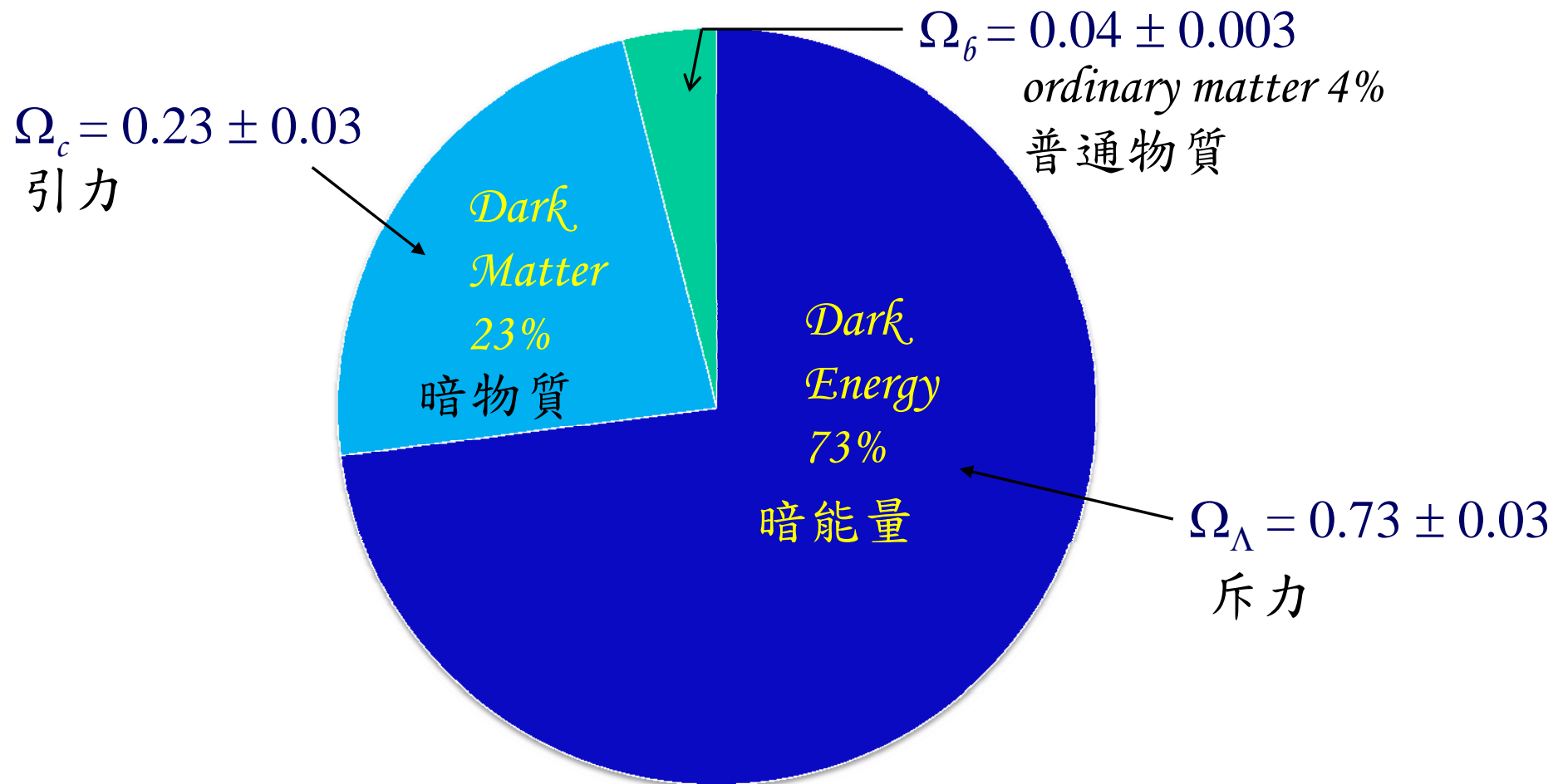


宇宙的隱秘

朱明中
香港中文大學物理系
30/3/2012

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

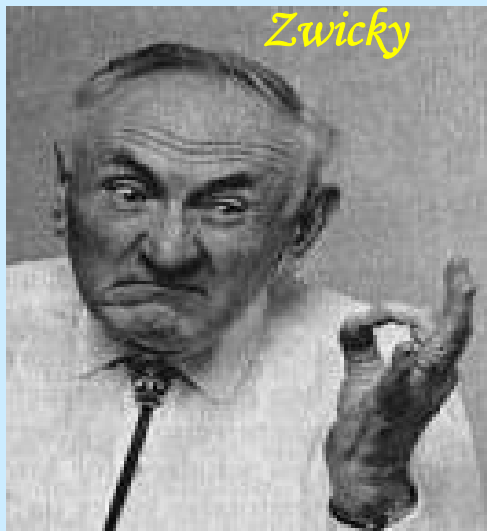
宇宙的隱秘

- 暗物質存在的證據
- 暗物質是甚麼?
- 搜尋暗物質
- 中大的相關研究

I. 暗物質存在的證據

發現暗物質

- 從星系團內各星系的運動速度可計算星系團的總質量 M
- *Zwicky, Smith (1930s)*: 觀測室女座及后髮座星系團
→ $M \gg M_{\text{vis}}$ (可見質量，以星系亮度推算)

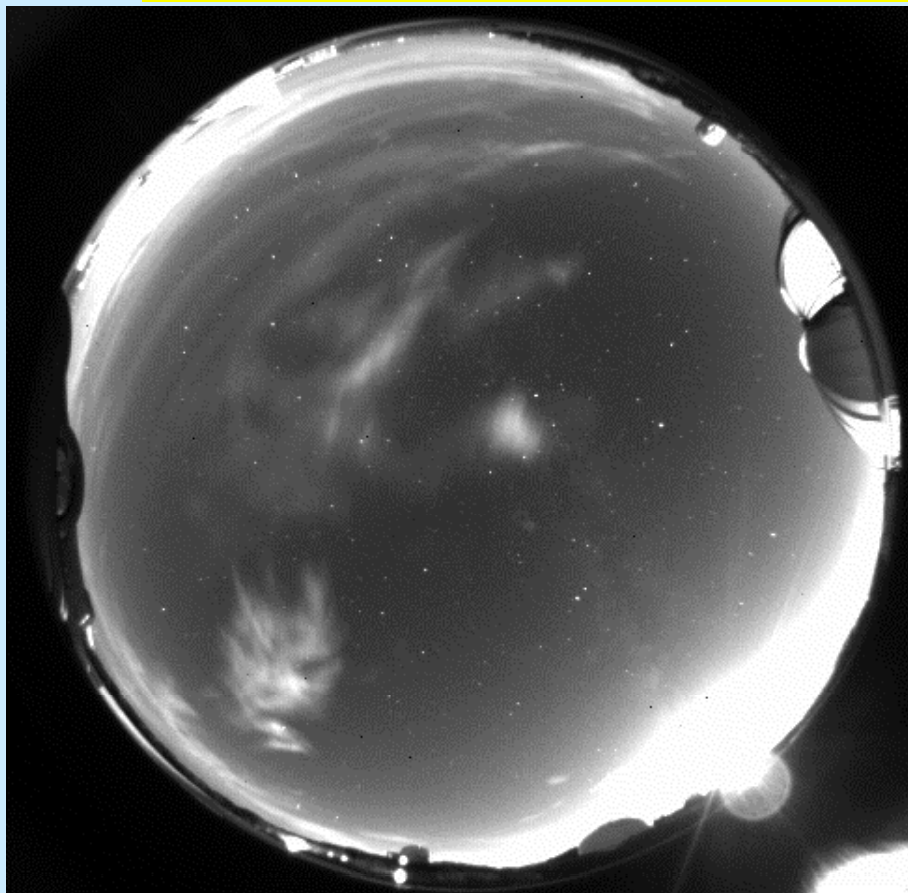


星系速度應低於逃逸速度

$$v < \text{escape velocity} = \sqrt{2GM / R}$$

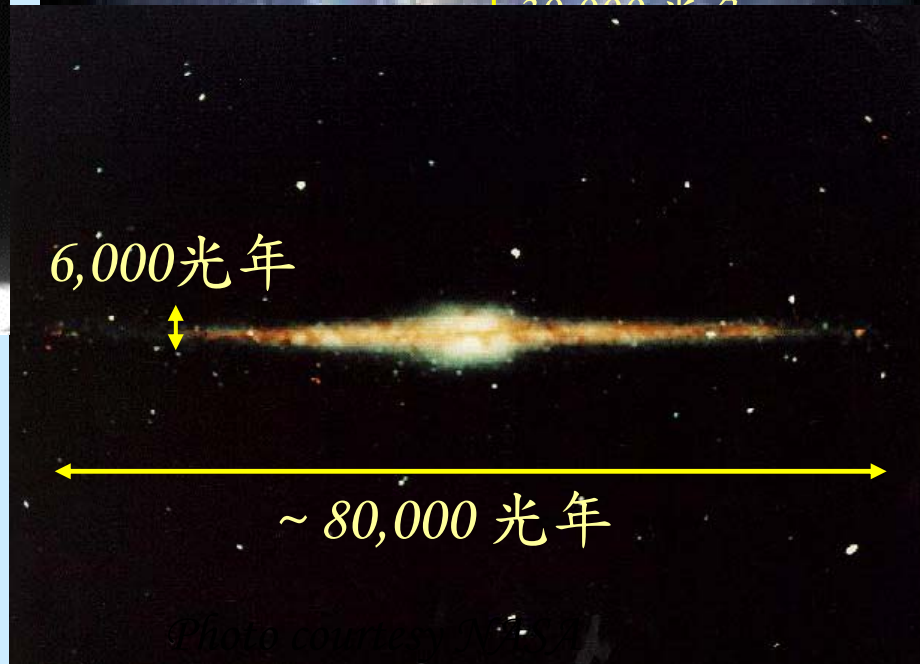
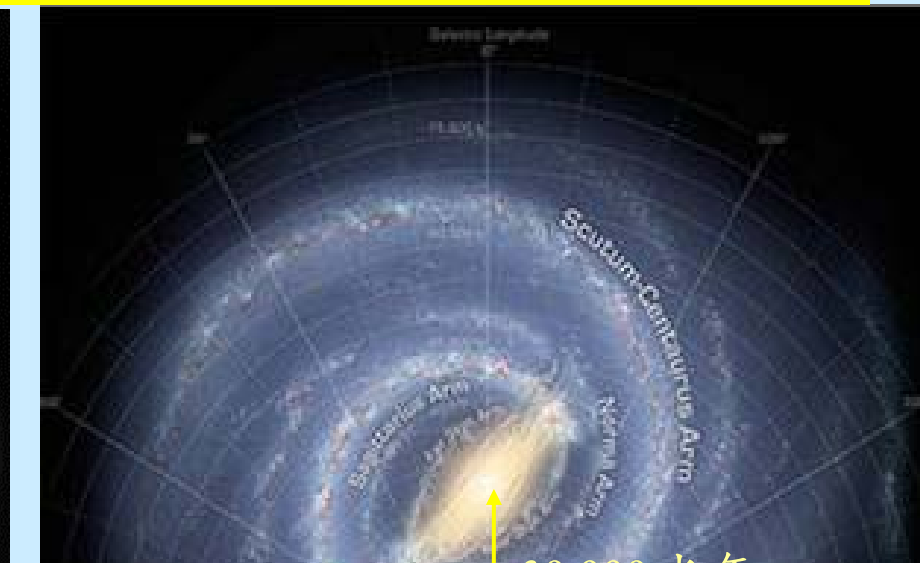
$$\Rightarrow M > v^2 R / 2G$$

銀河 *Milky Way*

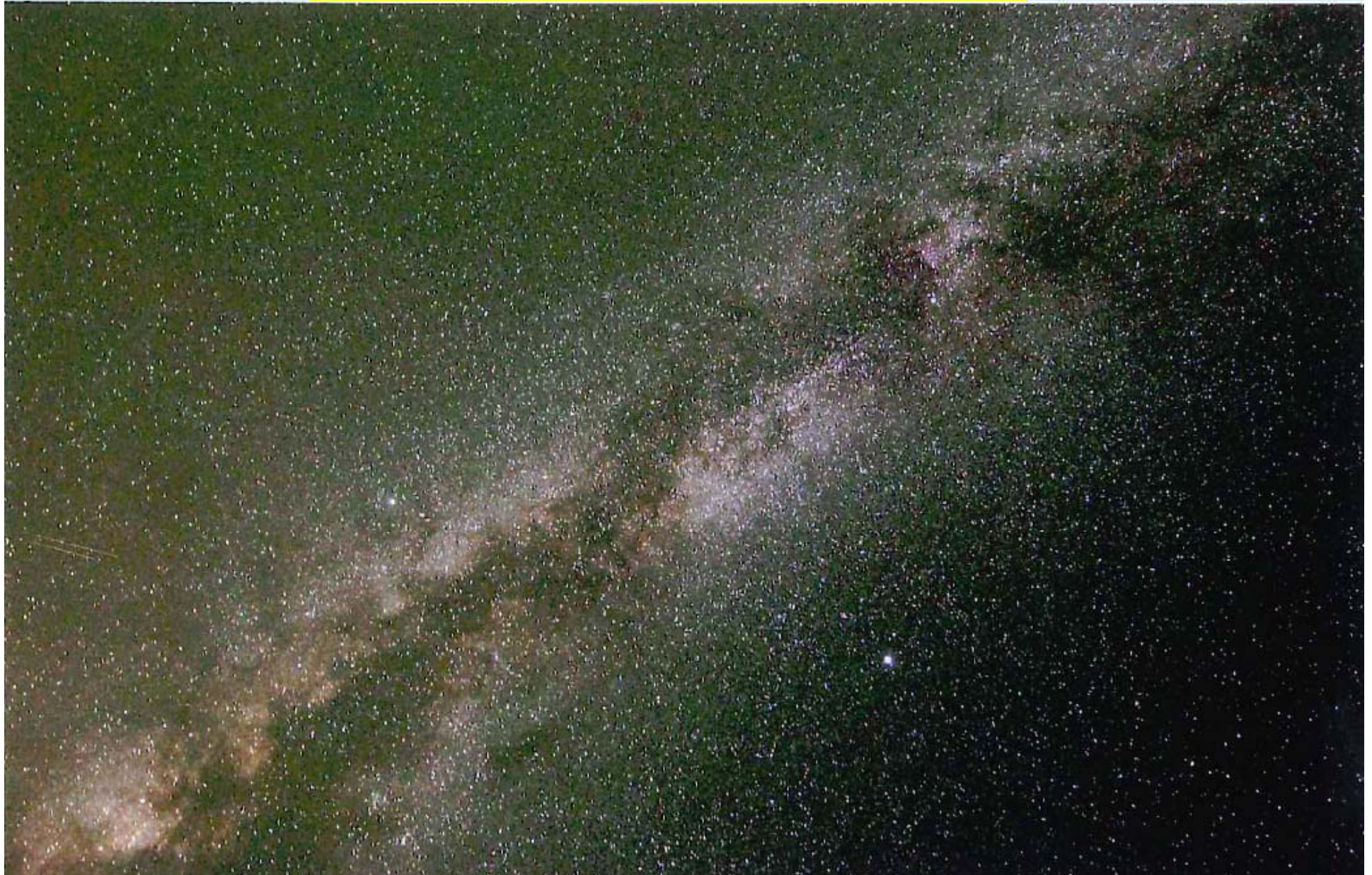


Milky Way as seen in Arizona

銀河~ 一千億恆星(太陽是其中毫不特別的一顆) + 星團、星雲



銀河



By Sor Bob, taken in Inner Mongolia

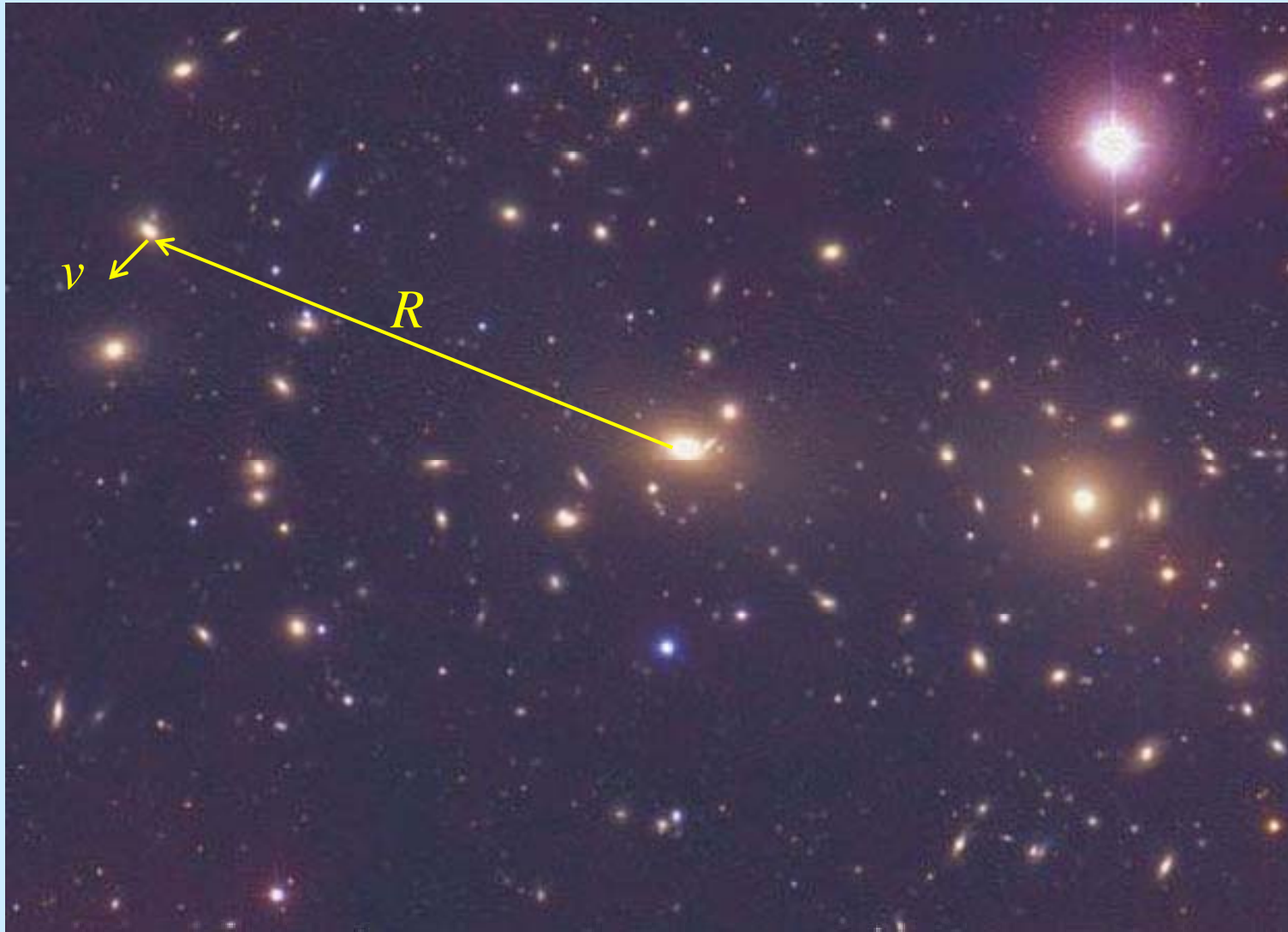
島宇宙

可見宇宙:

~千億星系，銀河系為典型

每星系約千億恆星，太陽為典型

后髮座星系團 *Coma Cluster*



>1000光亮
星系
距離~三億
光年

Photo credit: [O. Lopez-Cruz \(INAOEP\) et al., AURA, NOAO, NSF](#)
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap020203.html>

室女座星系團 *Virgo Cluster*



最近地球之星系團(六千萬光年)。超過二千個星系。銀河系以每秒幾百公里速度被吸去。

需要有約十倍可見物質之質量才提供足夠的引力！

Photo credit: [Digitized Sky Survey](#), [Palomar Observatory](#), [STScI](#)

發現暗物質

星系旋轉速度分佈

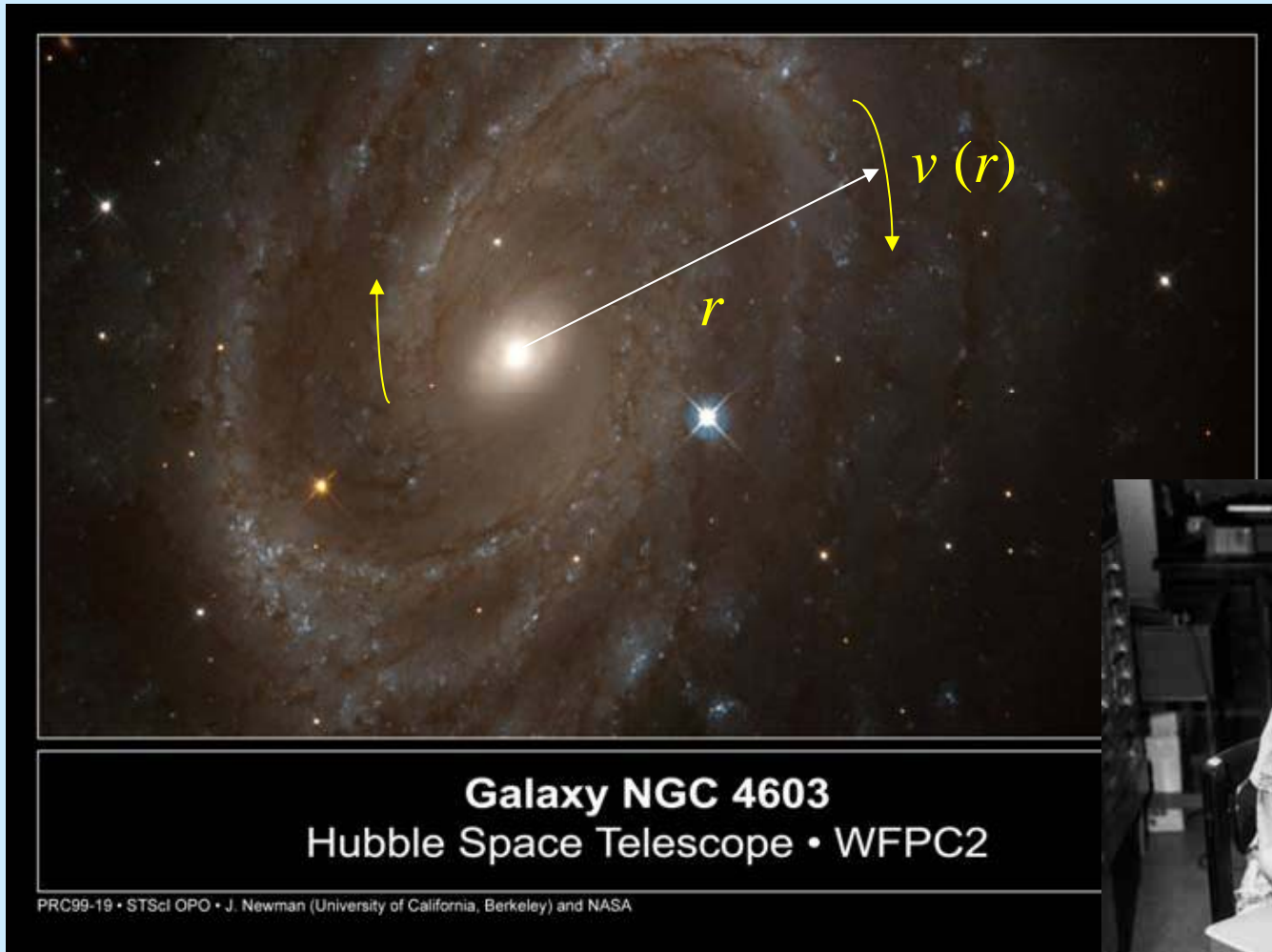


Photo credit: NASA/STScI

銀河系的旋轉

圓周運動：

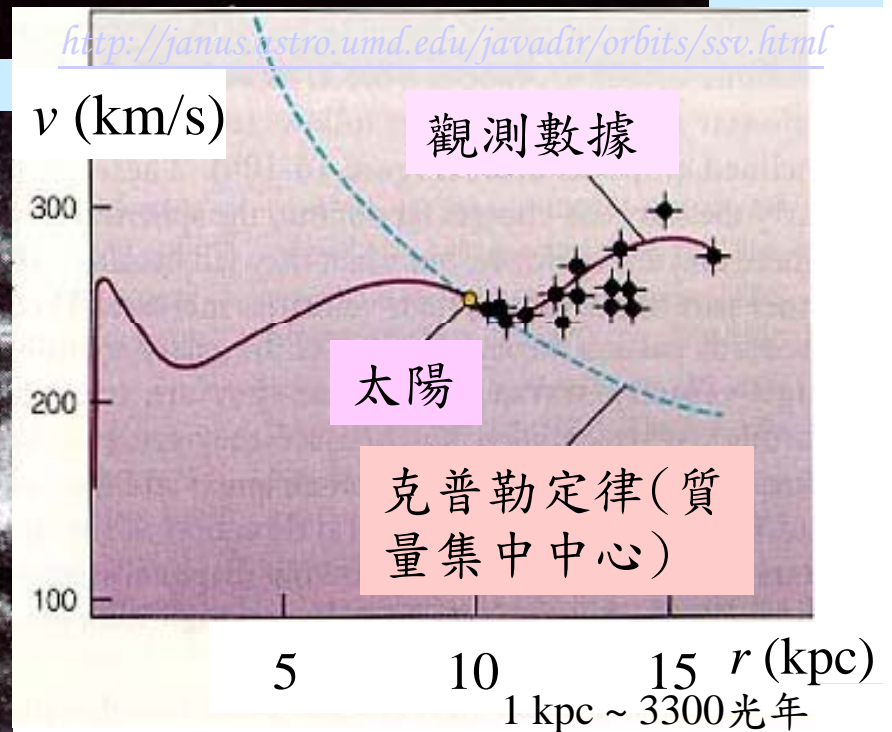
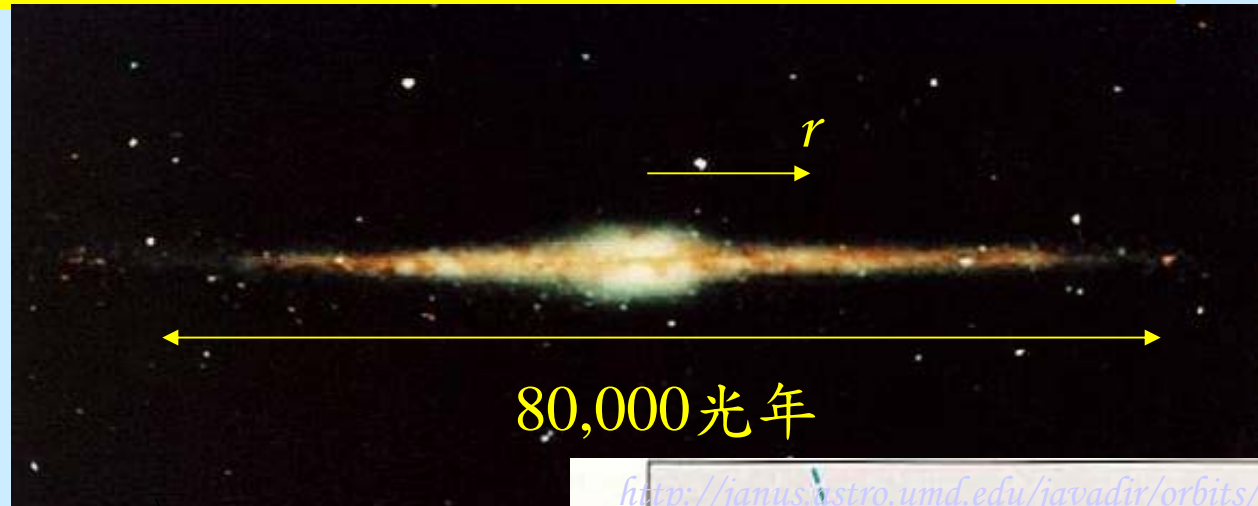
$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$v \rightarrow \text{constant}$

$$\Rightarrow M(r) \propto r$$

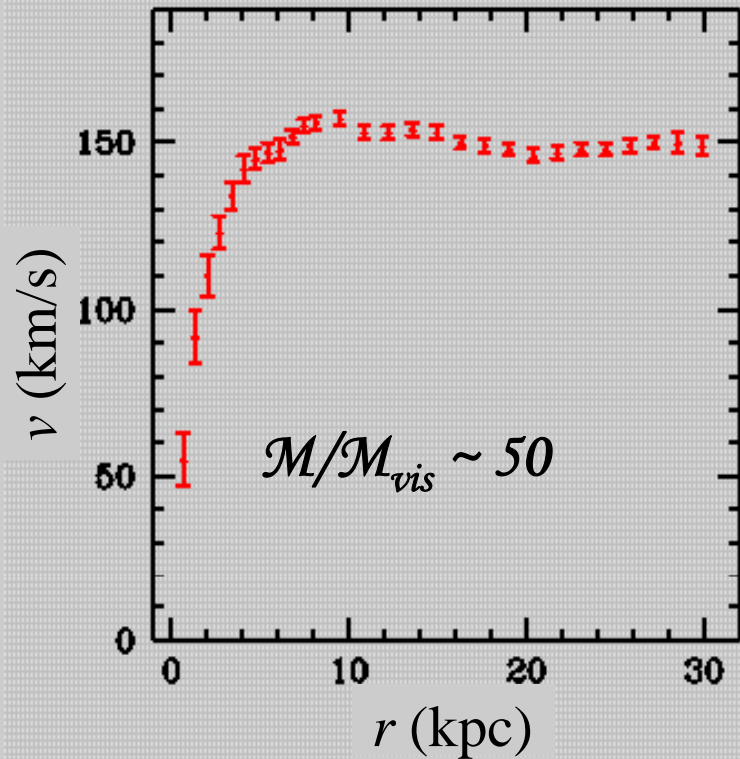
$M(r)$ = 半徑 r
內包含的質量



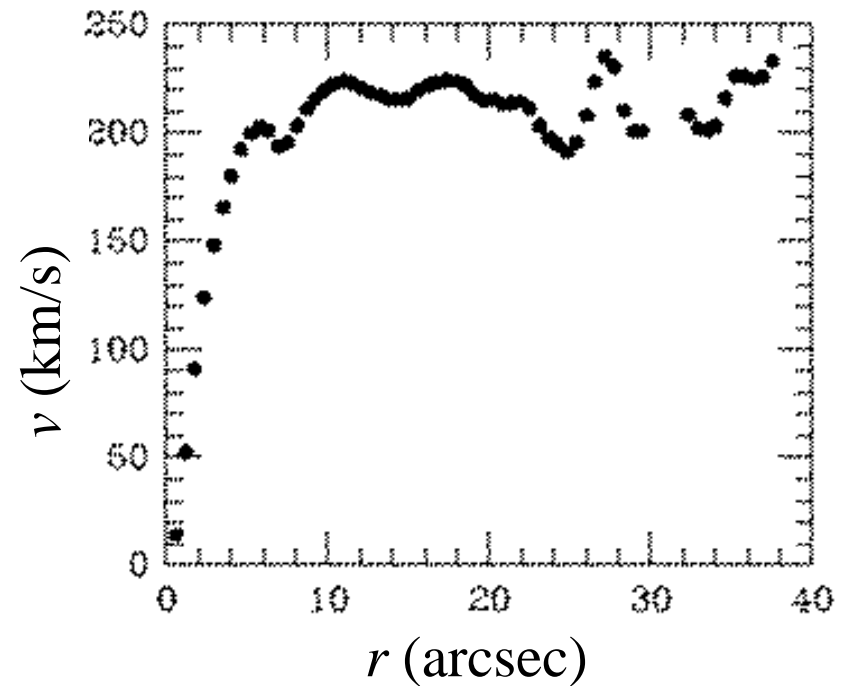
推知銀河系的質量延伸至起碼三十萬光年，但不發光

星系的旋轉

NGC3198 from Begeman 1989



UGC9242 from Vogt et al.

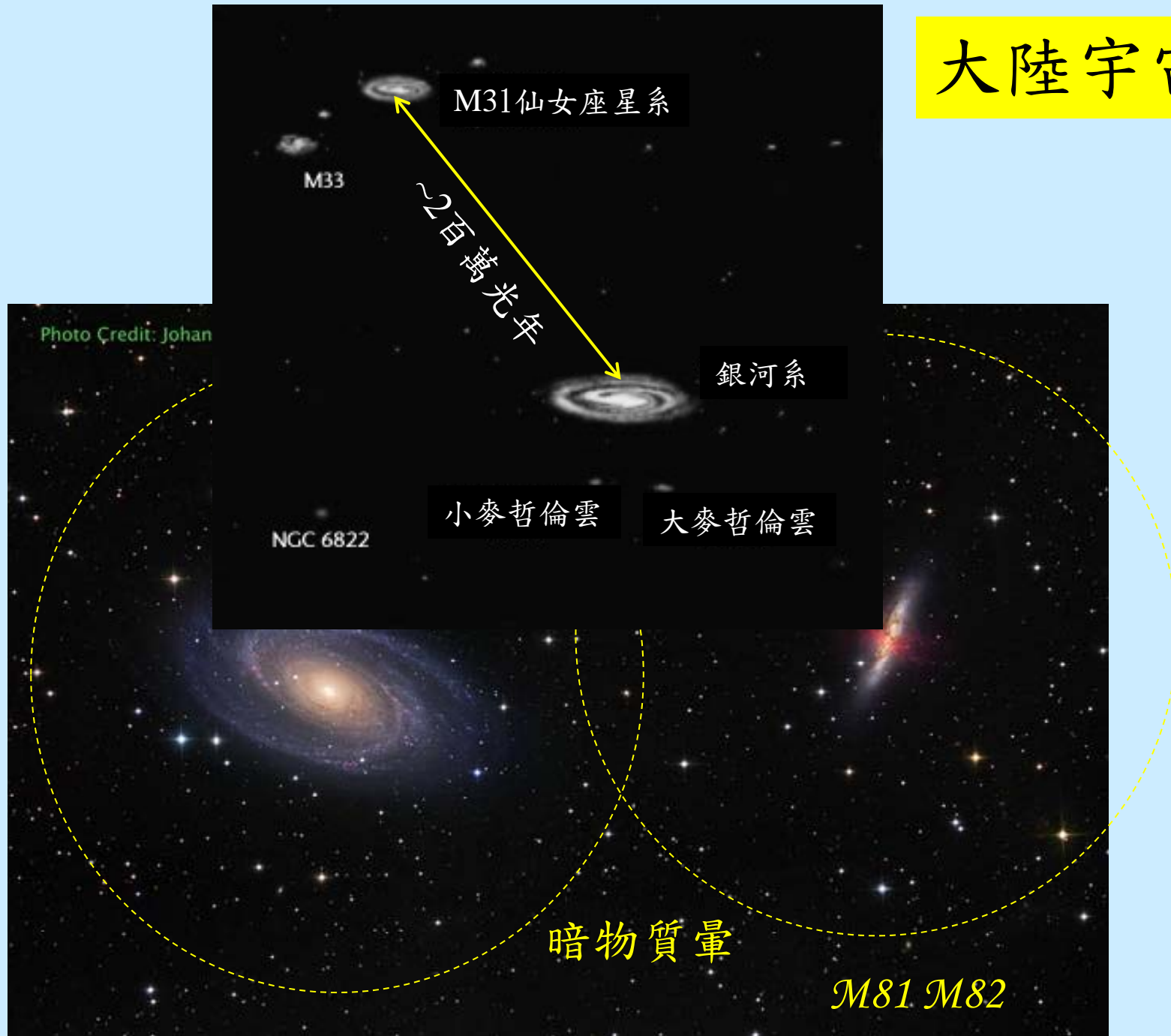


<http://astrosun2.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/rotcurve.htm>

大部份星系: $M(r) \propto r$

<http://www.astro.queensu.ca/~dursi/dm-tutorial/rot-vel.html>

大陸宇宙!



暗物質的直接證據

- 以重力透鏡效應(質量/重力扭曲光線)觀測

光線扭曲 → 重力分佈 → 質量分佈

橙色顯示質量 *Picture by Tyson et al.*



Abell 2218

Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

超星系團暗物質分佈



Abell 901/902 Supercluster Dark Matter Map ■ STAGES
Hubble Space Telescope ■ ACS/WFC

NASA, ESA, C. Heymans (University of British Columbia), M. Gray (University of Nottingham), and the STAGES Collaboration STScI-PRC08-03

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2008/03/image/a/>

星系團 1E 0657-556 (子彈星系團)

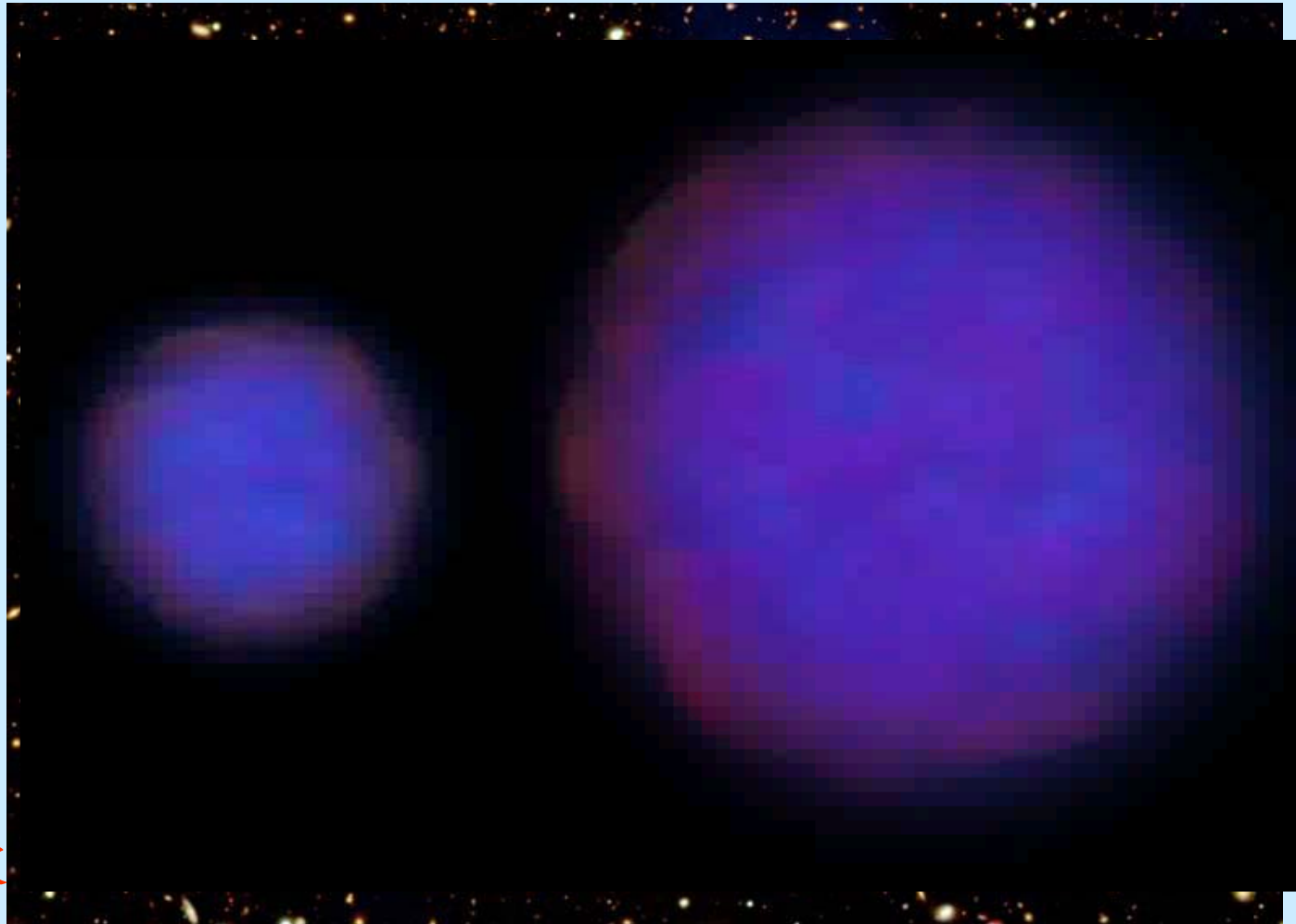
- 由兩個星系團碰撞而成

- 紅色部份為熱氣體 (X射線望遠鏡拍攝)

- 藍色是大部份質量所在 (重力透鏡效應觀測)

- 暗物質沒有阻力
→ 比熱氣體快

暗物質的直接證據



Credit: *X-ray*: [NASA/CXC/M.Markevitch et al.](#)

Optical: [NASA/STScI](#); [Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.](#)

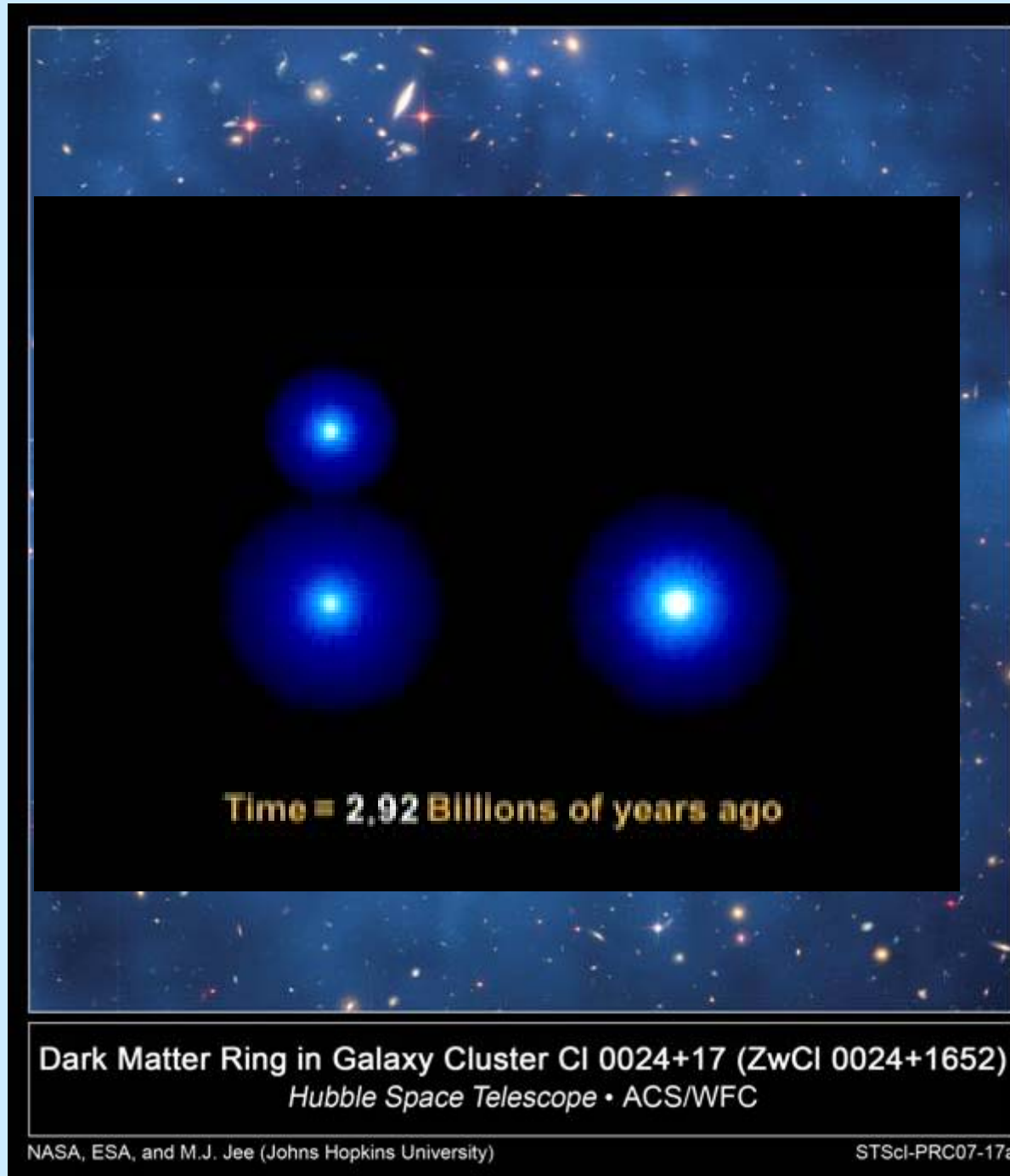
Lensing Map: [NASA/STScI](#); [ESO WFI](#); [Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.](#)

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/galaxy/2006/39/image/a/>

星系團 CL
0024+17 距離
五十億光年

利用重力透
鏡原理推測
暗物質分佈
→ 暗物質環

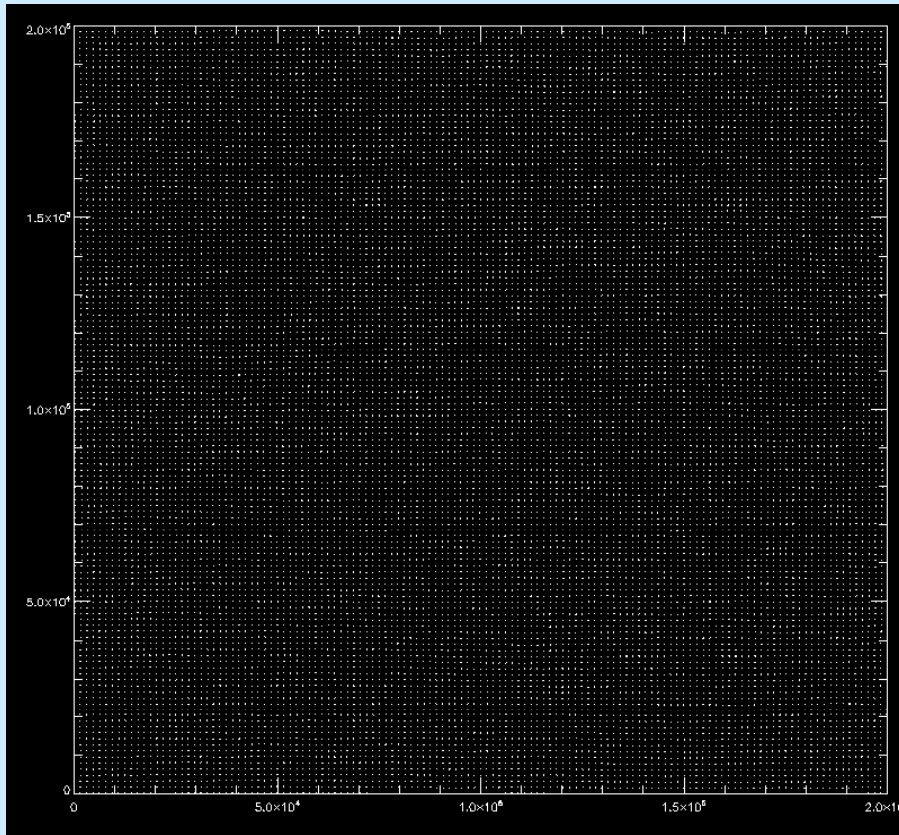
星系團撞擊後
暗物質與普通
物質分離



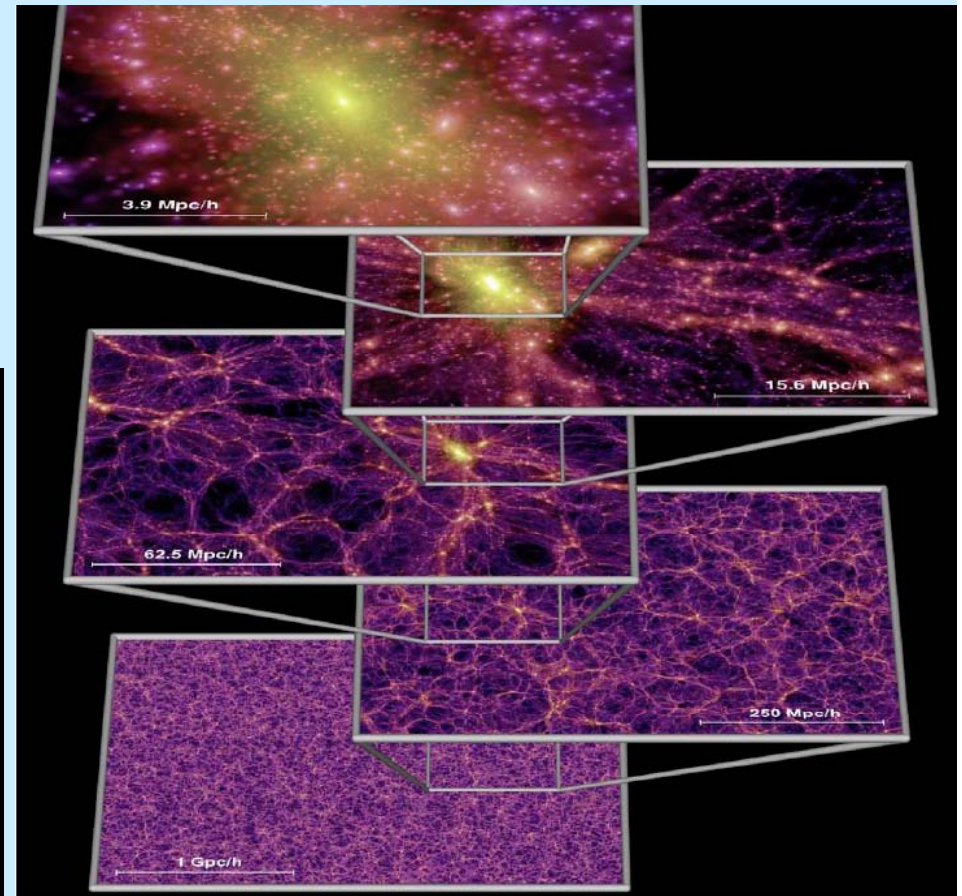
*Photo and movie
courtesy
NASA/STScI*

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(83%總物質)



Structure formation animation by Cheng Dalong

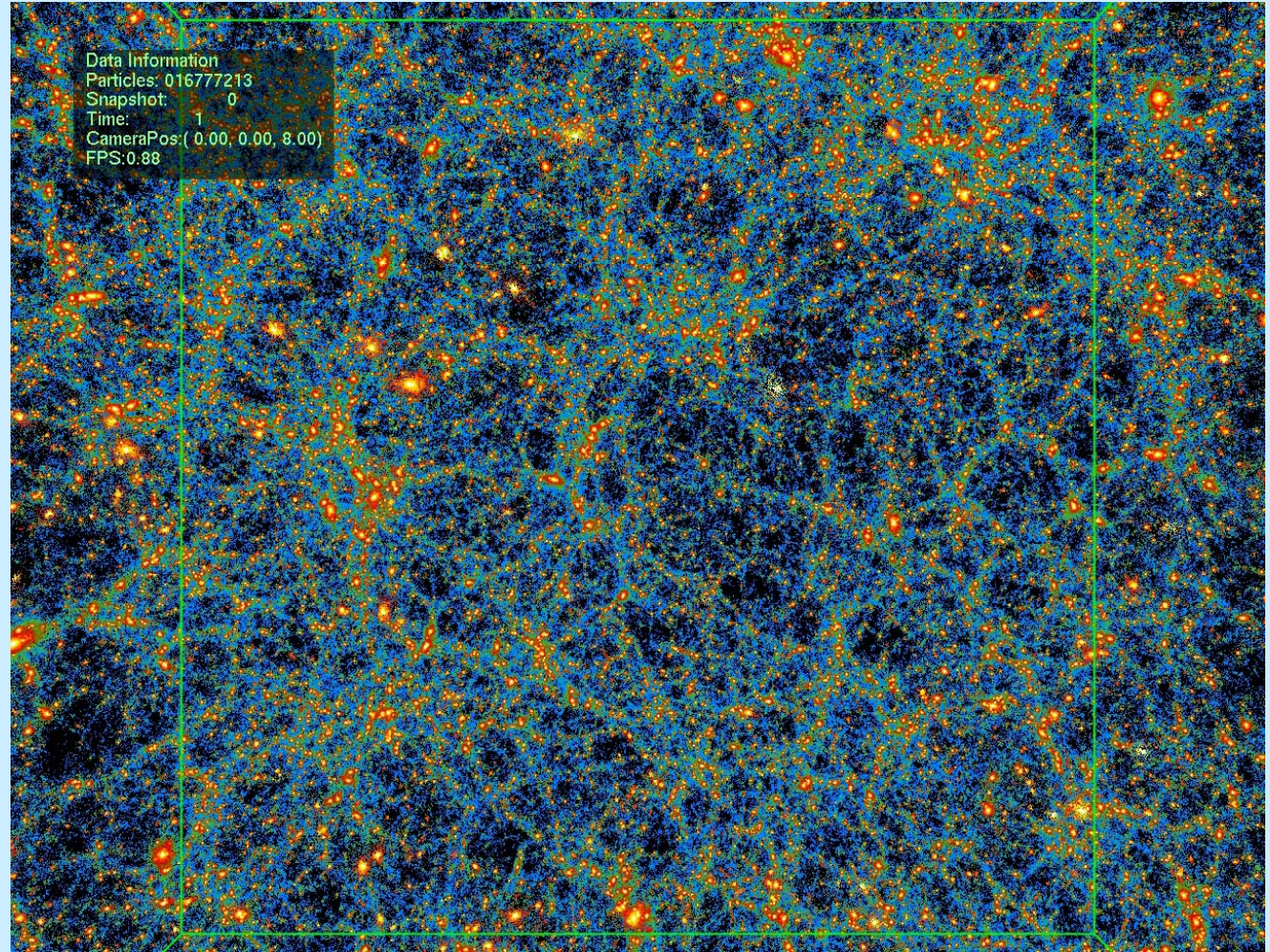


V. Springel et al., Nature 435, 629 (2005).

粒子模擬: 粒子以牛頓
重力相互作用

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



除非長距離萬有引力不遵守牛頓定律！ $F \propto 1/r^2$

程大龍計
算及製作

II. 暗物質是甚麼?

未知□架!

暗物質分類

- 重子暗物質 (*baryonic dark matter*) = 普通物質: 由質子、中子、電子等組成，不放射可見光-如行星 (*planets*)、棕矮星 (*brown dwarfs*)、黑洞等
= *MA*ssive *C*ompact *H*alo *O*bject*S*
- 非重子暗物質 (*non-baryonic dark matter*): - 如軸子 (*axions*)、及各種超對稱粒子 (*supersymmetric partners*)
= *W*eakly *I*nteracting *M*assive *P*article*S*

重子暗物質

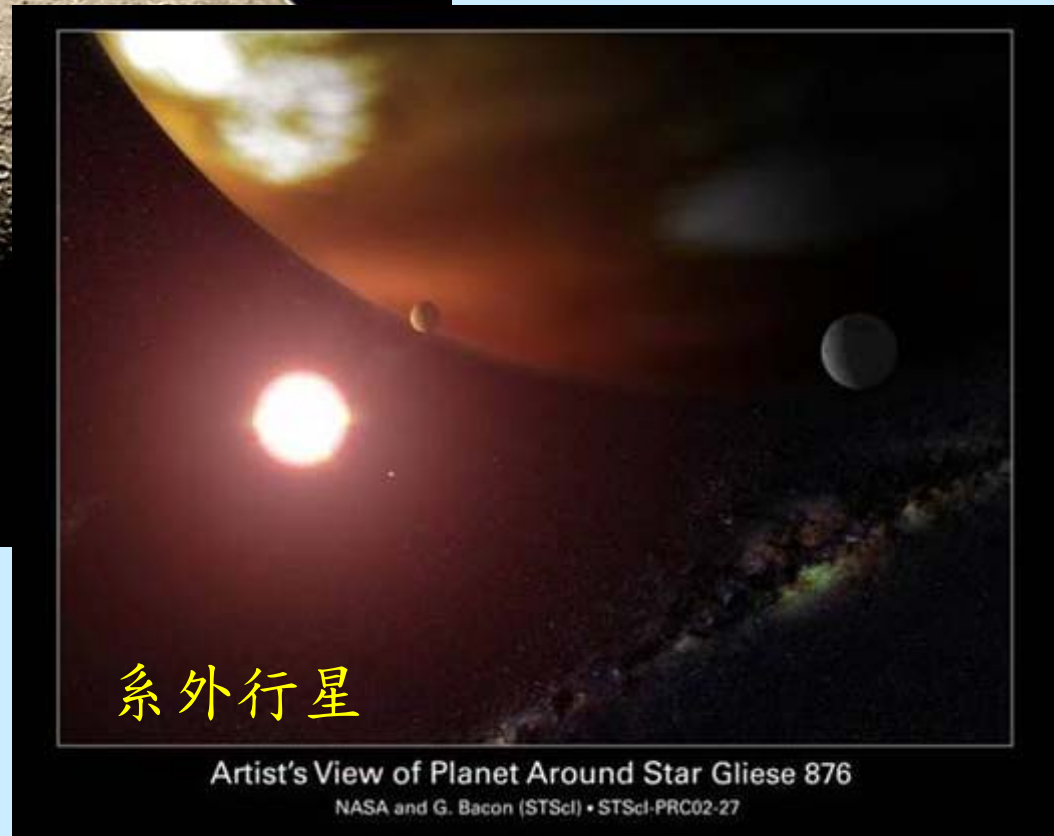
月球



Taken by mcc in CUHK

非常普遍，但質量太小

行星、衛星本身不發（可見）光，但會放射及吸收紅外線等，是重子（普通）暗物質



系外行星

Artist's View of Planet Around Star Gliese 876

NASA and G. Bacon (STScI) • STScI-PRC02-27

Illustration by NASA/STScI

非重子暗物質

- 重子(普通)暗物質遠遠不足夠解釋各種觀測→必須有非重子暗物質

有重力作用，
沒有強作用及電磁作用

不能靠電磁波(如光)
直接觀測

新類型物質，總量
~5x已知普通物質

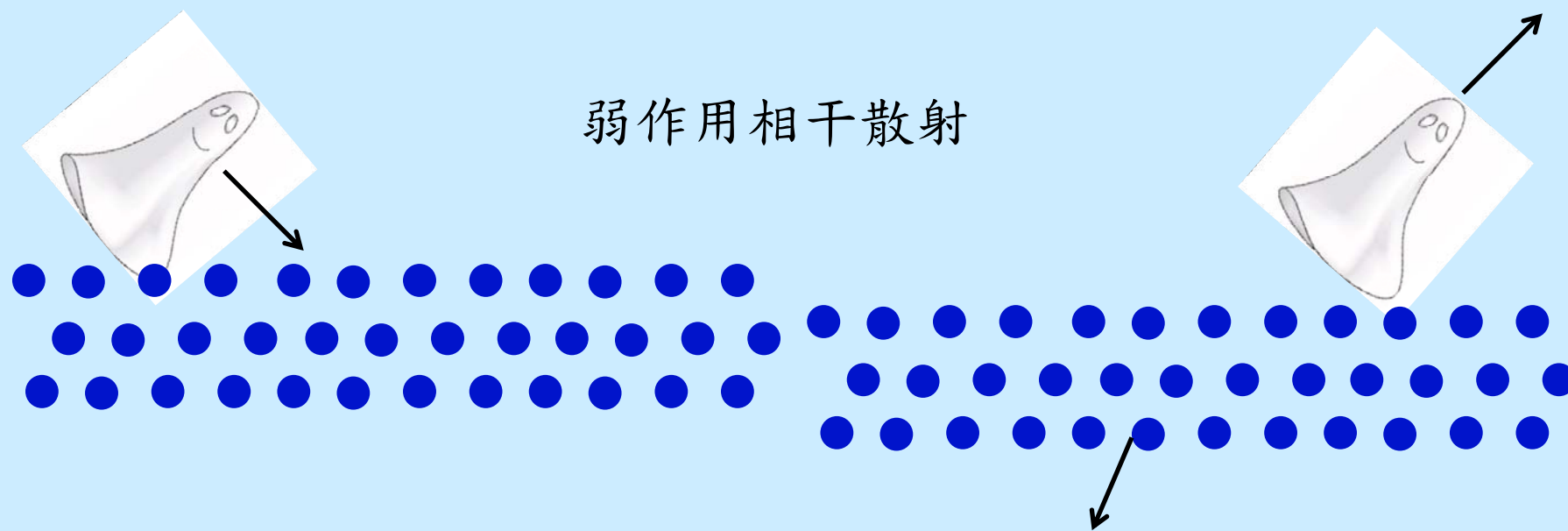
非重子暗物質不是暗黑色，而是透明的！



III. 搜尋暗物質

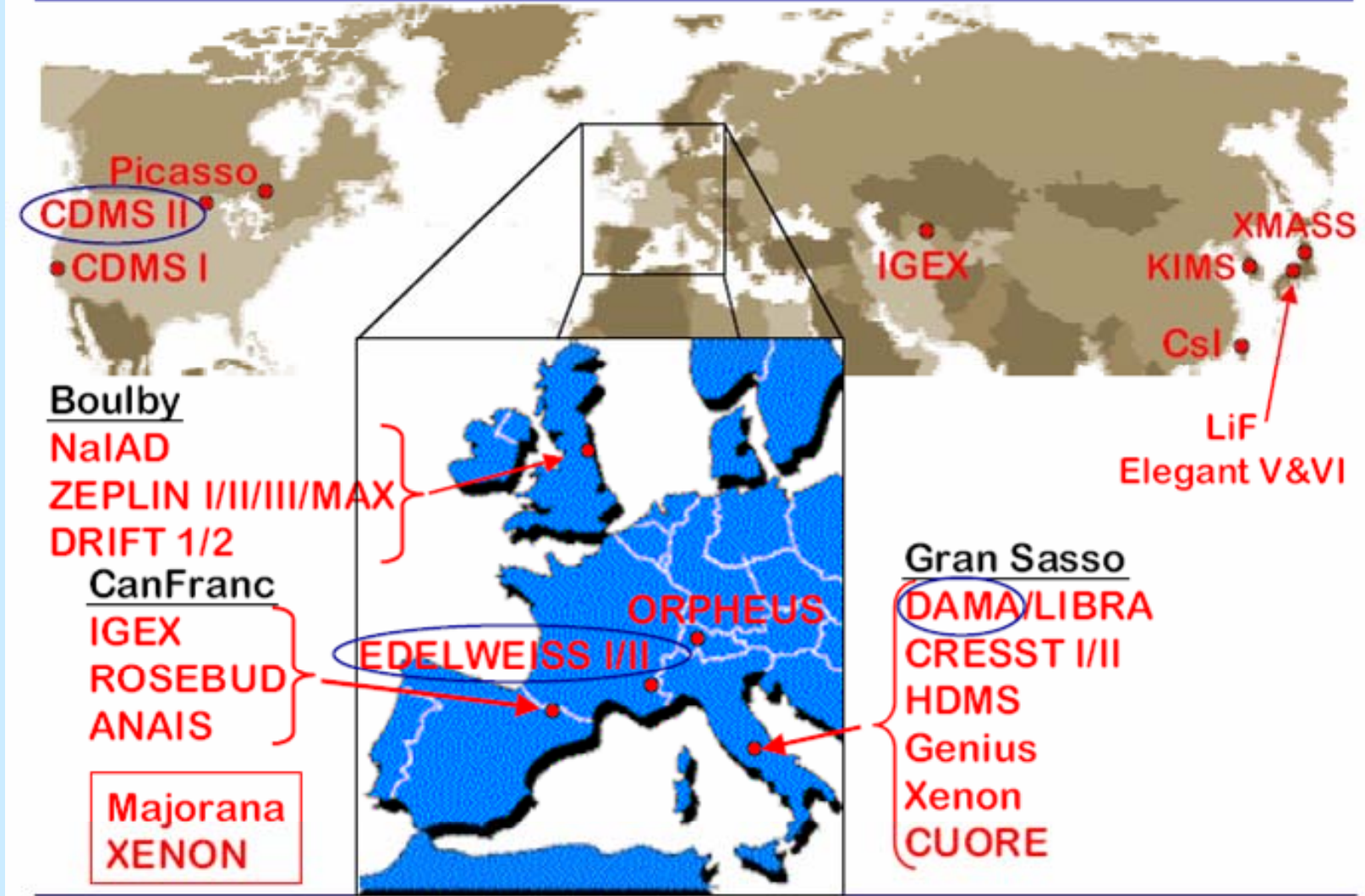
如何搜尋暗物質?

- 重力效應: 重力透鏡→以遠方影像扭曲程度推算物質分佈
- 弱作用力效應: 與普通物質微弱反應→直接製造或採測



總應有暗物質在附近!

WIMP-detection Experiments Worldwide



From <http://cdms.berkeley.edu/experiment.html>

搜尋暗物質粒子

地下天文學

CDMS: 在地下一公里放置低溫晶體探測器，直接量度暗物質粒子(與探測器原子核散射)



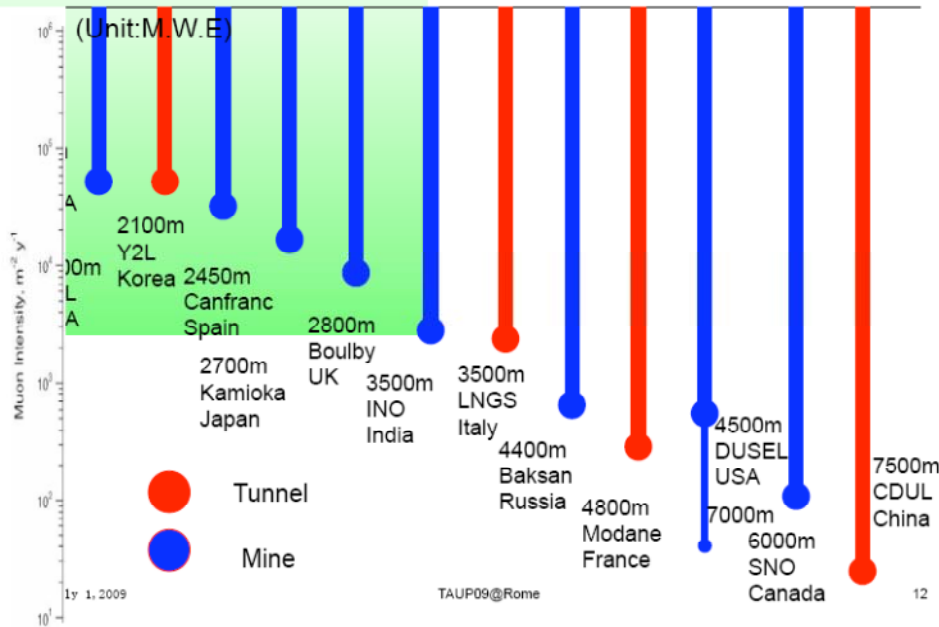
<http://cdms.berkeley.edu/index.html>

<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3614127.stm>

<http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/2981837.stm>

中國地下實驗室

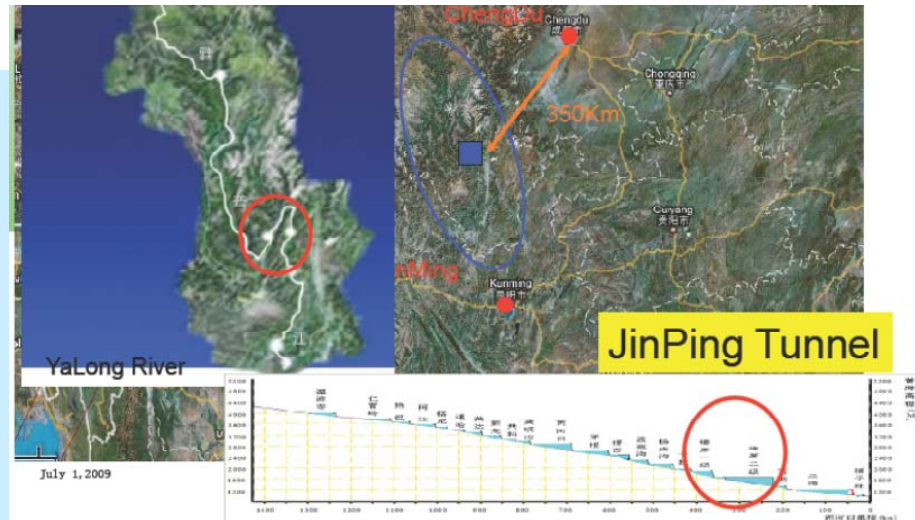
Comparison of main ULs in the world



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

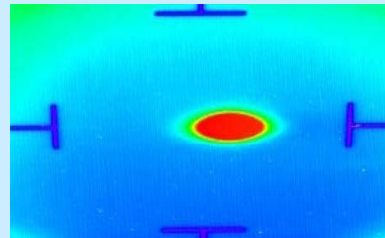
大型強子對撞器



CERN: 世界最大的基礎物理實驗室

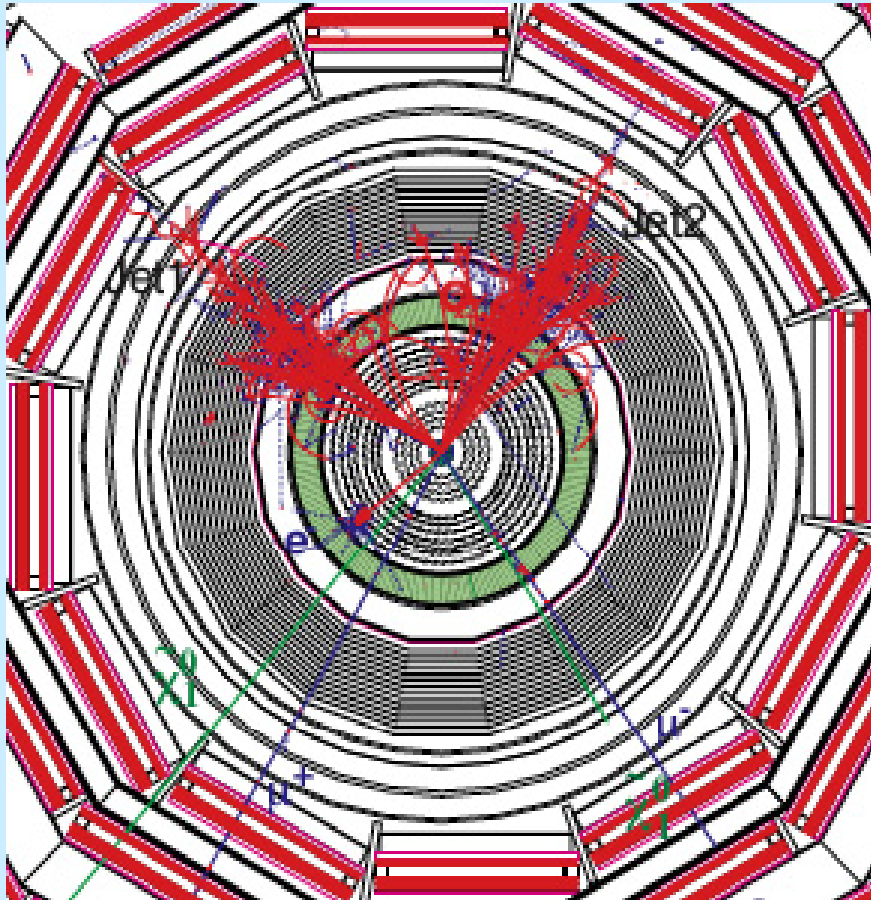


質子加速至 $v = 99.999999\% c$ (7 TeV)
粒子束: 2808小束 $\times 1.15 \times 10^{11}$ 質子 (mm x cm)
總能量 = 362 MJ
~ 時速150 km 火車的動能
可把500kg 的銅燒溶
LHC: 87.5 億美元建造費



<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

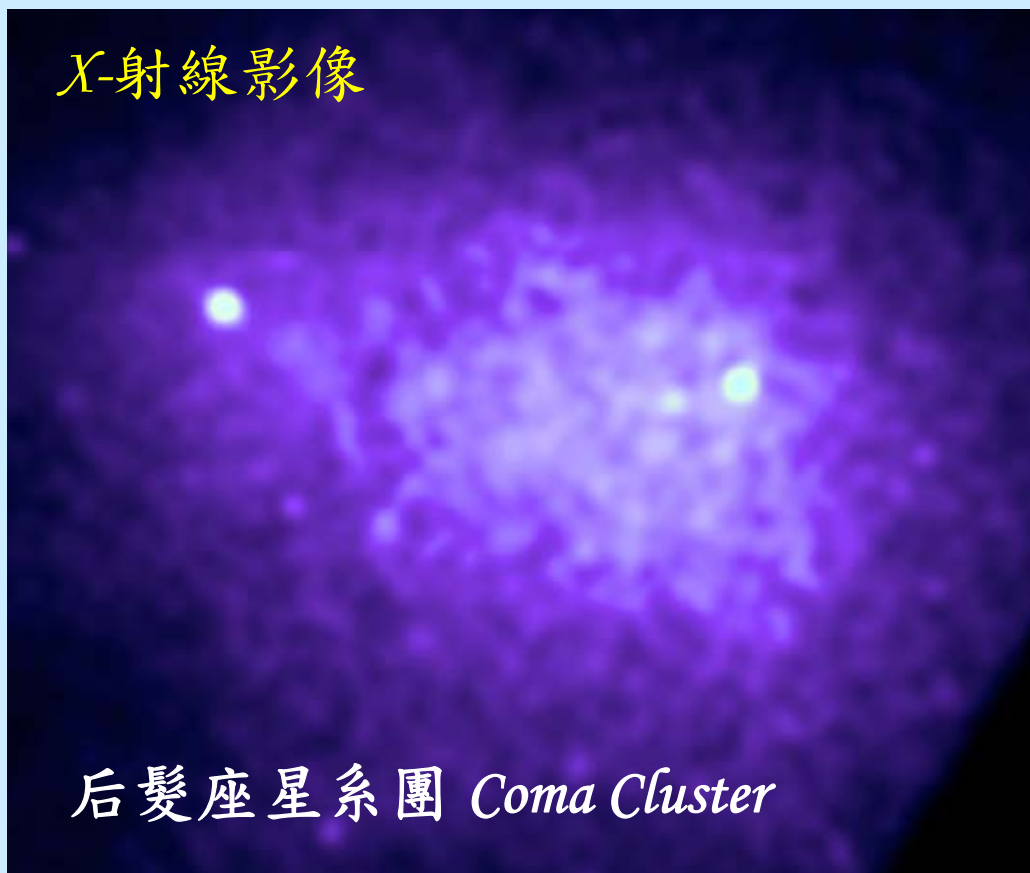
<http://cms.web.cern.ch/cms/Physics/Supersymmetry/CMS.html>

IV. 中大的相關研究

理論：驗證不同的暗物質模型

例如：若暗物質是質量大會衰變的基本粒子，則會影響宇宙膨脹演化、星系團熱氣體等

X-射線影像



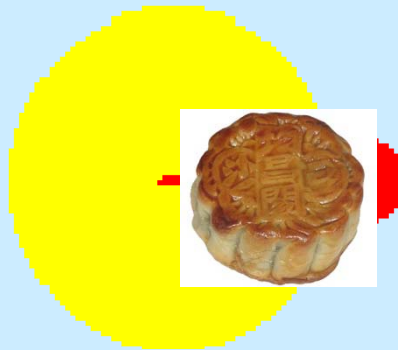
星系團熱氣體
能量從暗物質
(重中微子)
衰變而來



中大混合星 *CUHK Hybrid stars*

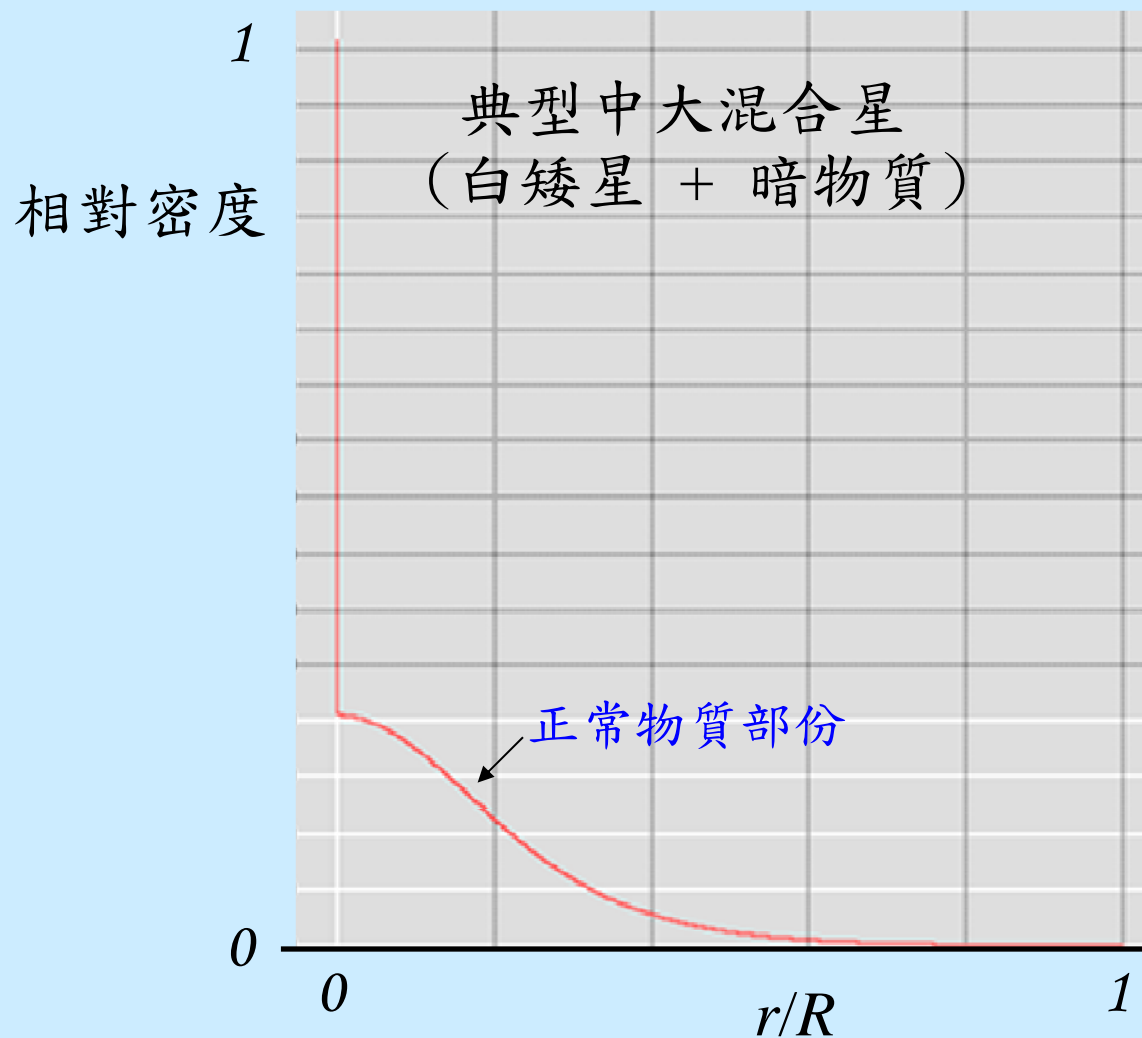
一顆白矮星或中子星吞下一些暗物質後果如何？

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



須解廣義相對論二元流體方程

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*

A comparison of star sizes

紅矮星
Red Dwarf
Lower limit:
0.08 solar
masses



太陽
Our Sun
1 solar mass



藍巨星
Blue-white
Supergiant
150 solar masses



白矮星
*white
dwarf*

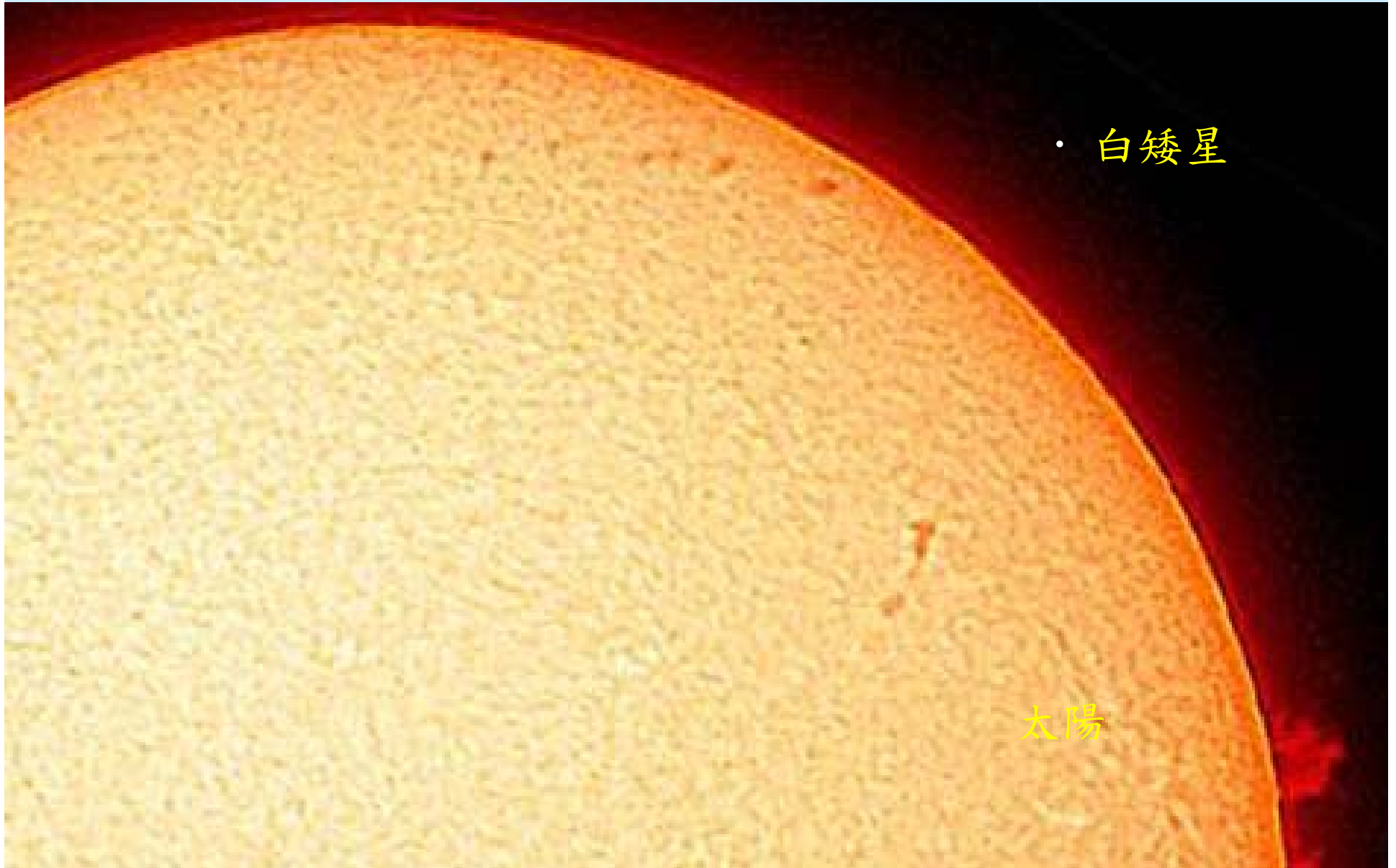
紅巨星
Red Giant
Very old stars that
evolve from stars of
<5 solar masses



致密星 *Compact Stars*

- 白矮星

太陽



致密星 *Compact Stars*

中大混合星

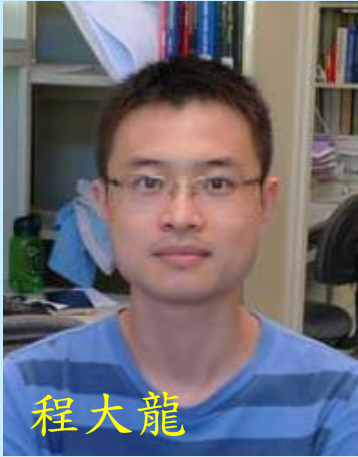


白矮星



中大混合星

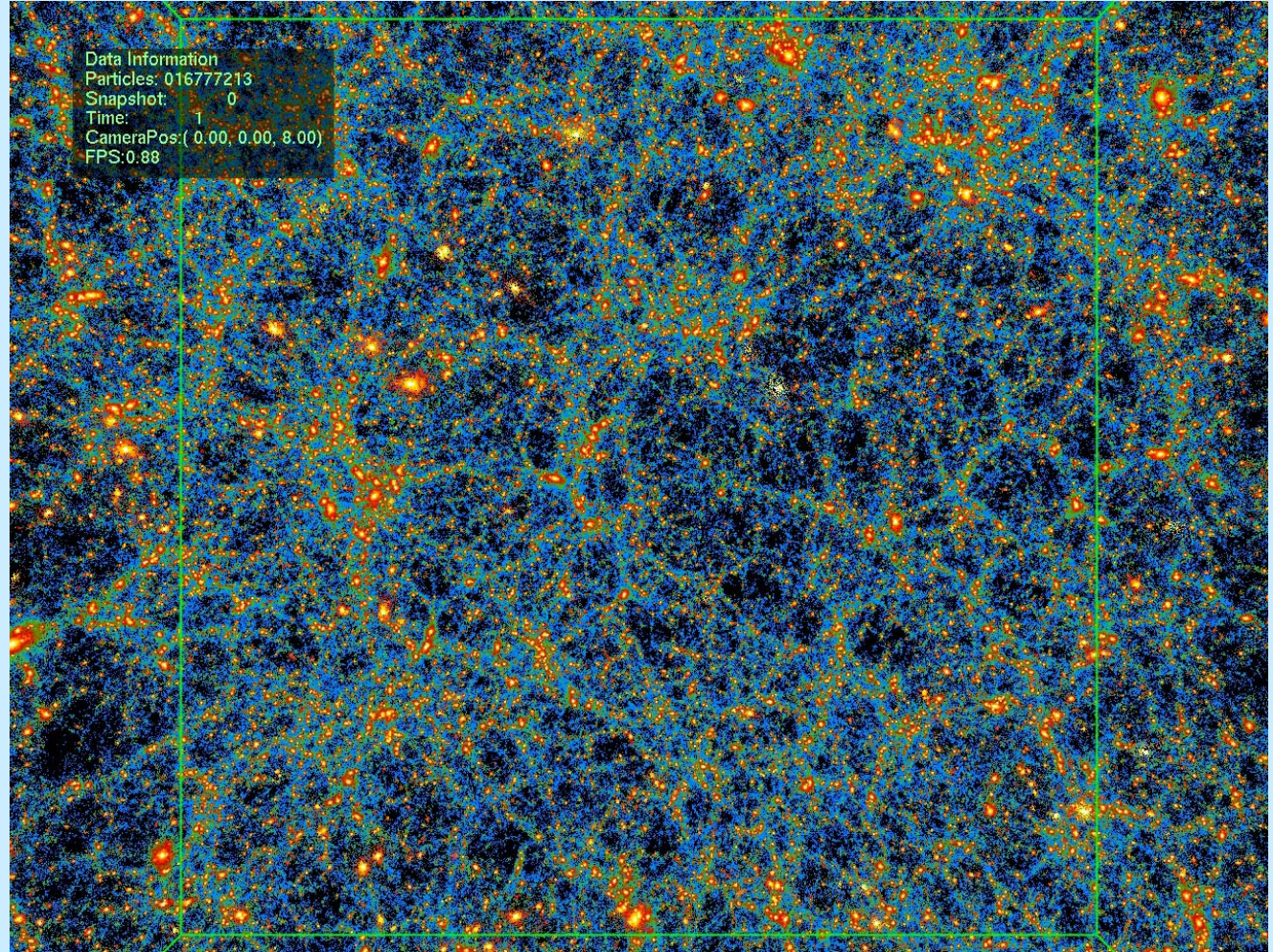
暗物質與宇宙結構演化



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, 256^3 粒子

宇宙的隱秘

- 暗物質存在的證據
- 暗物質是甚麼?
- 搜尋暗物質
- 中大的相關研究

宇宙的隱秘

朱明中
香港中文大學物理系
30/3/2012