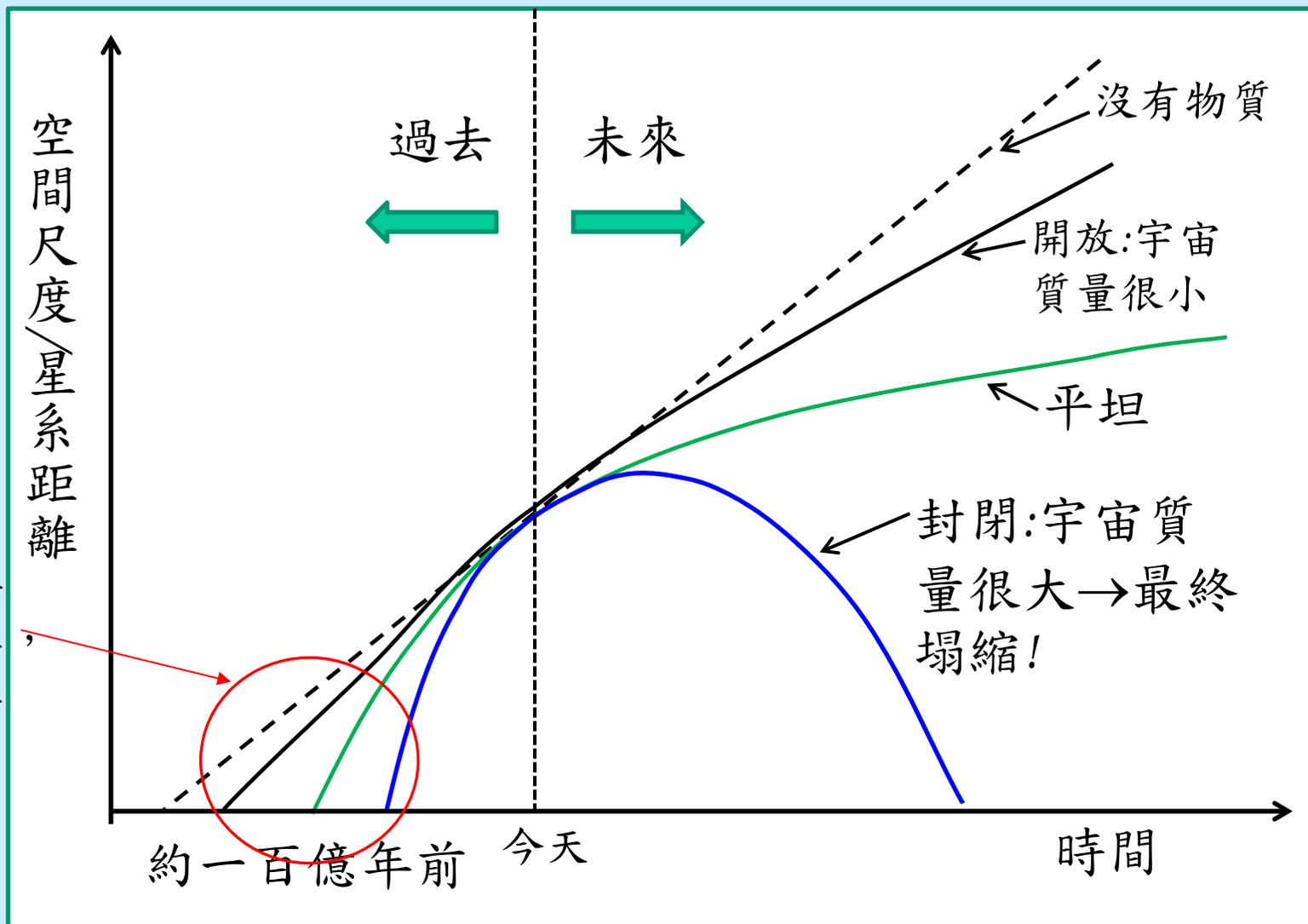
Illustration downloaded from CMS website

<http://cms.web.cern.ch/cms/Physics/Supersymmetry/CMS.html>

懸案 2: 暗能量是甚麼?

宇宙的歸宿

初始條件: 宇宙在某一時刻開始膨脹 (大爆炸)



欲知未來、
還看過去

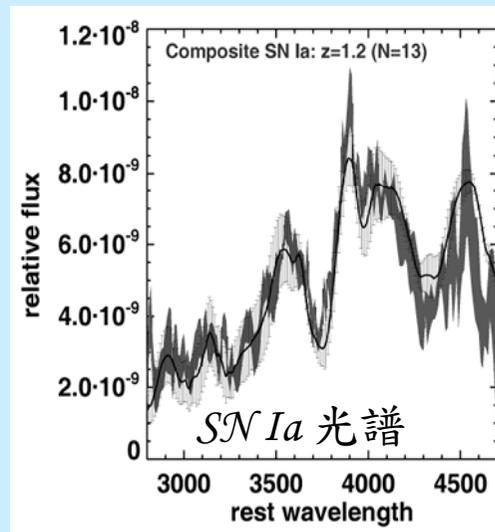
量度宇宙早期膨脹速率與今天速率比較比較

→ 觀測遙遠星體!

IA類超新星

- 由同一質量、結構的星體開始爆炸
- →標準而明亮
- →適合作遠距離觀測
- 以光譜及光度變化曲線驗證超新星類型
- 可觀測至約一百億光年→量度約一百億年前宇宙膨脹的速率，再與今天比較

*Photo/animation
courtesy NASA/STScI*



*SN2011fe in M101:
22-24/08/2011*

Peter Nugent / Palomar Transient Factory

發現暗能量

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/



Saul Perlmutter

Brian Schmidt

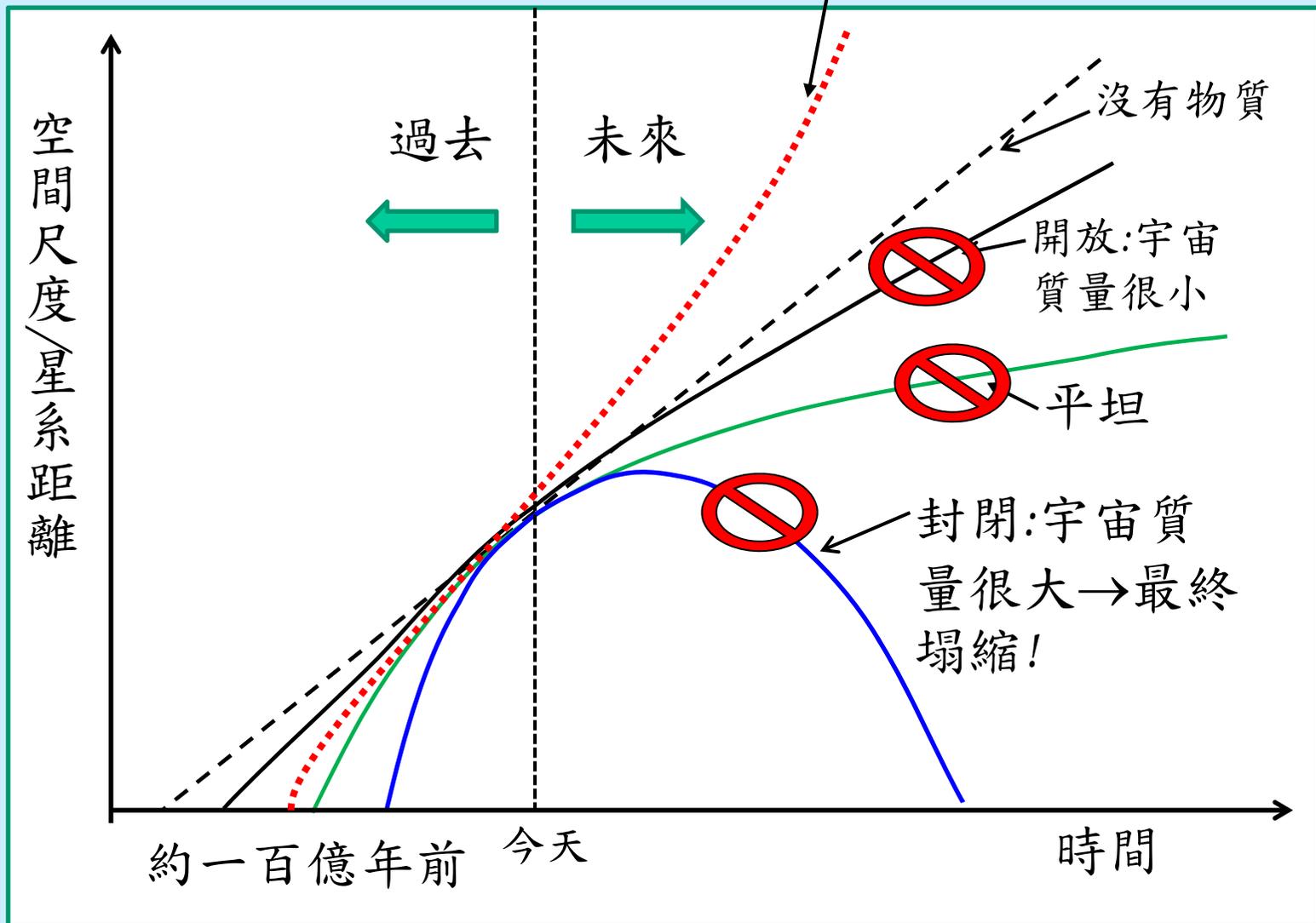
Adam Riess

Nobel Prize 2011: "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

宇宙的歸宿

都錯!

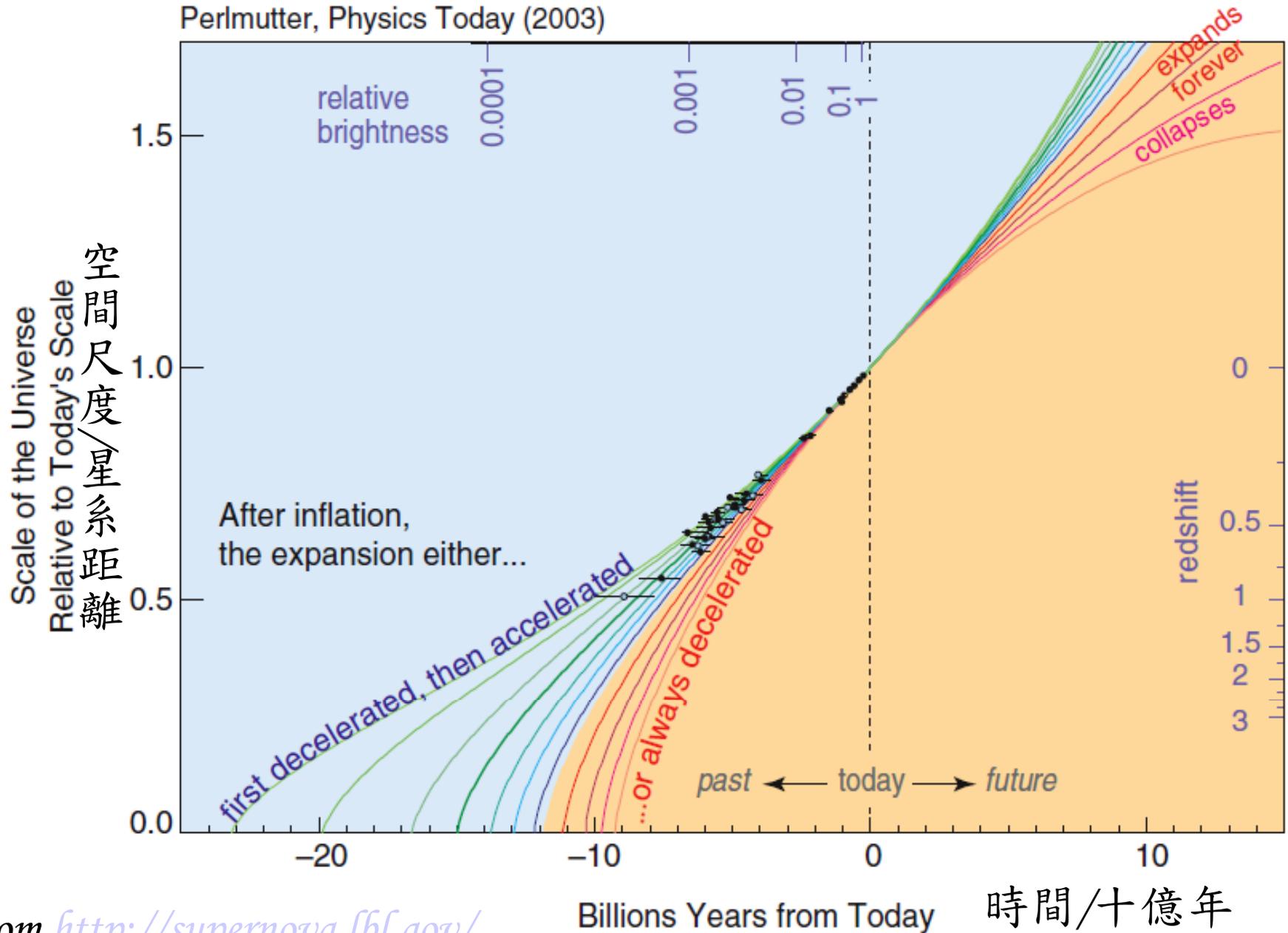
膨脹加速



Expansion History of the Universe

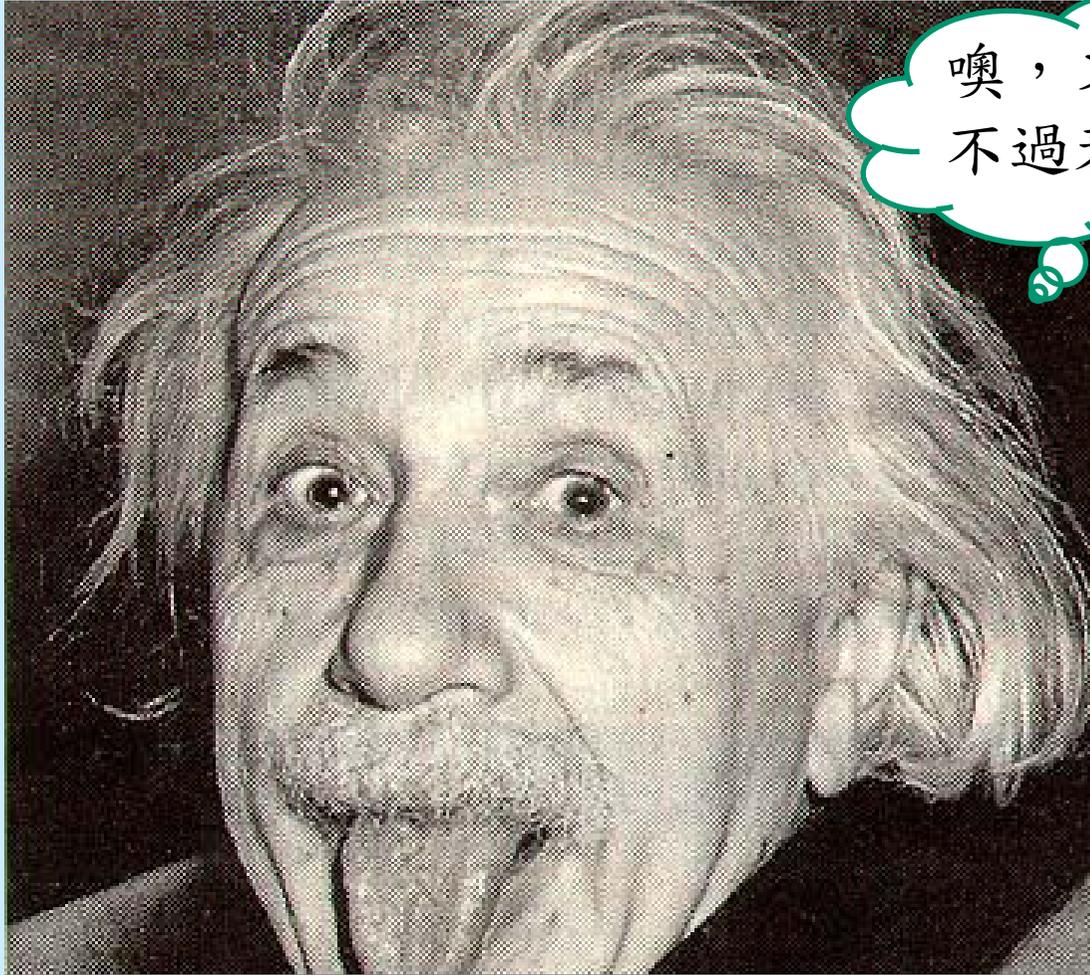
宇宙膨脹歷史

Perlmutter, Physics Today (2003)



From <http://supernova.lbl.gov/>

愛因思坦的錯誤



噢，又衰咗！
不過衰衰得正！

愛因思坦引入的宇宙常數(真空斥力)，數值調大兩倍多，便符合觀測數據

$$\Lambda = 0.73$$



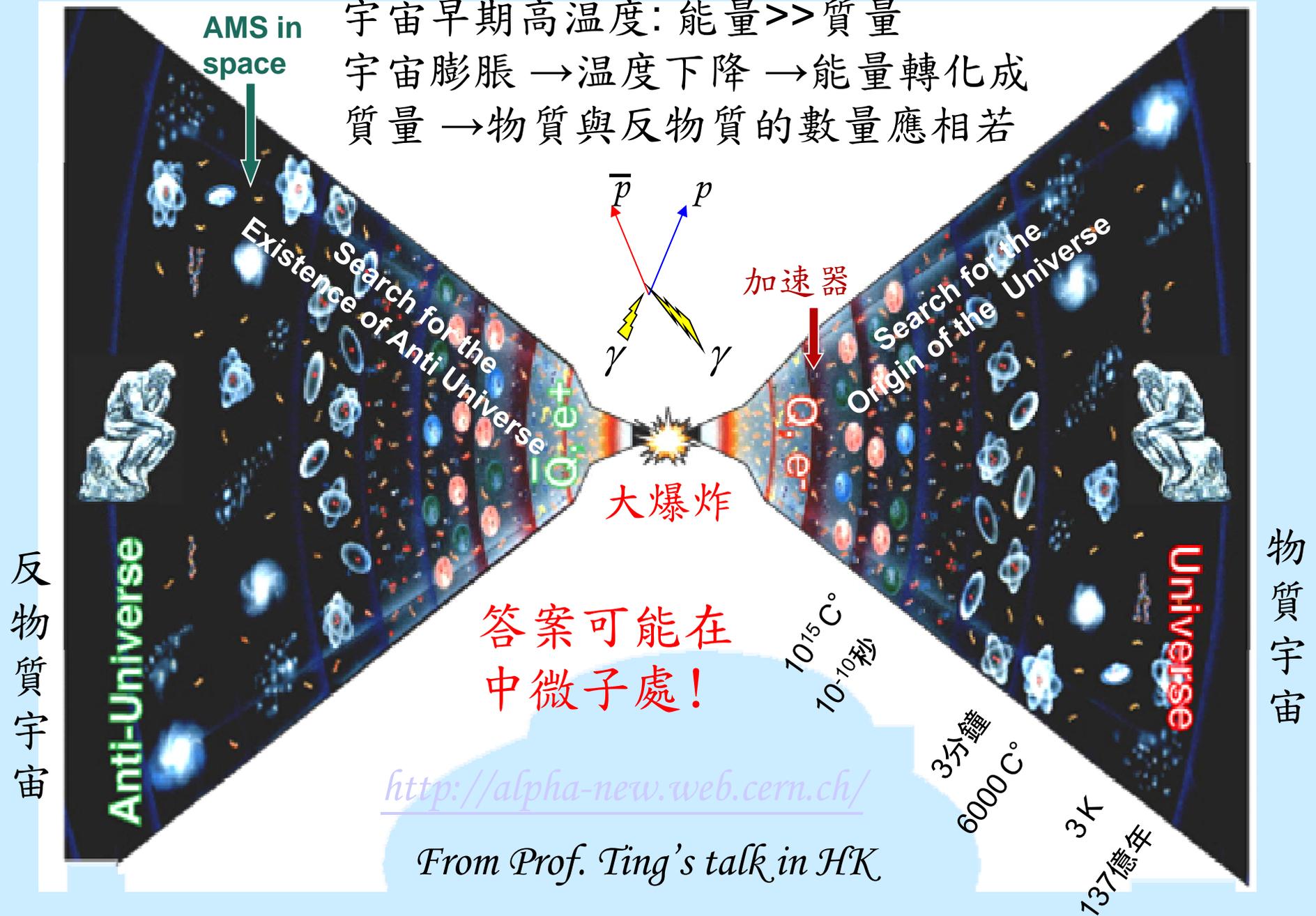
真空斥力大
於萬有引力

以為引入宇宙常數是一生最大錯誤才
是一生最大錯誤。

懸案3:反物質失蹤!

大件事：反物質失蹤了！

宇宙早期高溫度：能量 \gg 質量
宇宙膨脹 \rightarrow 溫度下降 \rightarrow 能量轉化成
質量 \rightarrow 物質與反物質的數量應相若

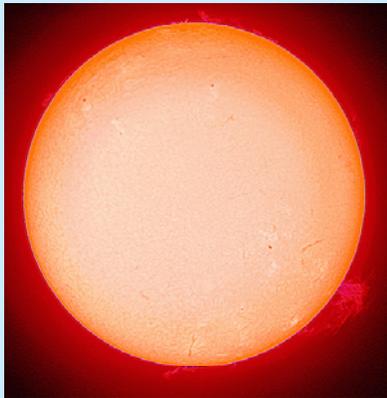


III. 中大的相關研究

中大混合星 *CUHK Hybrid stars*

一顆白矮星或中子星吞下一些暗物質後果如何？

白矮星=約太陽質量的恆星，核燃料燒完後塌縮至地球大小的星球



黃家榮



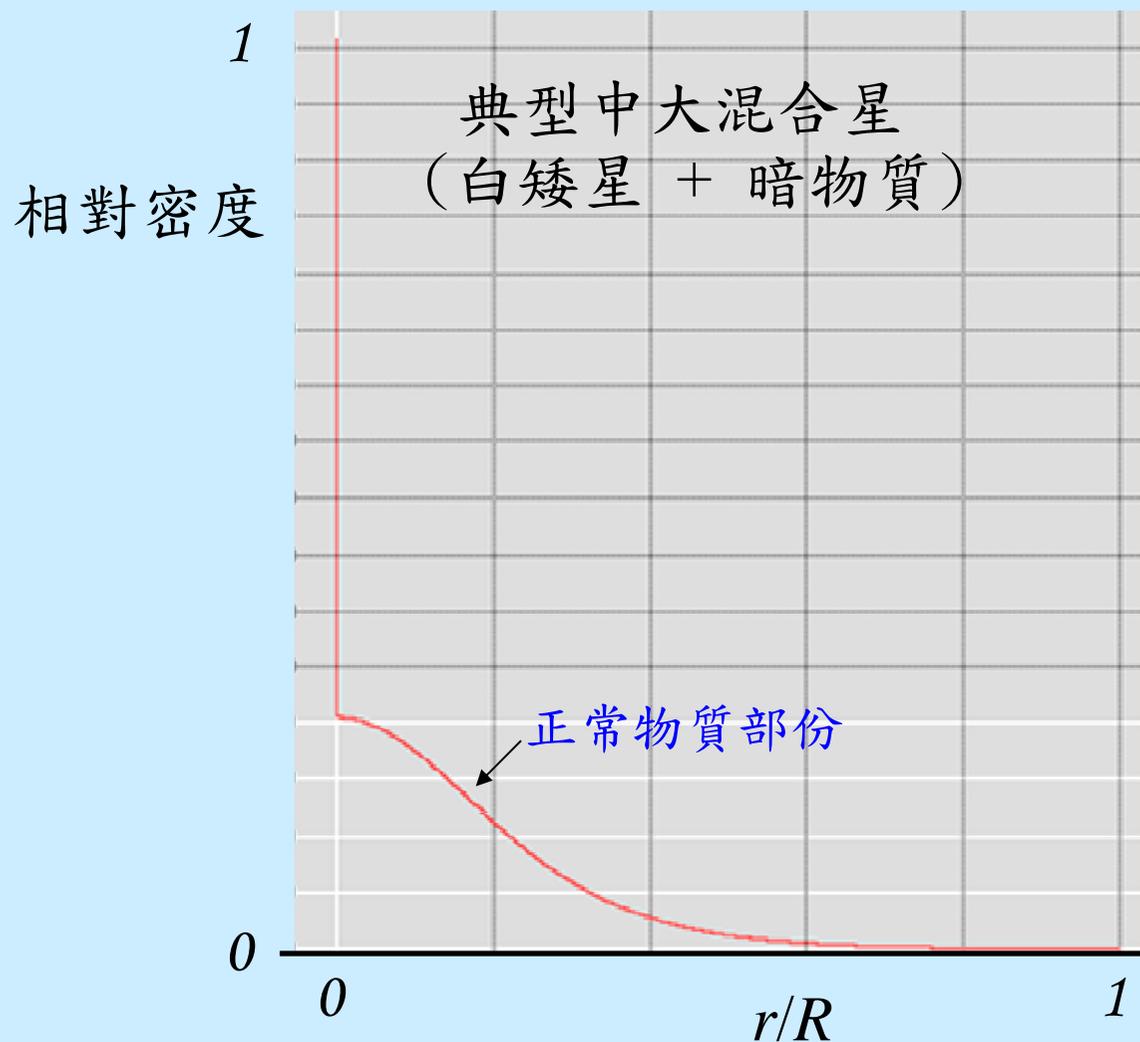
梁成志



須解廣義相對論二元流體方程

<http://www.youtube.com/watch?v=4wV^EhafuF7A&feature=related>

中大混合星



- $m \sim 10-1000$ GeV

- 中心密度以暗物質為主:
 $10^{15} - 10^{24}$ g/cc

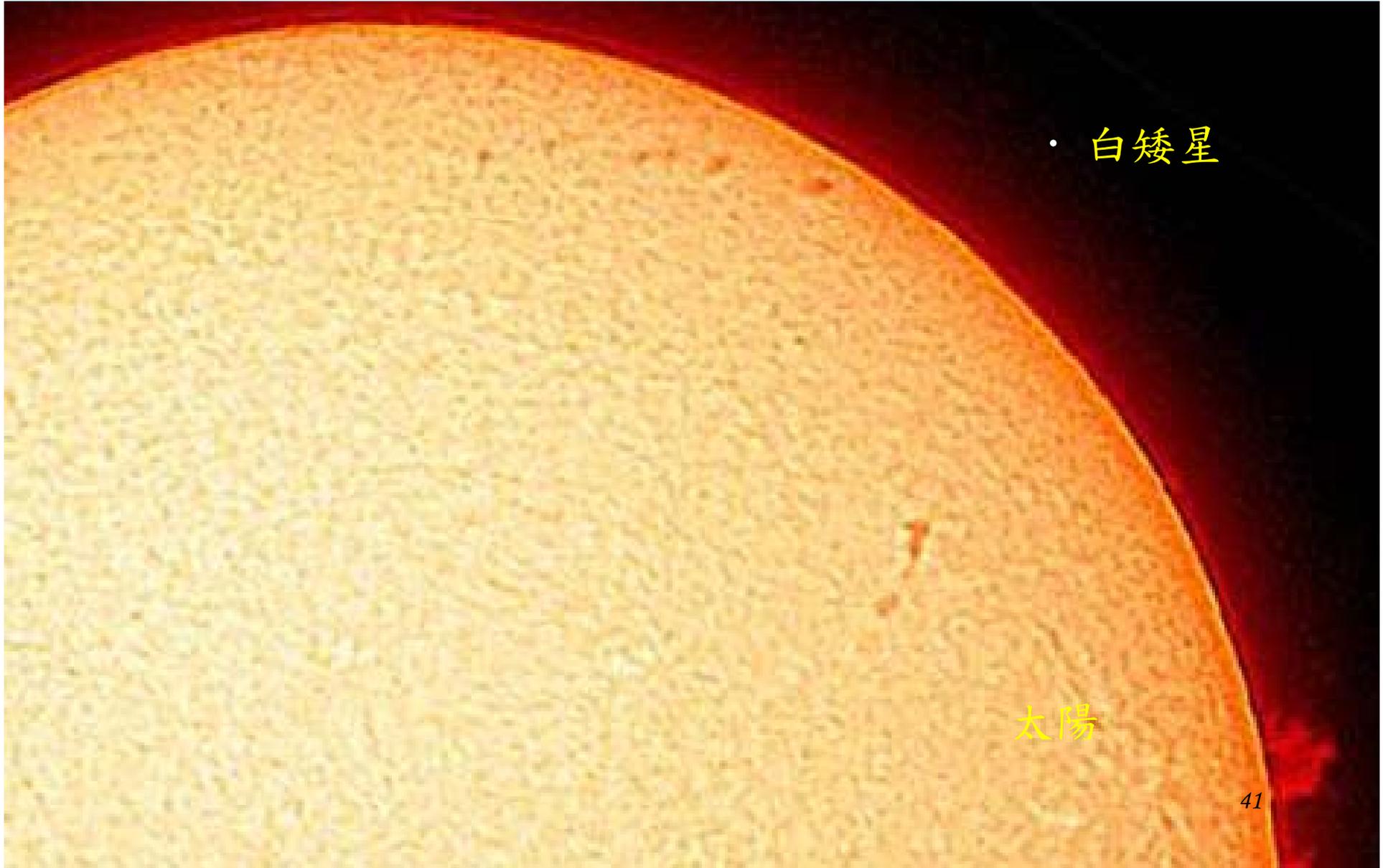
- 暗物質藏於中心
1 cm - 10 m

- 暗物質引力拉扯正常
物質分佈: 吞下 $7 \times 10^{-7} M_{\odot}$
暗物質後白矮星半徑由
幾千公里縮小至幾百公
里 → 新型致密星!

致密星 *Compact Stars*

- 白矮星

太陽

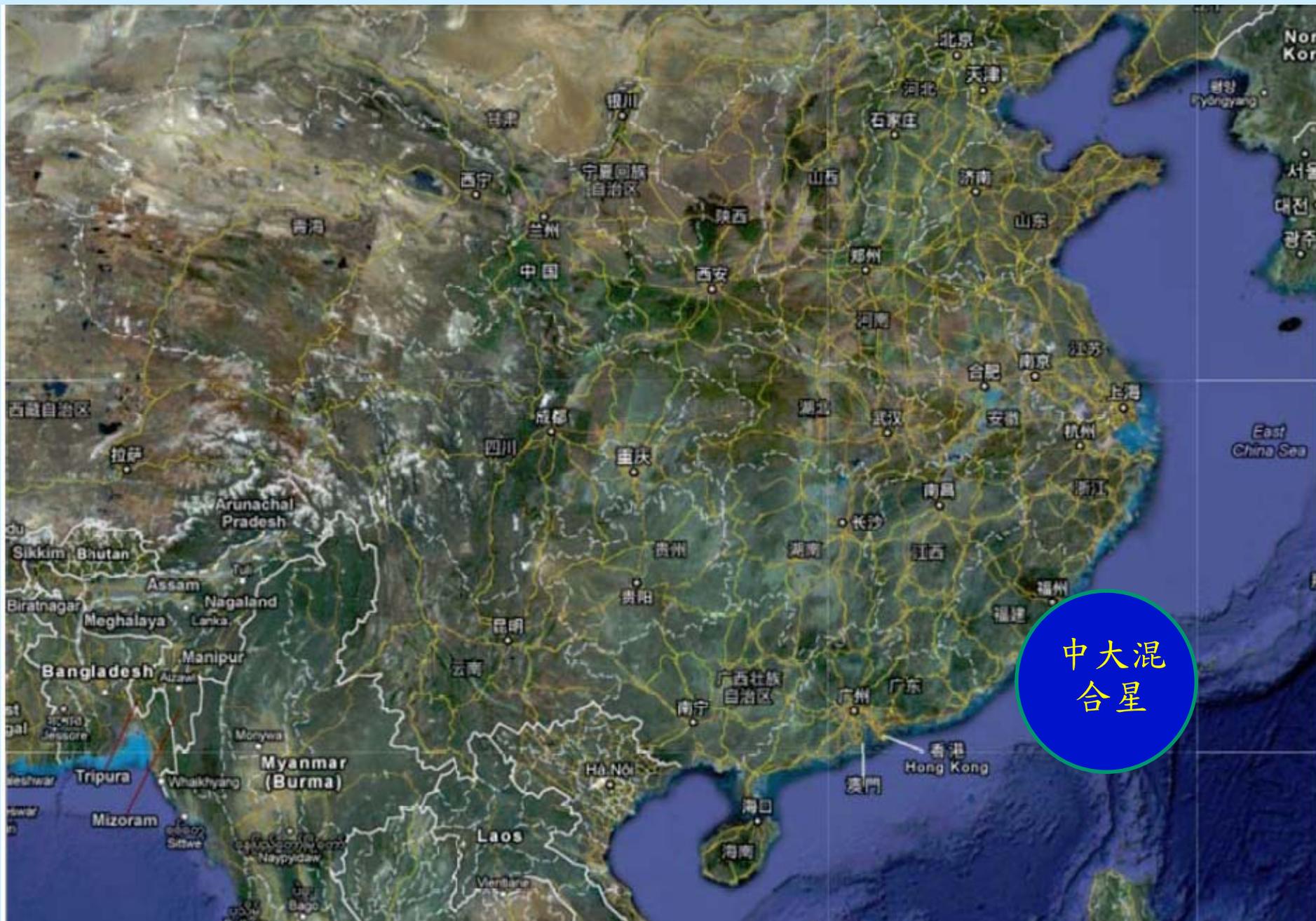


致密星 *Compact Stars*

中大混合星

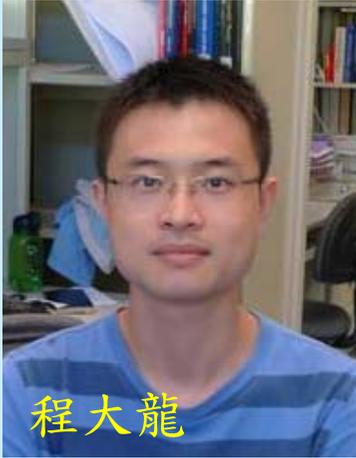


白矮星



中大混合星

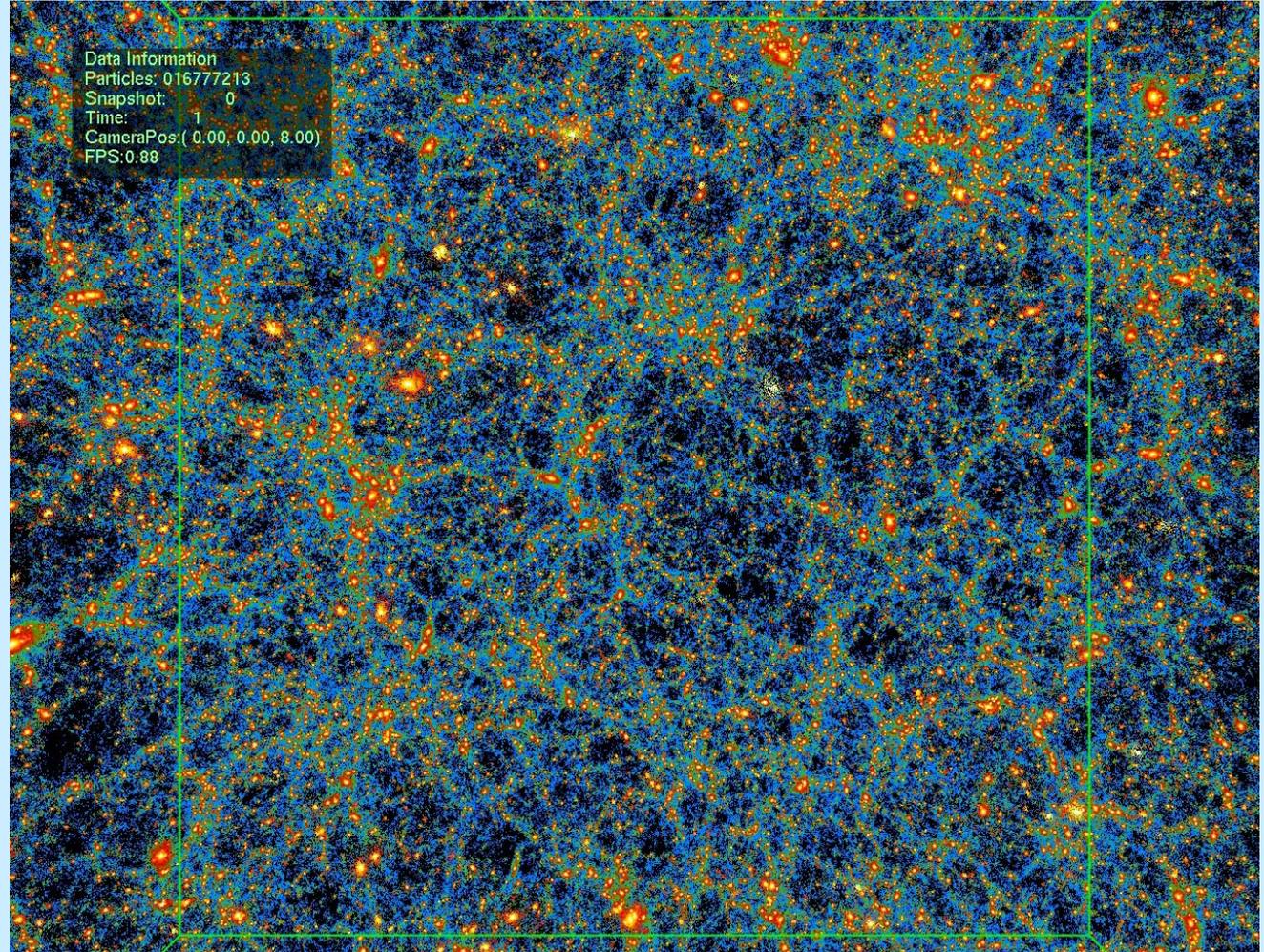
暗物質與宇宙結構演化



程大龍

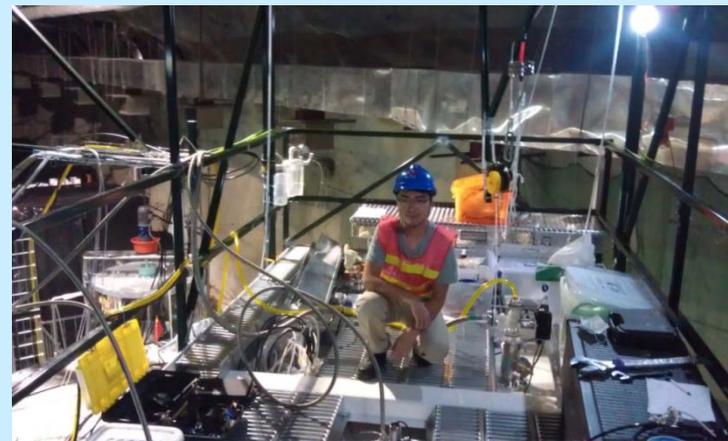
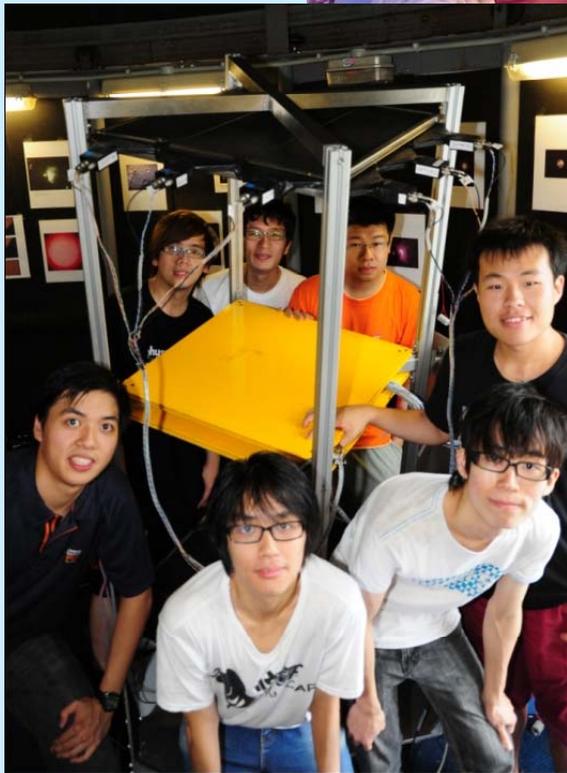
暗物質性質影響宇宙演化!

大龍:利用電算模擬，計算暗物質衰變對結構演化的影響



標準宇宙模型, 範圍~10億光年, 17×10^6 粒子

中微子獵人在香港

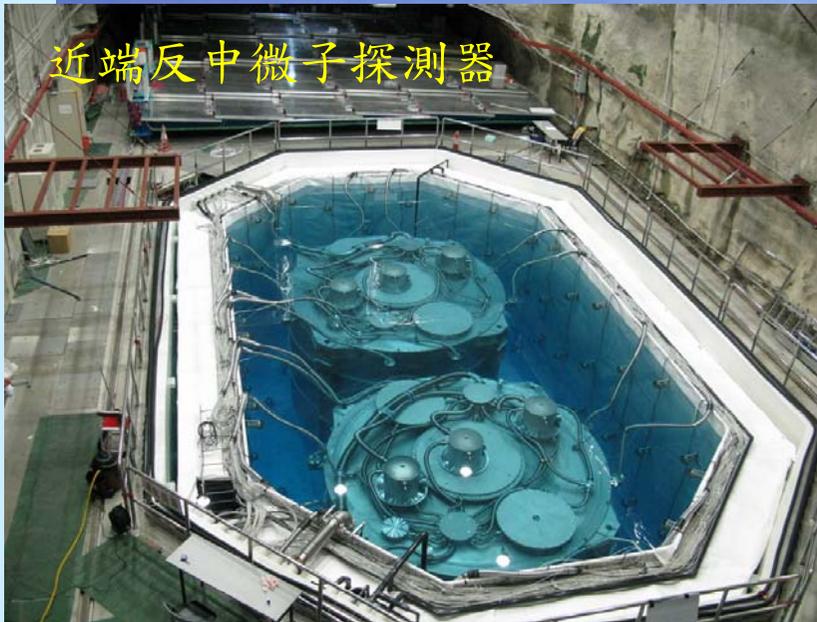


大亞灣中微子振蕩實驗

準確量度中微子的一個重要參數 θ_{13} 。

有助解答反物質失蹤之謎! <http://www.pressdisplay.com/pressdisplay/zt/viewer.aspx>

高功率，高山 = 中微子實驗理想地點
每秒產生 10^{21} 反中微子! 阻隔大部份宇宙射線



<http://tech.hexun.com.tw/2011-09-03/133075412.html>

宇宙學新世紀

- 宇宙簡史
- 宇宙學新工具: 微波背景輻射、超新星、無線電波、重力透鏡、...
- 懸案: 暗物質、暗能量、反物質、...
- 中大的相關研究

宇宙學新世紀

朱明中

香港中文大學物理系

研資局公眾講座 07/07/2012

Milky Way

Canon EOS 7D
EF-S 10-20mm, F/3.5 @ 10mm,
Tracked with Eyeball CD-1
240s @ ISO 1600 x 10 = 40min
Photo By T. P. Wong @29th May
NT, Australia