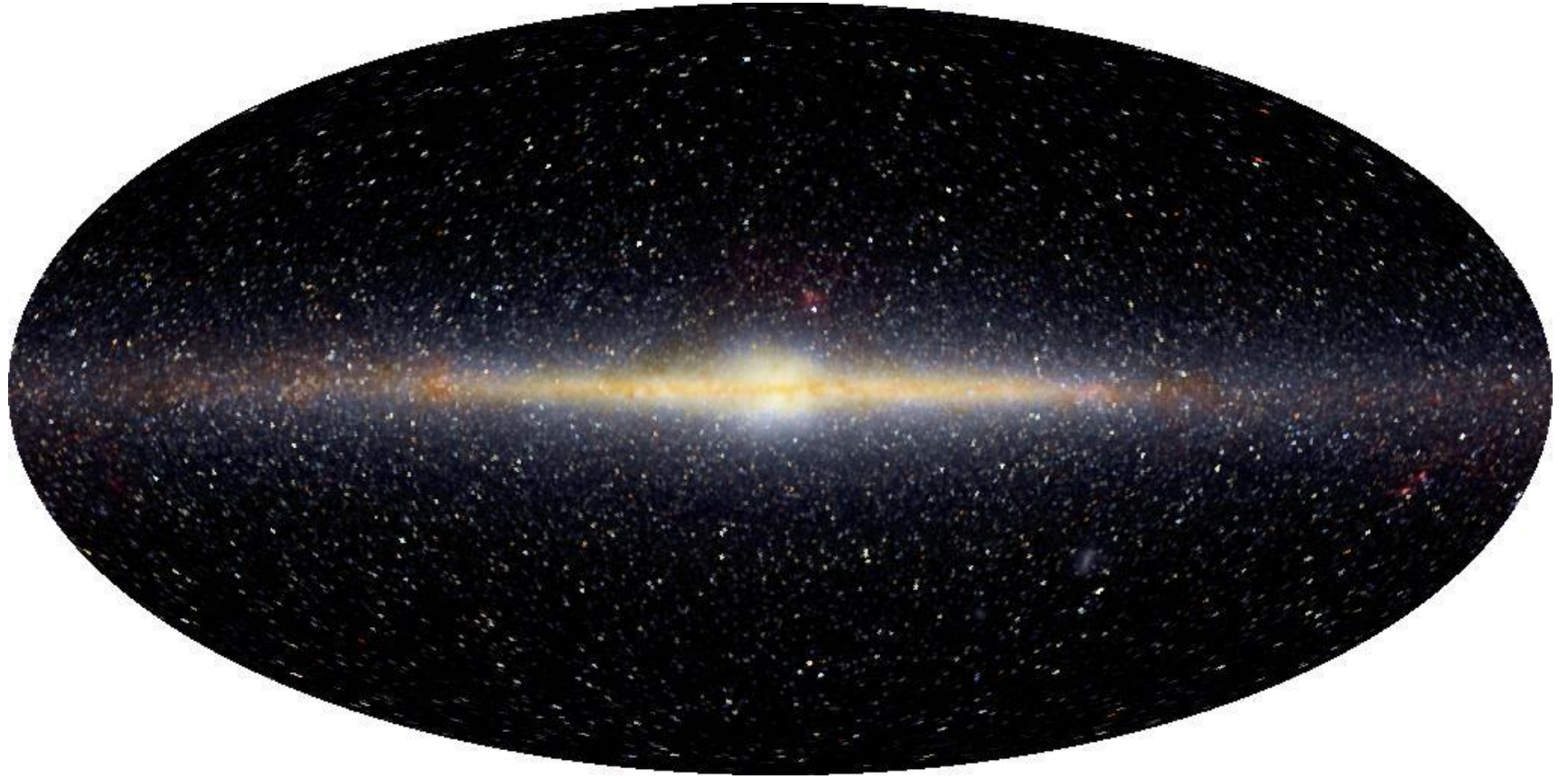


# 宇宙的演化

時空的範圍？







銀河



$10^{11}$  星星(太陽)





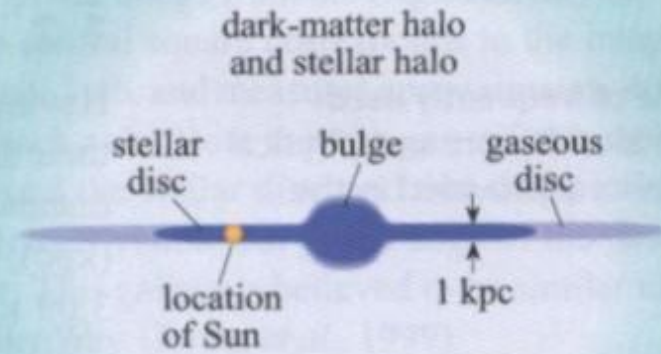


1pc(parsec)

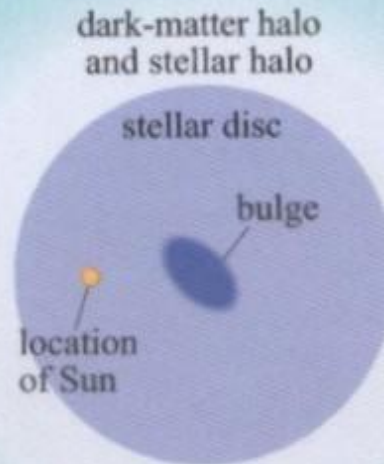
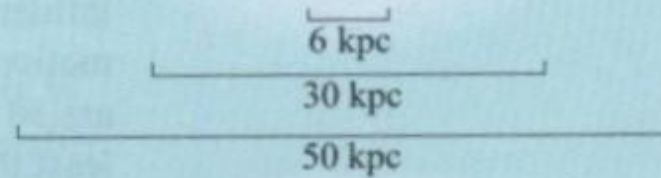
= 3.26 光 年

=  $3.09 \times 10^{16}$  m

1kpc= 1000pc



(a)

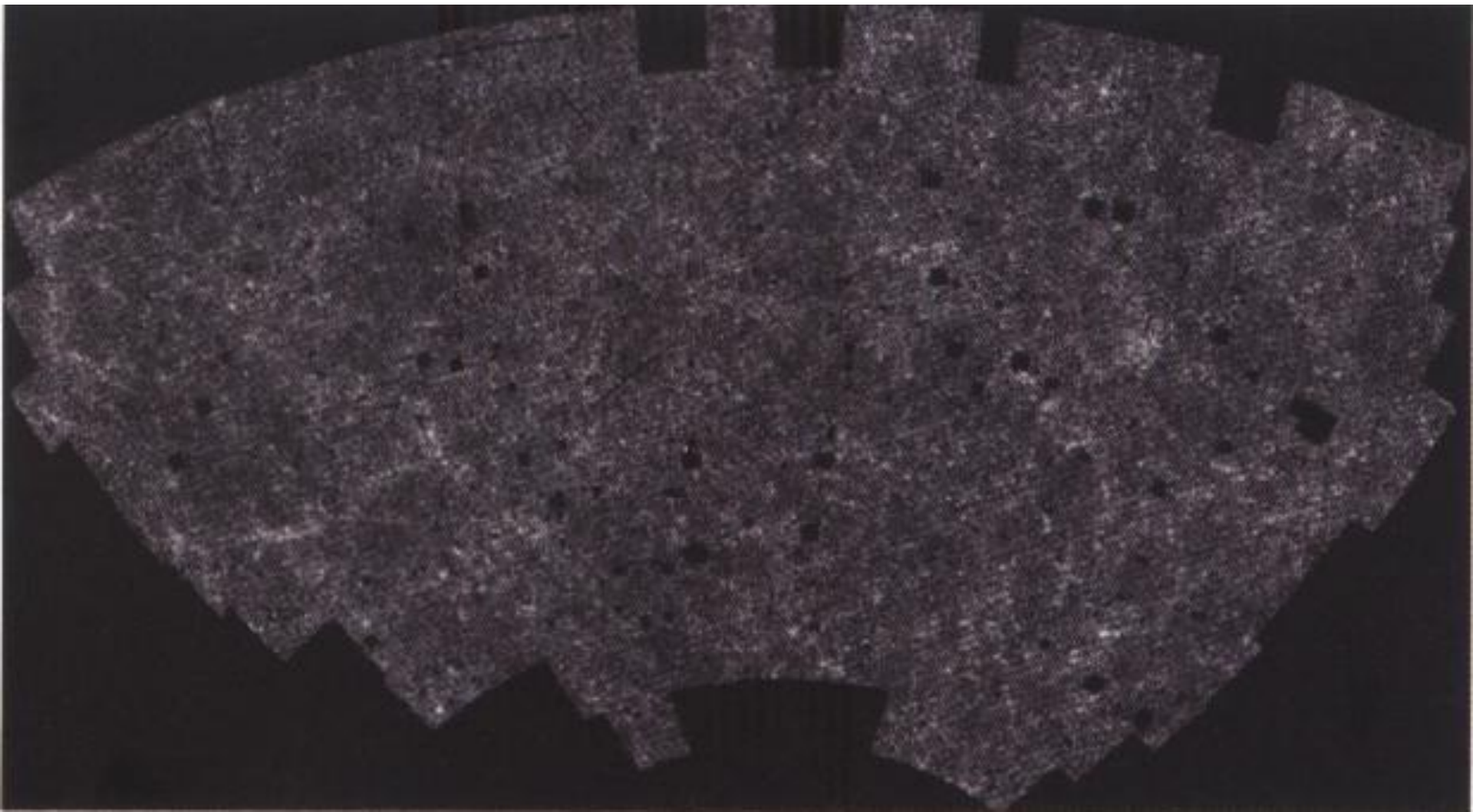


(b)

哈伯望遠鏡  
所見天空中  
一極小區域

月亮夾角  
的三十分  
之一





所見宇宙約有 $10^{11}$ 星系

距離太陽

5 $\mu$ pc

距離最近star

1 pc

距離銀河中心

10kp

距離我們星系群中的星系

50-1000kpc

距離最近的大星系群

20Mpc

距離可見宇宙之邊緣

14Gpc( $14 \times 10^9$ pc)

1pc(parsec)

= 3.26光年

= $3.09 \times 10^{16}$ m



## 大霹靂

牛頓如果死而復生，看到後世對於「真理的大洋」的探索，會對哪些發現最感興趣？

據記載，牛頓在過世前不久，曾這樣回顧他的一生：「我不知道世界會怎麼看我，但是在我看來，我只像是個在海邊玩耍的男孩，三不五時找到了比較平滑的鵝卵石，或是比較漂亮的貝殼，而覺得很有趣，可是真理的大洋還是全然未為人所理解地橫臥在我面前。」我有時會好奇，牛頓如果能夠死而復生，看到了後世在他死後200多年間對於「真理的大洋」的探索，不知他會對哪些發現最感興趣？我猜想有兩件事絕對出乎既是光學家也是天文學家的牛頓意料之外：一是光既有粒子性，也有波動性；二是宇宙不停地在膨脹。

這兩個現象是20世紀科學的大發現，它們分別開啟了量子論與宇宙論兩門學問。耐人尋味的是，兩者儘管在表面上看起來毫不相干，但骨子裡卻能巧妙的相互印證。

宇宙膨脹這回是美國天文學家哈伯在1930年代所發現的。當時哈伯注意到從遠處星系發出的光，其（吸收）光譜和地球上已知的原子光譜相比，各譜線都有所謂的紅移（red shift）現象，而且紅移程度和星系與我們的距離成正比。換句話說，來自遠處星系的光，波長都變長了，星系越遠，波長就變得越長。若以大家熟悉的都卜勒效應來解釋，這意味著遠處星系正離我們遠去，而遠離的速度恰和它與我們之間的距離成正比。

如果各個星系當下正在相互遠離，也就是說宇宙正在膨脹，那麼在過去，星系就必然較為靠近。假如我們一直將時間往前推，宇宙就應該有個起點，或者說，宇宙應該起自於一個「大爆炸」。物理學家相信，這個大霹靂的時刻約在137億年前。那時的宇宙是一團高溫度、高密度的物質；這些物質隨著宇宙的膨脹，會逐漸冷卻，繼而受到重力的影響，方凝聚成星球、星系。

物理學家發現，以傳統時空觀為本的牛頓重力理論無法完滿地描述宇宙膨脹，只有立基於彎曲時空觀點的廣義相

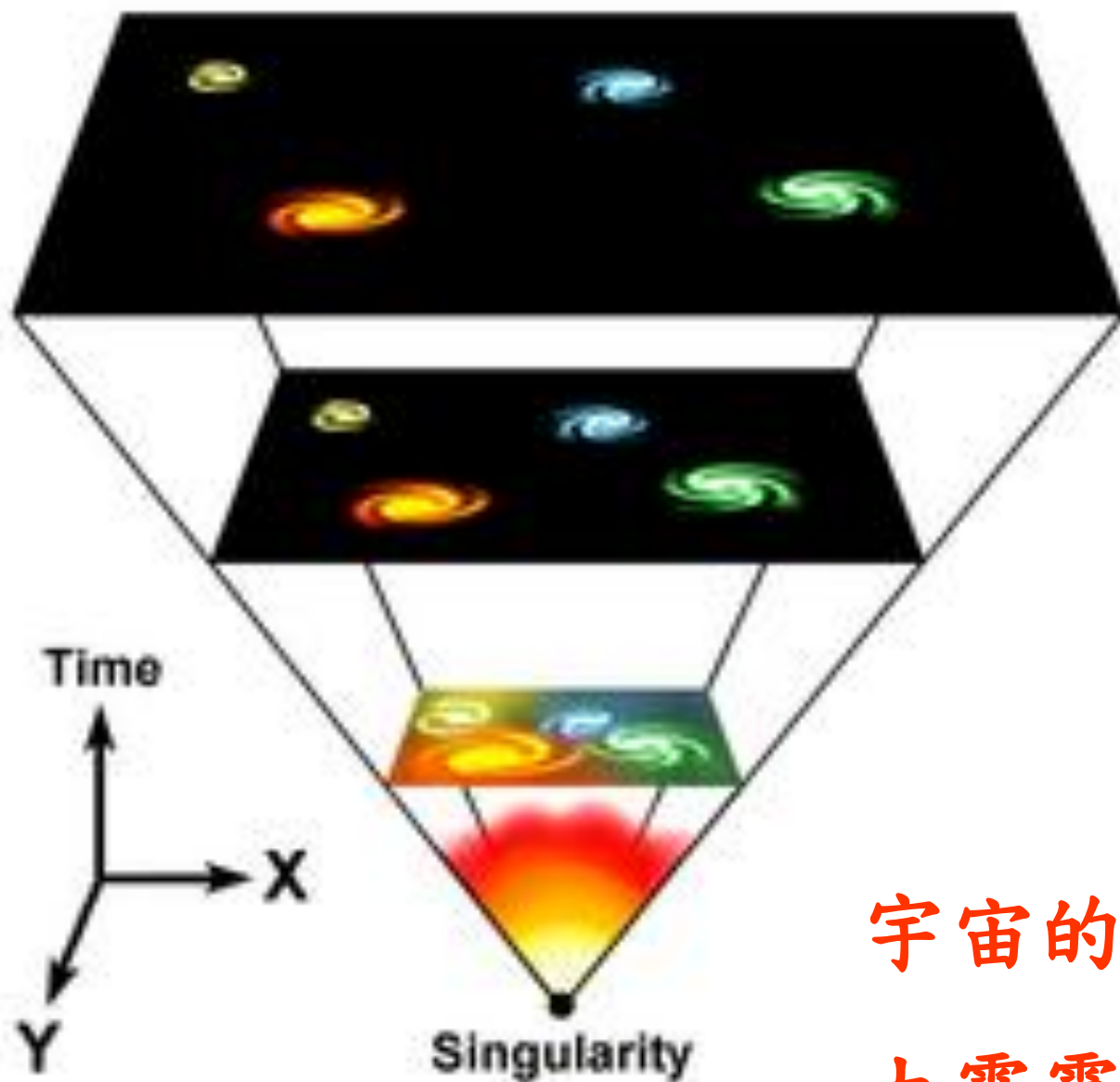
對論，才是說明宇宙膨脹的最佳理論。在廣義相對論中，宇宙膨脹是一種空間本身的膨脹，星系在宇宙中的座標並沒有變動；星系間的距離之所以增大，純然是因為兩定點間的距離，由於空間的膨脹而增加了。同樣的，來自遠處星系的光，其波長在空間膨脹之下被拉長了，所以會有紅移現象。前面我提過可以用都卜勒效應來解釋紅移，其實這種觀點不全然正確，只能算是一種簡略的比喻。

以上大霹靂的故事有個令人信服的佐證，這項證據與光的量子性有關：普朗克與愛因斯坦指出，光波其實是由光子所組成，每個光子的能量和光波的波長成反比；波長越長的光子，所帶的能量就越低。在大霹靂之初，高溫的宇宙充滿了短波長、高能量的光子（以及其他基本粒子）。這些光子的波長隨著宇宙膨脹而增長，因此能量（以及溫度）也就不停地下降。137億年下來，這些宇宙最原始的光子的溫度已經下降到絕對溫度2.7K左右。人們稱宇宙間這種具有固定溫度的光子氣體（也就是所謂的黑體輻射）為「宇宙微波背景輻射」。

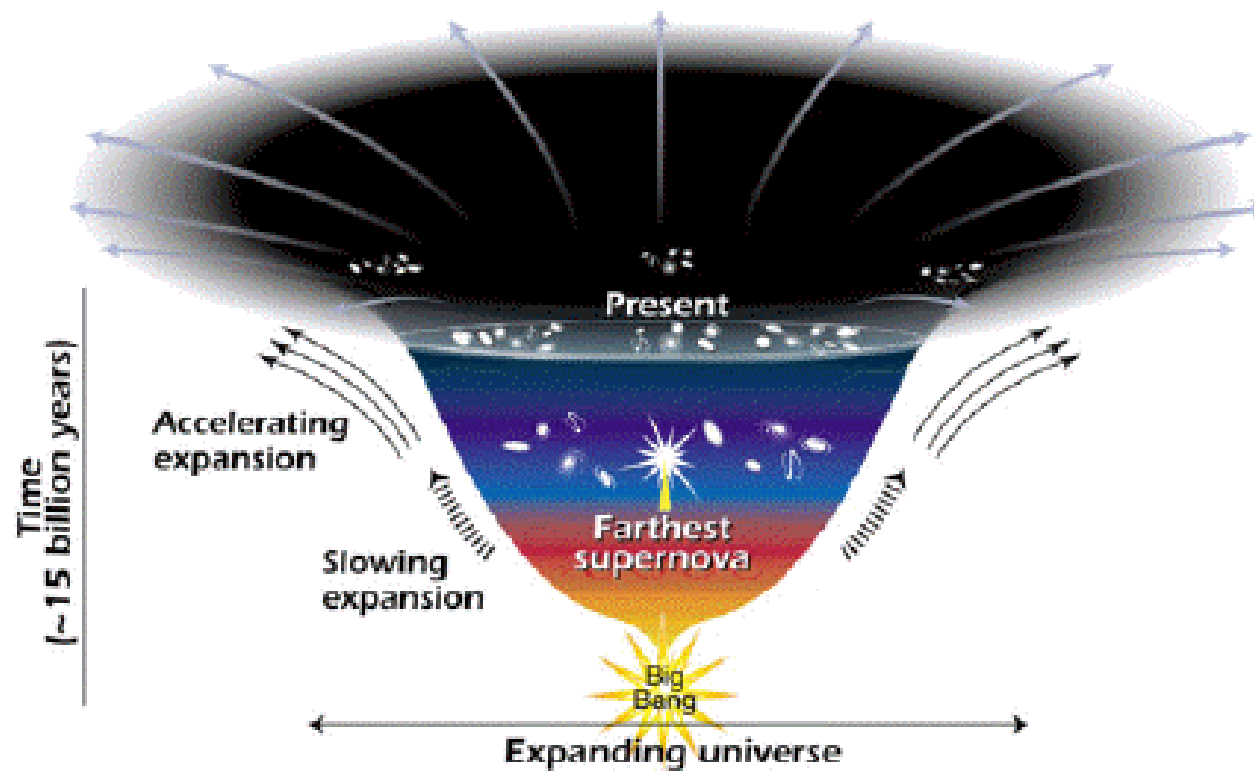
1964年，美國無線電天文學家潘琪亞斯（Arno Penzias）和威爾遜（Robert Wilson）在他們的天線中，無意間發現了這些大霹靂後遺留下來的光子。他們當時還無法精確地量出背景輻射的能譜，只能得知這種輻射大致的溫度，以及其大致的均向性。直到10多年前，人們才利用人造衛星完整地測到了背景輻射能譜，它果然極為漂亮地符合普朗克黑體輻射公式。

根據觀測，星系在宇宙中的分佈相當均勻，所以大霹靂之初的高密度基本粒子氣體也應是極為均勻的氣體。如果不考慮重力，這種狀態的氣體具有極大的熵，但如果將重力考量進來，這種狀態的熵反倒成了極小值。宇宙與生命的演化，和大霹靂之初這種奇特的起始狀態息息相關。 [5]

高涌泉 台灣大學物理系教授

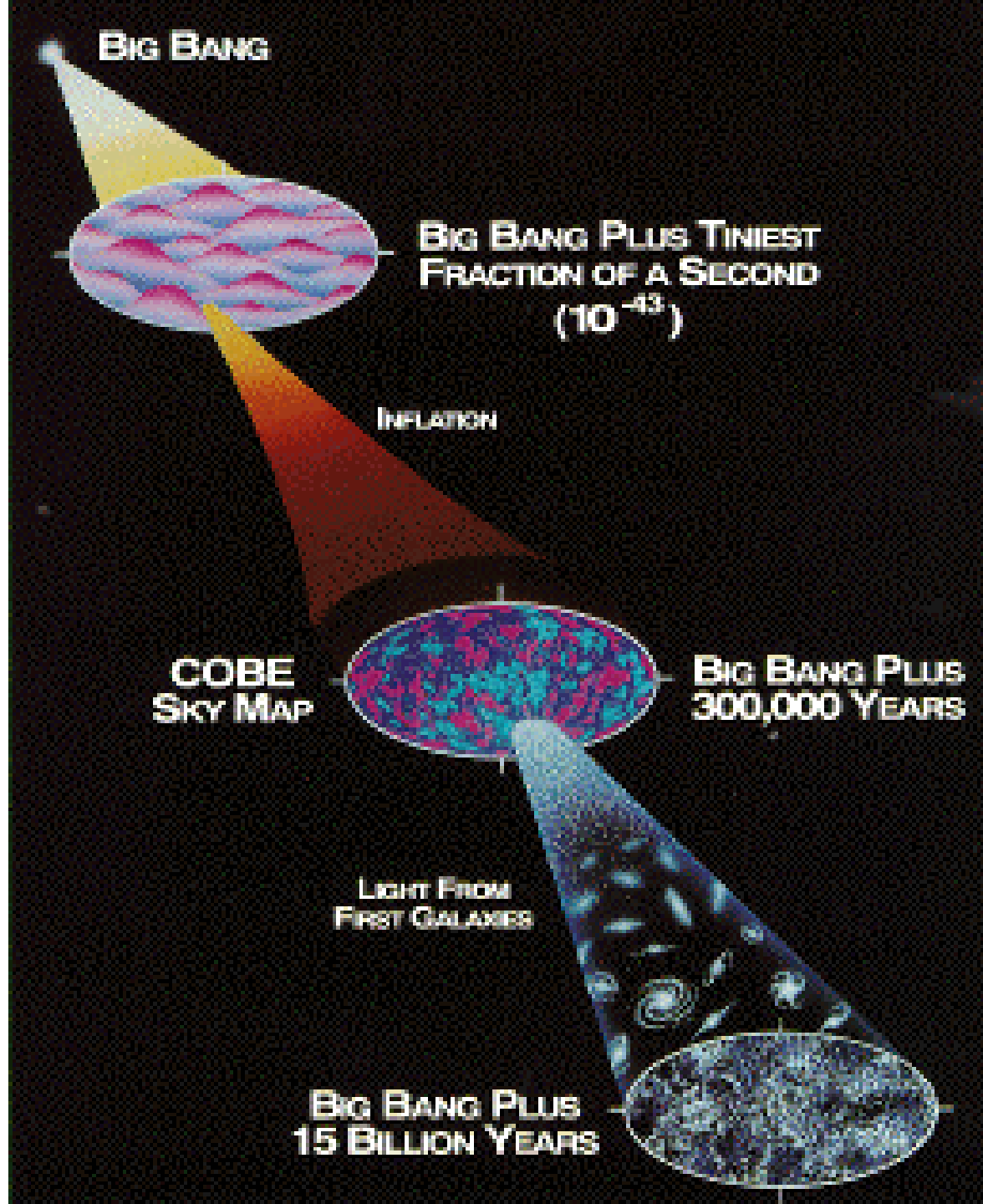


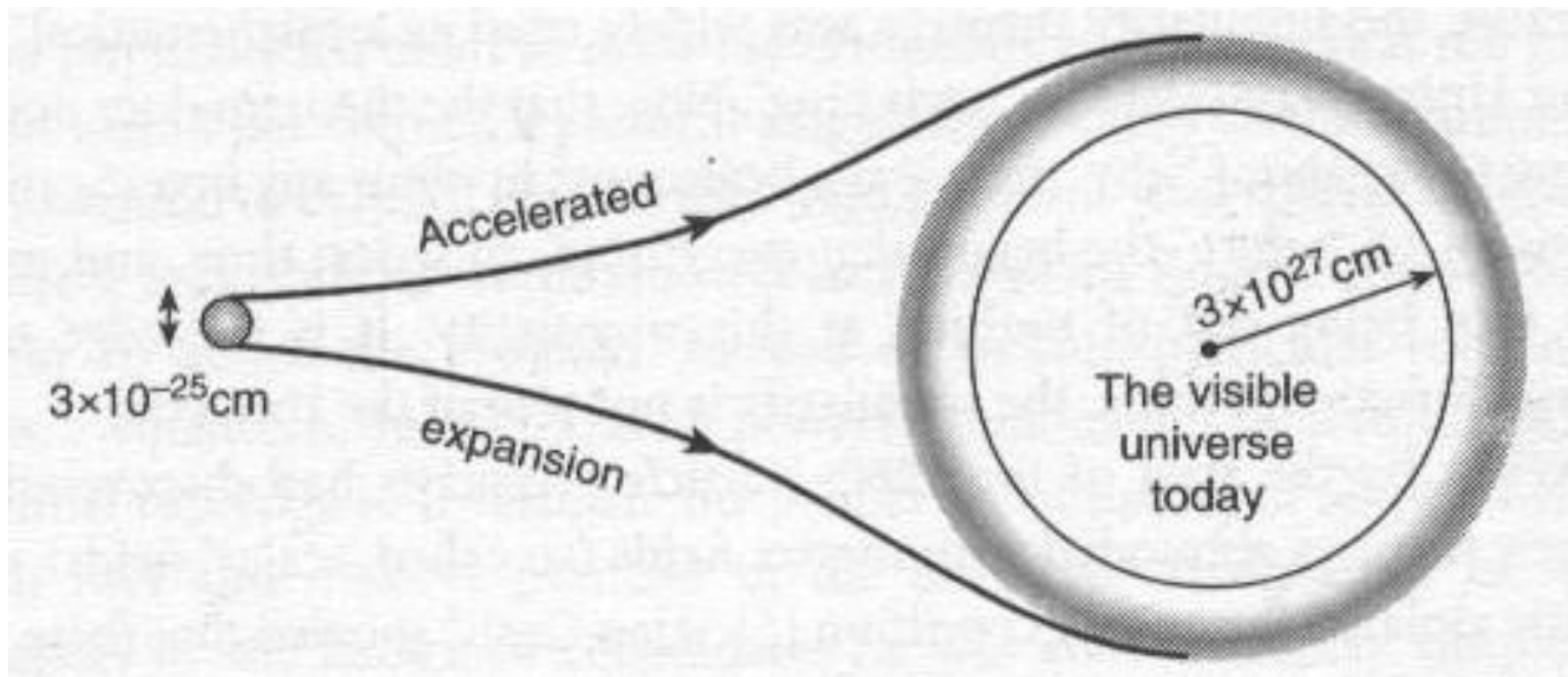
宇宙的起源  
大霹靂



大霹靂

約150  
億年前





無法想像的小

無法想像的大



# 為什麼夜晚的天空是黑的？

若宇宙中有無數顆星星，儘管每顆星都很暗，全部的星光加起來仍然應該能照亮夜晚的天空。

對於夜晚的天空為何是黑的這個問題，有點科學知識的人大約都會這麼回答：因為地球在自轉，晚上太陽在我們背後，陽光只能照到地球另一面，天空自然是漆黑的。但是長久以來，卻時而有人懷疑這樣的答案不夠完整、還沒抓到問題的核心。這些人對於宇宙與光學有比較多的了解，所以提出了頗有見地的理由，認為天空即便在晚上仍然應該和白天一樣明亮，以下就是他們的論證。

假設宇宙為無窮大，其中均勻散佈著會發光的星星（這是偉大牛頓對於宇宙的看法），又假設每顆星星都和太陽類似。我們從光學得知，來自每顆星星的光，其強度和發光星體離我們的距離平方成反比。由於星星離我們比太陽遠太多，在地球看來，每顆星所發的光可以說是極其微弱。但是由於宇宙中有無窮多顆星星，儘管每顆星都很暗，全部的星光加起來仍然應該能照亮夜晚的天空。

我們可以定量估算出全部星光的亮度：以地球為中心點，將宇宙分解成無窮多層圓球殼，每層球殼的厚度都一樣。在每一層球殼中，星星的數目和球殼的體積成正比，而體積就等於 $4\pi$ 乘上圓球殼半徑（即球殼與地球的距離）的平方，再乘上球殼厚度，所以球殼中星星的數目便和圓球殼半徑平方成正比。所以即使地球上所看到球殼中每顆星星的亮度和半徑平方成反比，一旦我們將每顆星星的亮度與星星的數目乘起來，所得到的亮度和半徑沒有關係。也就是說，由地球上來看，每層球殼所貢獻的亮度都一樣。由於球殼有無窮多層，所以總亮度應是無窮大！依此計算，夜晚天空不但是黑的，反而是亮到不行。

當然，我們的估算沒有考慮到前面的星星會擋住來自它後面的星光這回事，如果將這件事考慮進來，總亮度會從無窮大減小至約為一個星球表面的亮度。和實際情形相比，依然是太亮！

歷史上擔心這個問題的人物包括克卜勒、哈雷、契梭

（J. P. de Cheseaux）、奧伯斯（H. Olbers）等人。我們可能永遠查不出究竟誰是頭一位想到這個問題的人，但是自20世紀中葉起，這個疑惑就以「奧伯斯弔詭」（Olbers' Paradox）聞名——儘管我們可以確定奧伯斯絕不是提出此問題的第一人。（如果我們在意歷史，稱之為「克卜勒弔詭」或「哈雷弔詭」都會比「奧伯斯弔詭」恰當。）

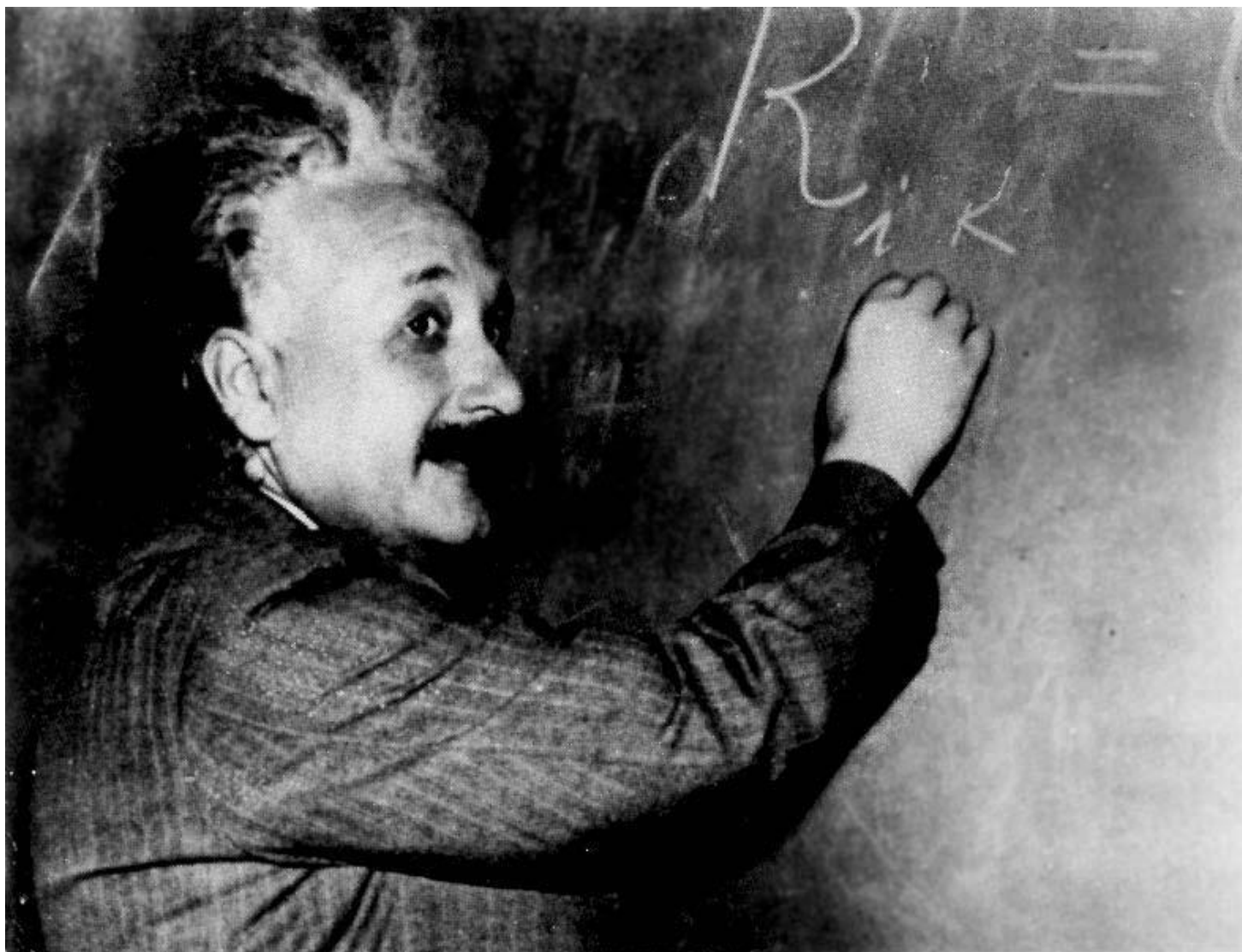
那麼該如何解決「奧伯斯弔詭」？或許宇宙是無窮大的假設錯了？如果真是如此，那麼宇宙有邊界嗎？邊界外是什麼？這些問題都很難回答。為了避開邊界所引起的問題，有人就認為宇宙雖不是無限大但卻沒有邊界。二維球面就是這種「有限但無邊」空間的一個例子。但這個想法不能解決「奧伯斯弔詭」，因為我們依舊避不開每顆星星與其「影子」所發的光。（請想像二維球面：光如果一直往前走，就會走回原出發點，也就是說我們會（不停地）

看到星星朝向另一邊所發的光。）

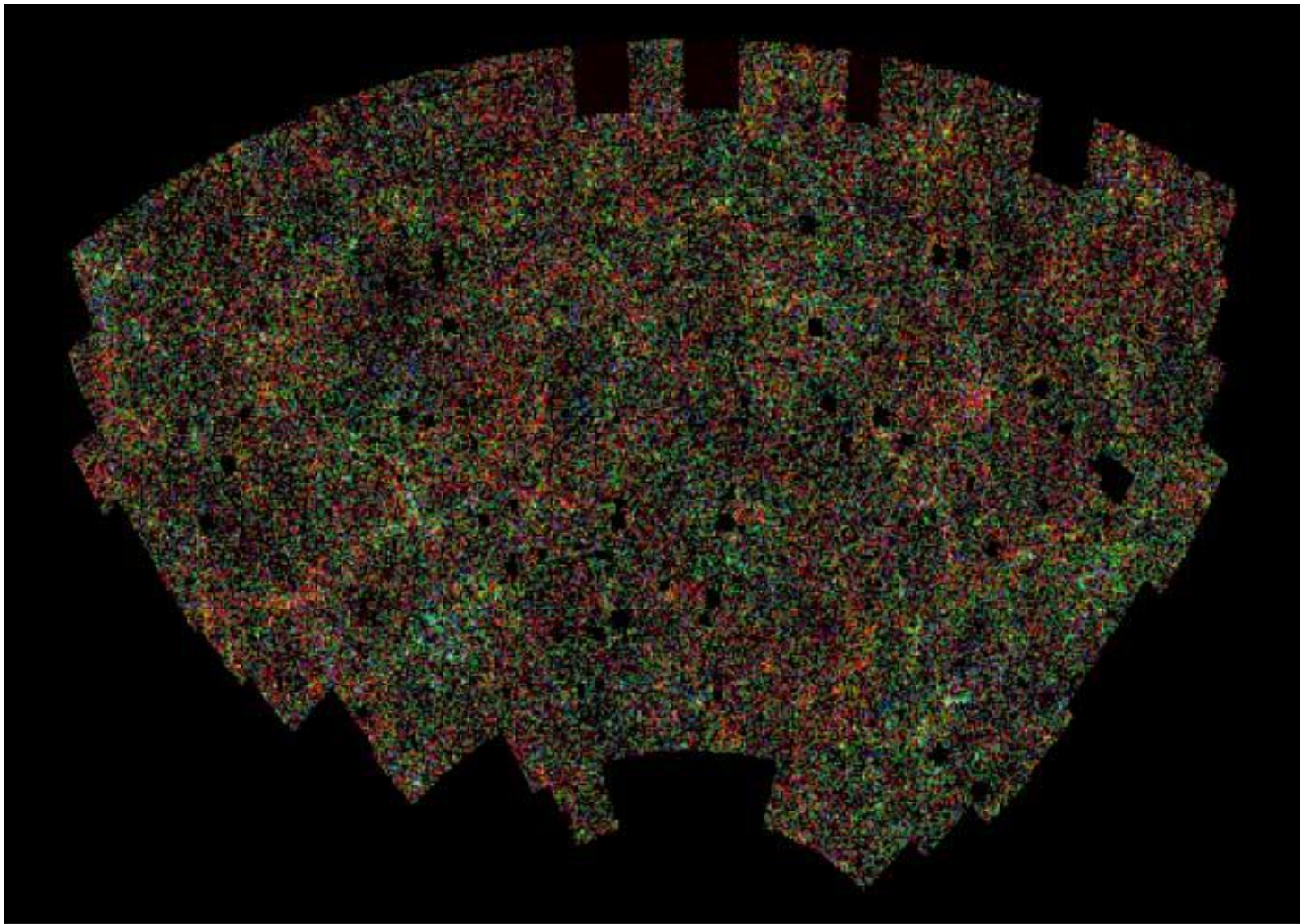
契梭在1744年提出了另一種解決方式（奧伯斯在1823年也想到類似的點子），他說部份星光在路上被星際間的氣體、灰塵所吸收，所以我們不會收到那麼強的光。可是這個看法其實也沒有解決問題：就算有氣體（或是其他物質）將星光吸收了，這些氣體在達成熱平衡之後，還是會將光再釋放出來。

正確答案來自以下兩件事實：一、宇宙儘管可以是無窮大，但並非無窮老。依我們目前所知，宇宙的年齡只有137億年，所以離我們太遠的星體發出的光，我們目前還來不及看到。二、星體的壽命是有限的，約是數十億至100億年；先前的估計假設星體可以無止盡的發光，這是錯的。此外，宇宙中的星星平均而言其實相當稀疏，就算假設宇宙年齡近乎無窮大，只要星球年齡有限又足夠稀薄，我們在夜晚所看到的總星光就會遠小於太陽的光。

高涌泉 台灣大學物理系教授



宇宙論理論基礎 廣義相對論

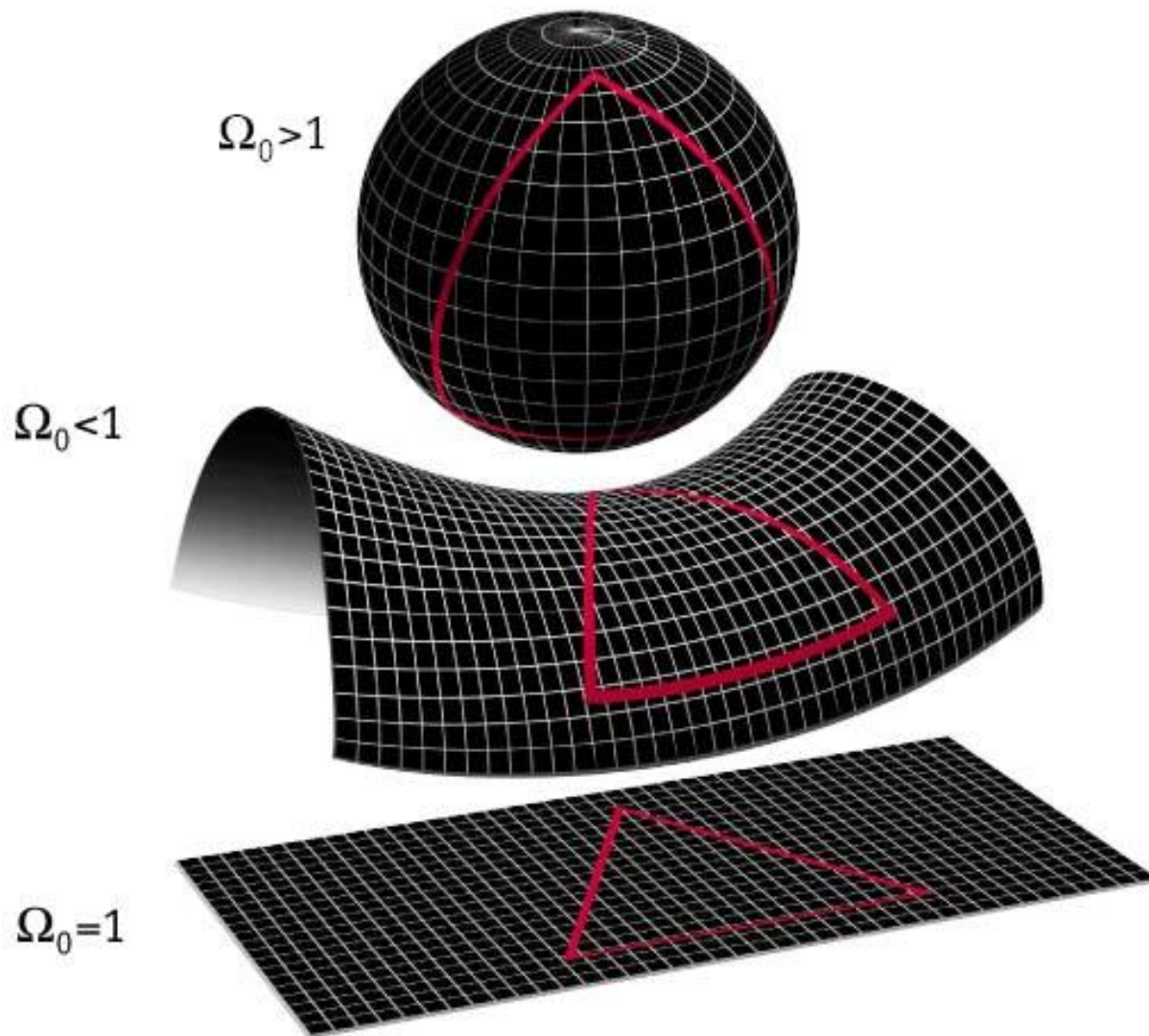


APM Survey picture of a large part of the sky, about 30 degrees across, showing almost a million galaxies out to a distance of about 2 billion light years.

MAP990047

## **The Cosmological Principle** 宇宙學原理

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



MAP990006

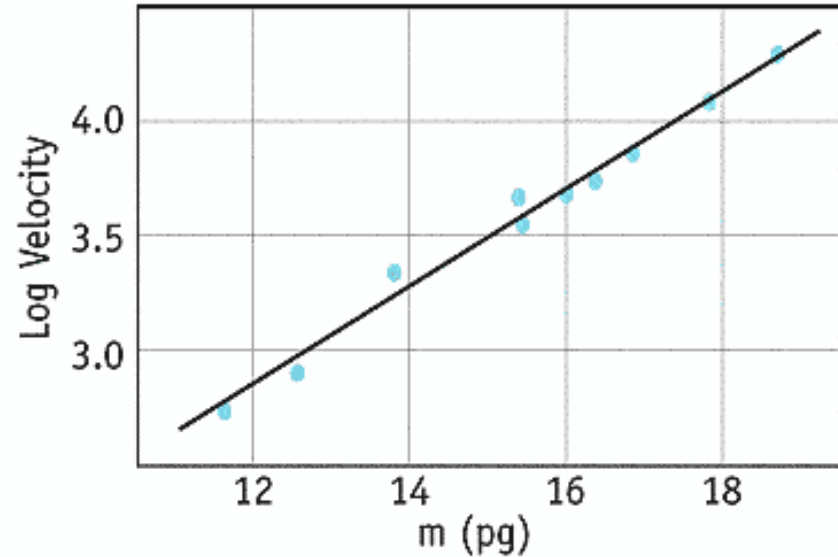
<http://map.gsfc.nasa.gov/>

# DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

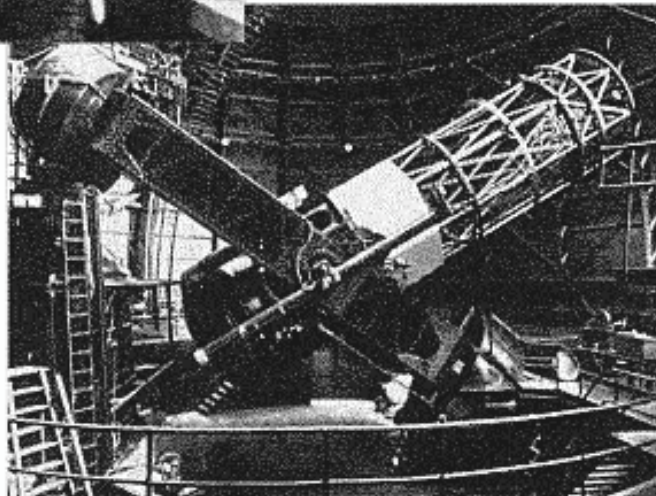


Edwin Hubble

哈伯



宇宙膨脹

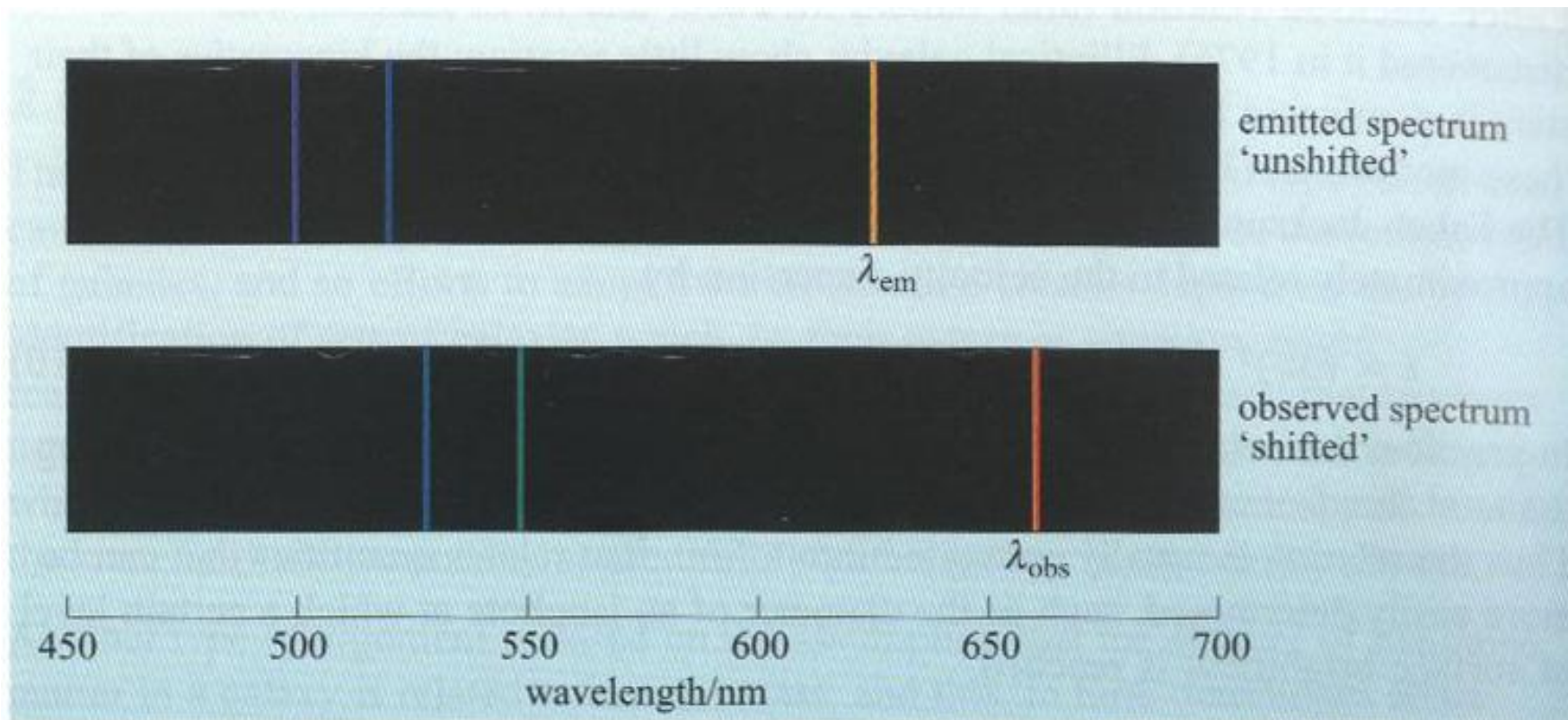


Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

發現宇宙膨脹

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

(1920's~1930's)

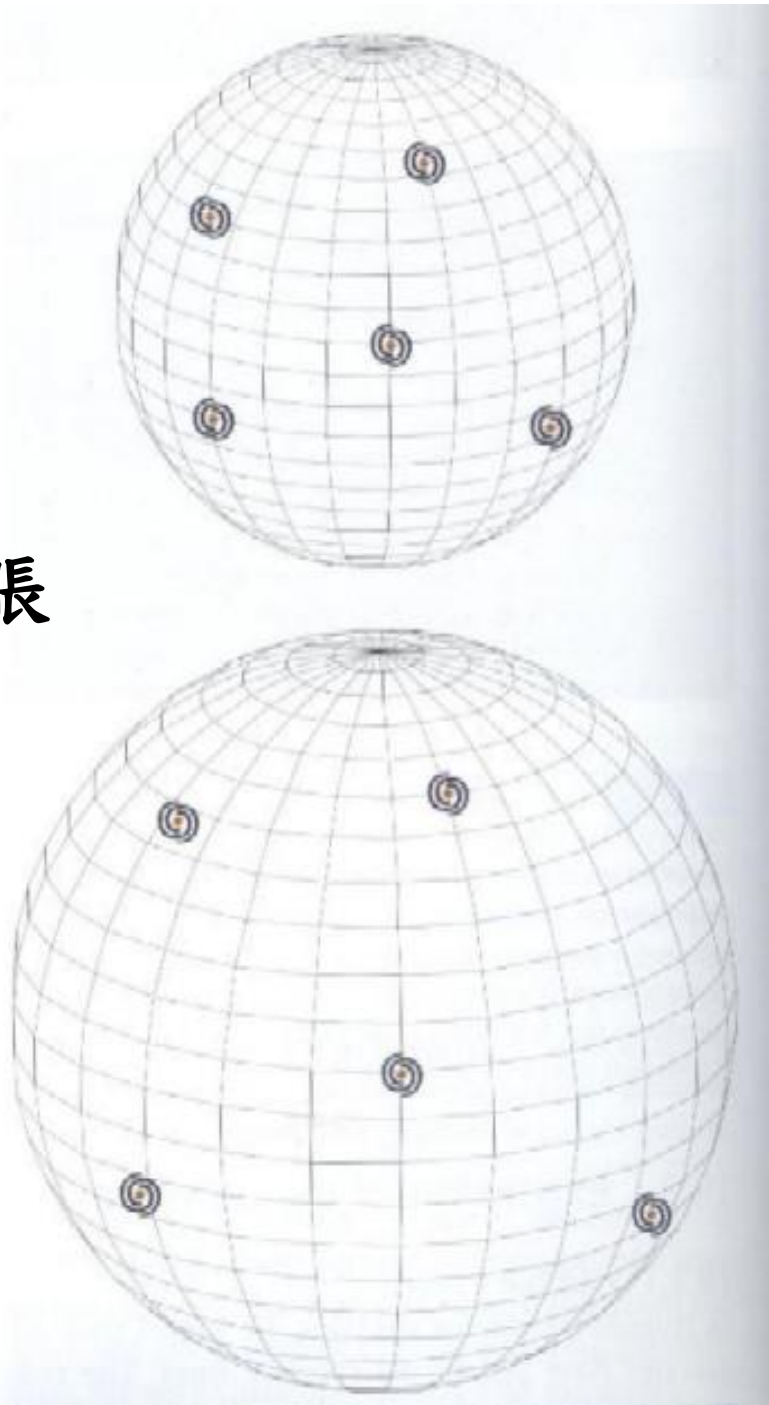


## 都普勒效應 (Doppler effect)

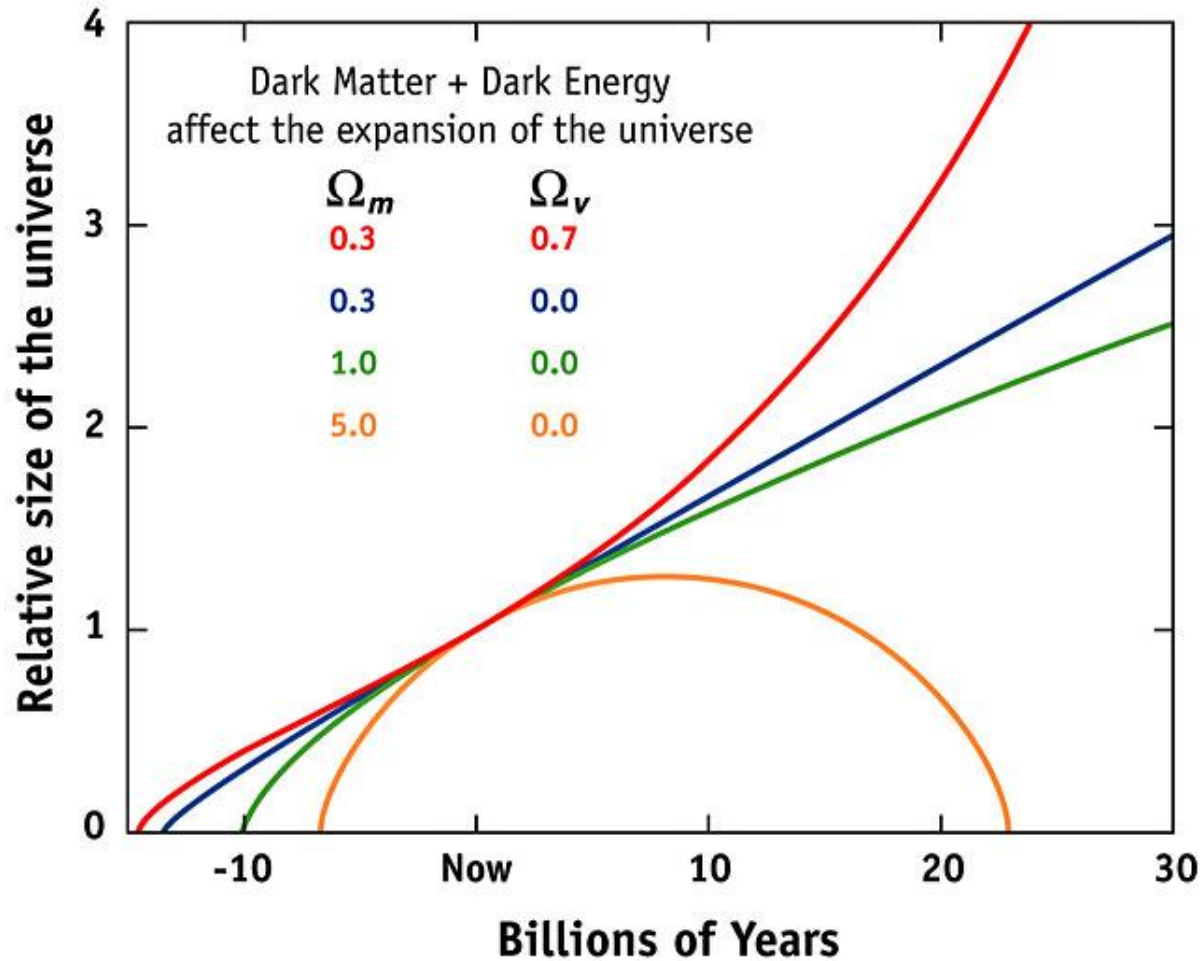
波原遠離 波長變長

波原接近 波長變短

宇宙持續在膨脹

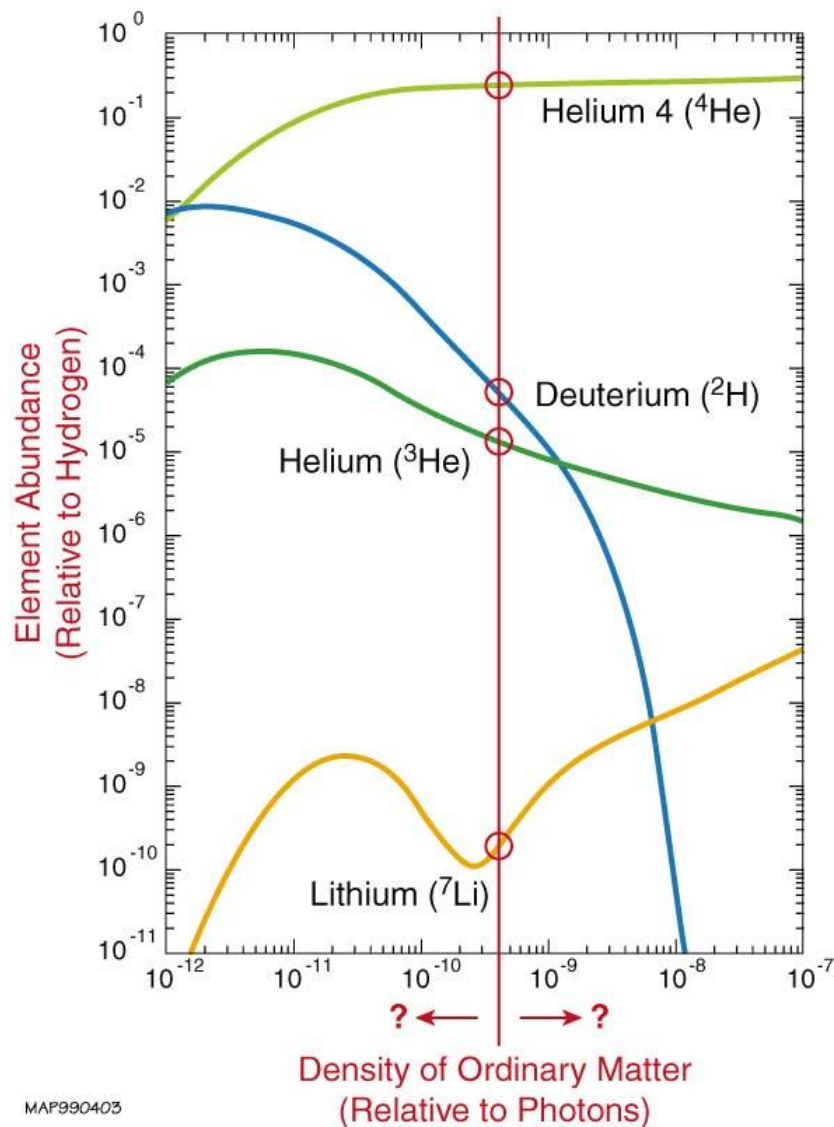


# EXPANSION OF THE UNIVERSE



大霹靂

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



MAP990403

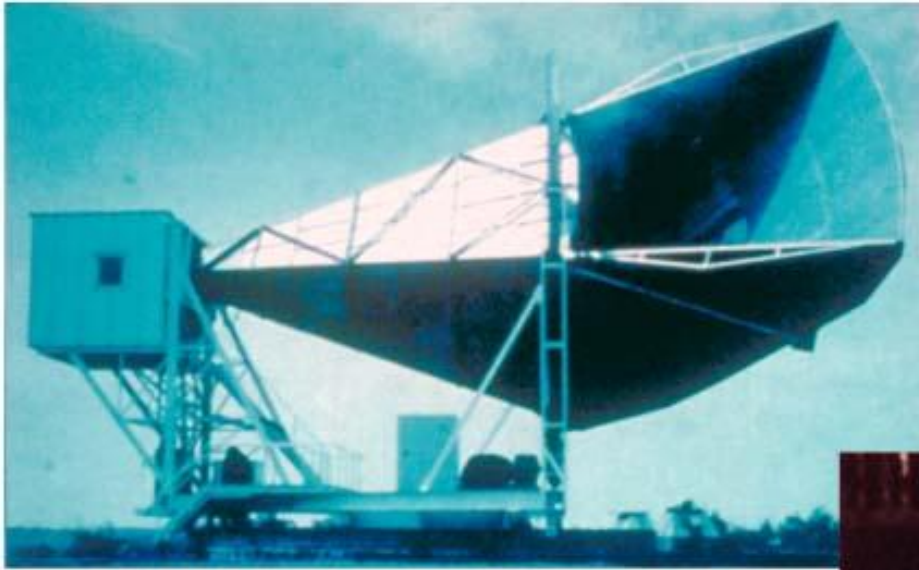
宇宙膨脹的證據

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

# DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

宇宙背景輻射

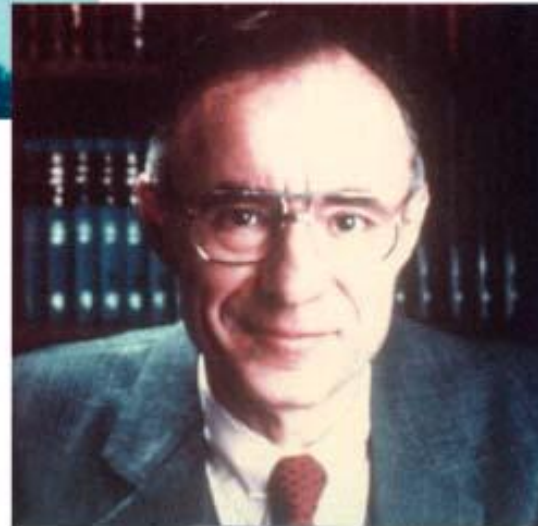
測量7.35cm 微波的強度



Microwave Receiver



Robert Wilson

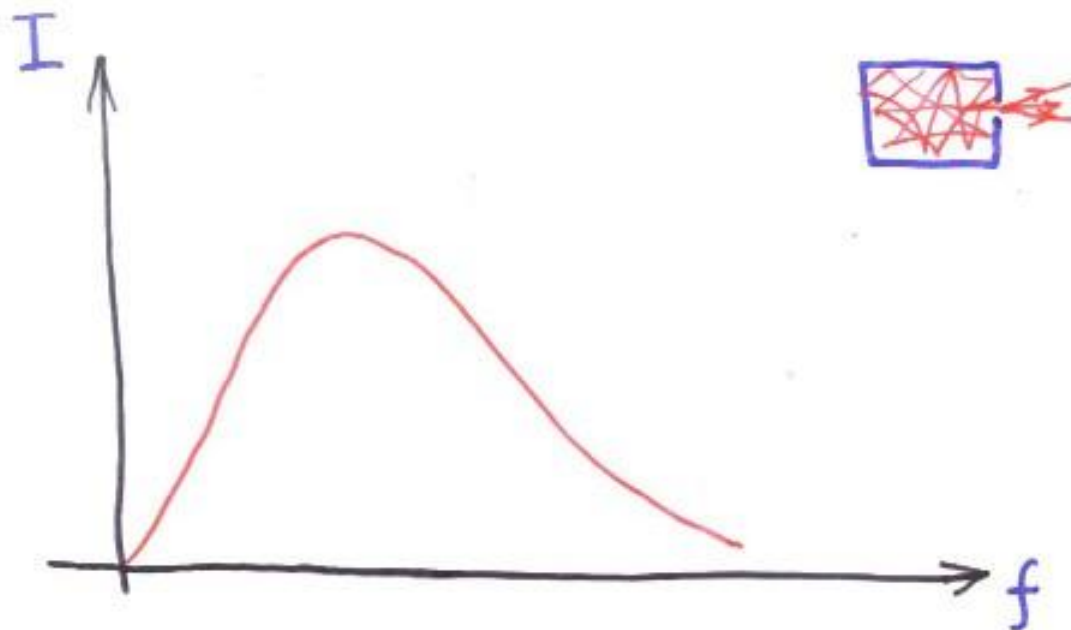


Arno Penzias

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

MAP990045

# 黑體輻射



普朗克 1900

能量是不連續的

$$E = n \cdot h f$$

愛因斯坦 1905

$$E_{\text{光子}} = h \cdot f$$

光子



普朗克 M. Planck

1858-1947



愛因斯坦 A. Einstein

1879-1955

光量子的概念



# 水火不容

光究竟是一種波動，還是一種粒子？

前陣子，我為了準備一篇介紹狹義相對論的文章，而想查看電磁學大師馬克士威本人如何說明「以太」這個觀念，於是找上他為大英百科全書第九版所寫的〈以太〉一文。馬克士威從以太的本意說起：它是一種比可見物體更微妙的物質，存在於空無一物的空間中。它在歷史上曾扮演各式各樣的角色，但這些角色大半沒什麼科學意義，唯一能經得起考驗的是惠更斯（Huygens）為了解釋光的傳遞所發明的以太介質。

在惠更斯的時代，人們對光的本質主要有兩種見解：一是粒子說，認為光是一種微粒般的物質，以高速直線前進；粒子說陣營的主將是牛頓。二是波動說，主張光是類似水波的一種波動；惠更斯是波動說的主將。當時的人們相信任何波動都需要介質，惠更斯的以太就是承載光波的介質。

由於馬克士威能夠從他的電磁學方程式證明電場與磁場的振動可以形成電磁波，而電磁波速度和光速一樣都是  $c (= 3 \times 10^8 \text{ 公尺/秒})$ ，所以他很自然地認定光即是一種電磁波，如此一來電磁學便和光的波動說連起來了。馬克士威在〈以太〉裡寫道，我們對光的現象理解越多，以太存在的證據就累積越多。他接著以光的干涉現象為本證明了光必然是一種波動，故而以太這種介質必得存在。

大師這段100多年前的論證不僅證明了光的波動性，還非常清楚地闡明波和粒子是水火不容的兩種概念。在邏輯上，馬克士威簡單但犀利的理由無懈可擊，今天讀來仍令人信服：光本身不是一種物質，這可用干涉現象來證明。我們利用光學方法將來自單一光源的一束光分成兩束，讓這兩束光走不同的路徑，然後再把它們合併，並落在屏幕上。如果將其中一束擋掉，則另一束會落在屏幕上，使屏幕出現亮點。但如果我們讓兩束光都通過，屏幕上有些地方反而會變暗，這證明兩束光相互消滅了對方。

因為我們不能假設兩個物體一旦放在一起，可以相互消滅，所以光不可能是一種物質。我們所證明的是一束光可以正好是另一束光的相反，就如  $+a$  正好是  $-a$  的相反——無論  $a$  是什麼。在物理量之中，我們發現有些量的正負號可以顛倒，但有些不行。例如，在某個方向上的位移正好是在反方向上同樣位移的相反。這樣的量不能代表物質，只能代表一種發生在物質上的過程。所以我們的結論是，光不會是一種物質，而是一種發生在某物質上的過程。（在前述情況下）第一束光發生的過程永遠正好是同一時刻另一束光發生過程的相反，因此這兩束光合併後，就相當於沒有發生任何過程（所以屏幕就出現暗點）。

馬克士威無法想像光如何有可能既是粒子（一種帶能量的物質），又能表現出干涉現象，於是他毫不猶疑排斥了光的粒子說，而接受波動說。任何了解此論證的人都會同意這結論。然而物理世界並不是全然照著無瑕疵的邏輯運行的——馬克士威的結論在1905年被年輕的愛因斯坦推翻了。

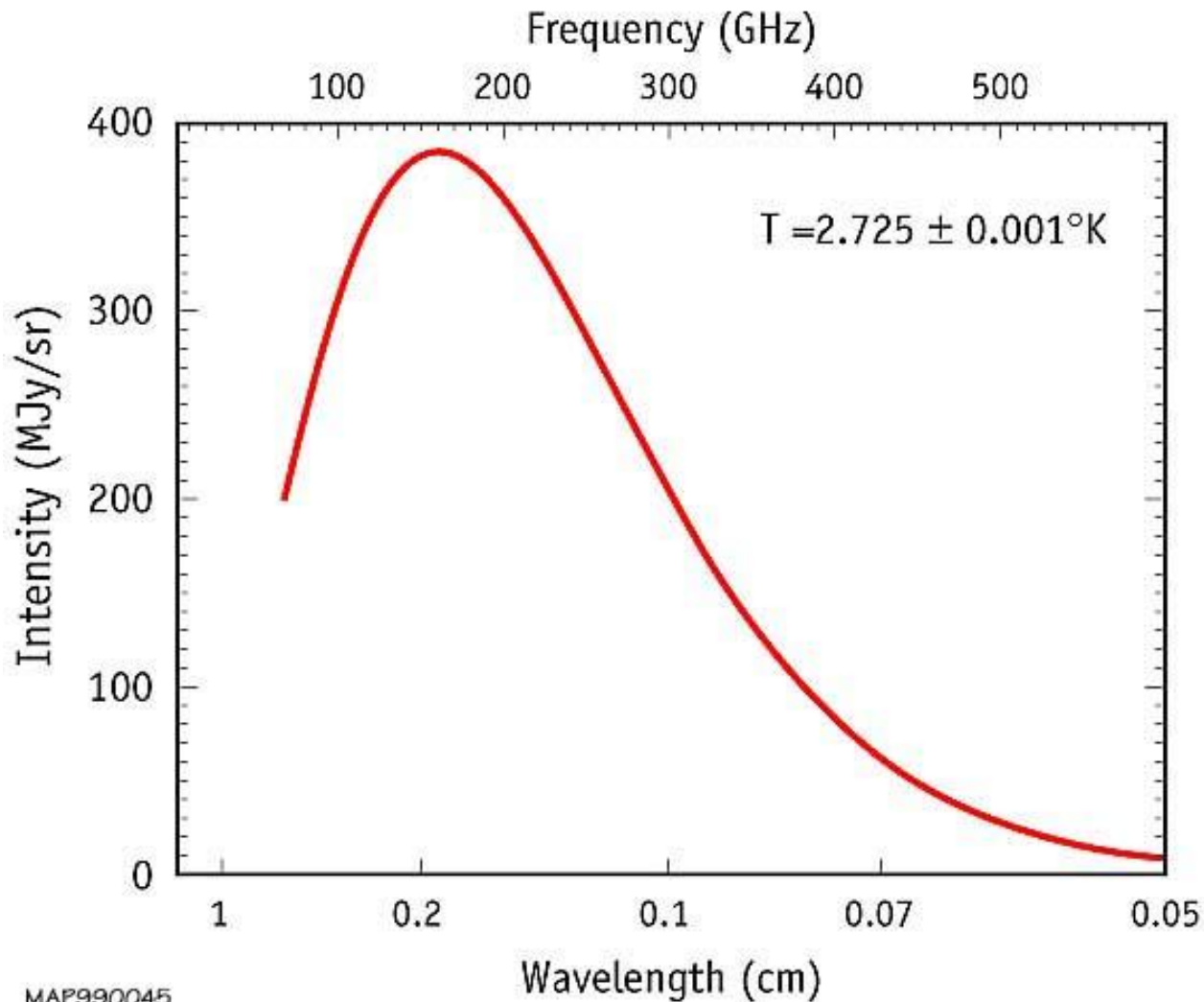
首先是以太存在與否的問題：馬克士威認為，有個座標系與眾不同，其特殊之處在於以太介質靜止於其中。光速只有在這個座標系中才會等於  $c$ ，在其他座標系中的光速都不會是  $c$ 。但愛因斯坦的狹義相對論卻要求一切座標系都等價，並且光速在任何座標系中都等於  $c$ 。惠更斯的以太在狹義相對論中成了個不必要的假設。

其次是光其實也有粒子性：愛因斯坦跟隨著普朗克的腳步，提出了光量子的假設；在這假設之下，光是由一顆顆帶能量的光量子所組成的。愛因斯坦並指出這個假設可以在所謂的「光電效應」中獲得驗證。

光怎麼可能既是粒子又是波？愛因斯坦難道可以駁斥馬克士威的論證嗎？他當然不能，所以才會對人說：「我思考量子問題的時間百倍於我思考廣義相對論的時間。」而且直到過世，都拒絕相信採用「波粒二象性」的量子論會是最後的真理。

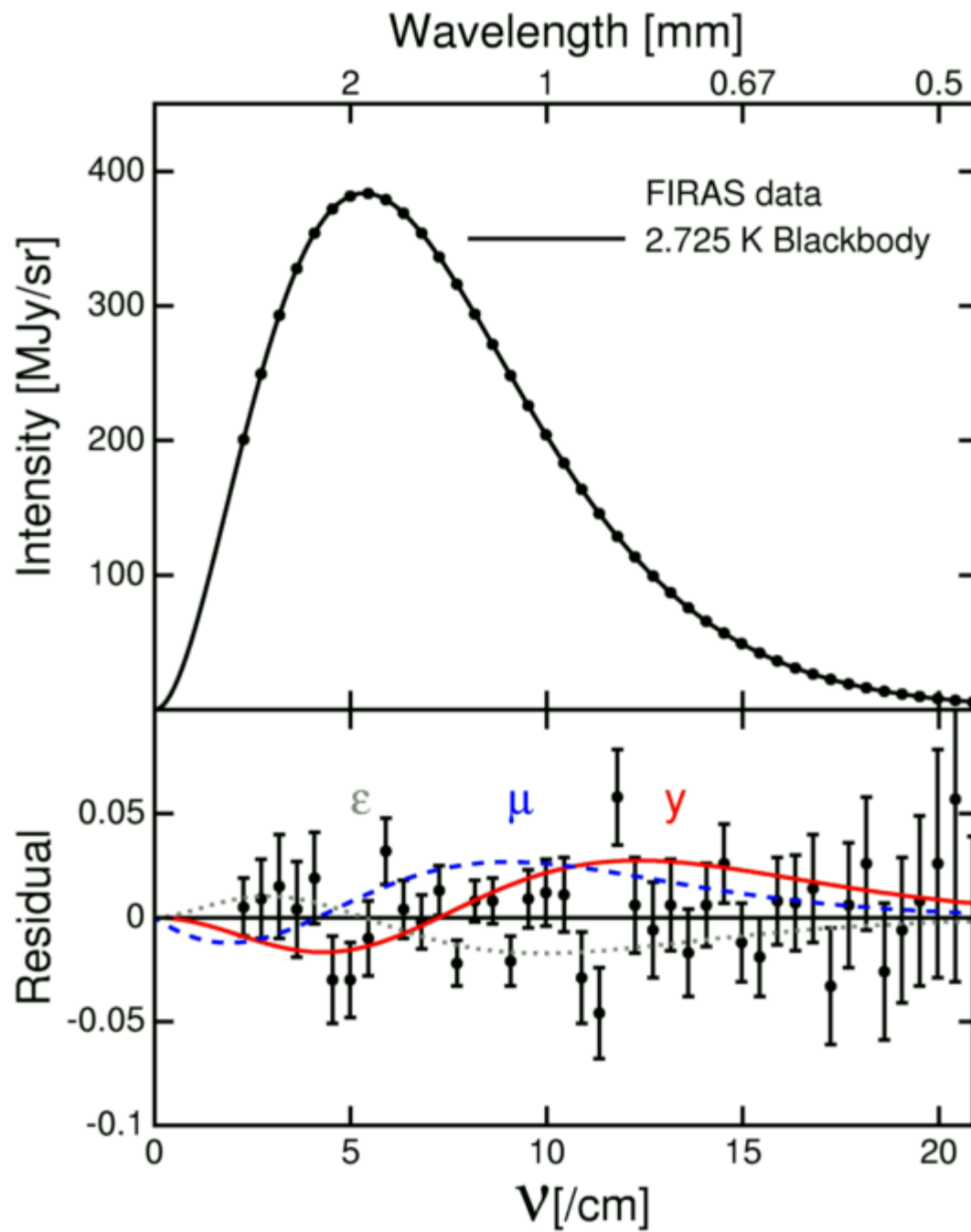
高涌泉 台灣大學物理系教授

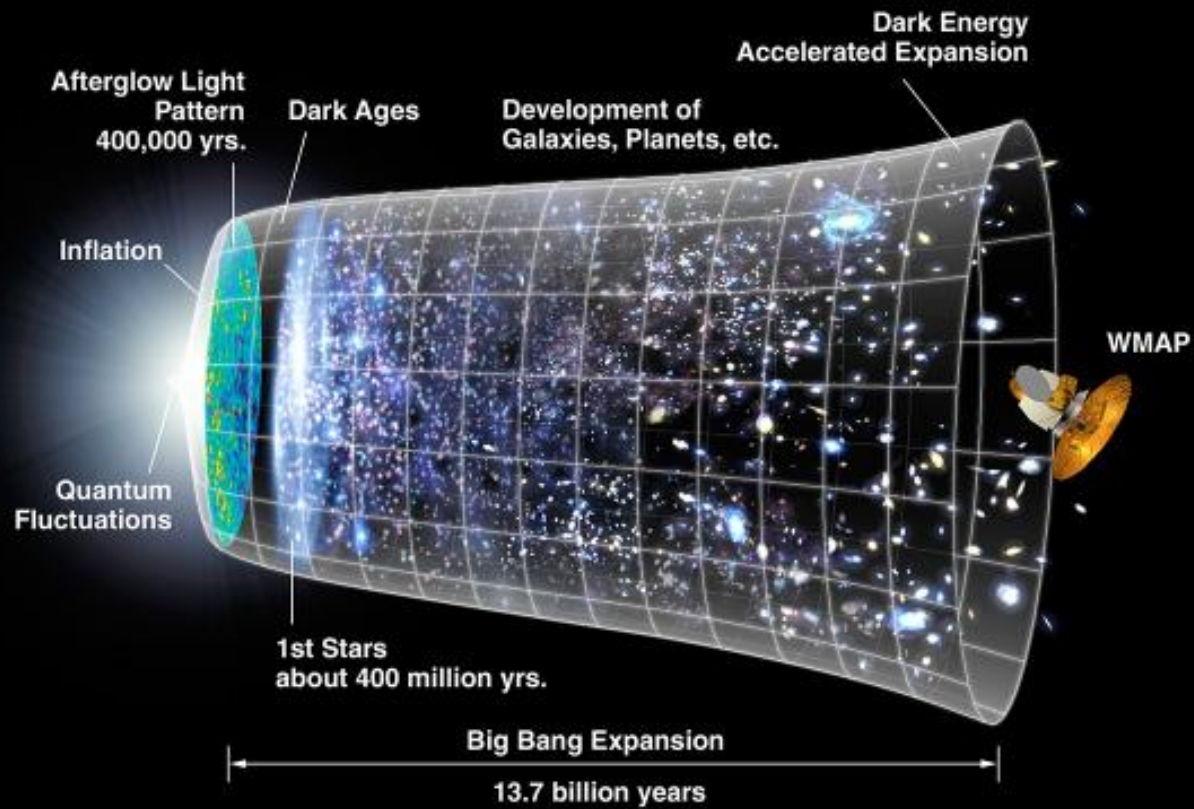
# SPECTRUM OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND



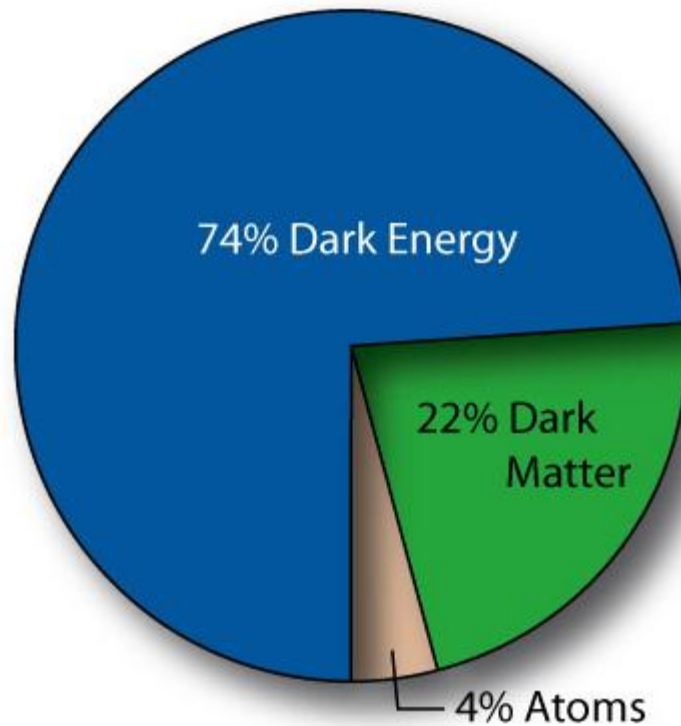
MAP990045

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



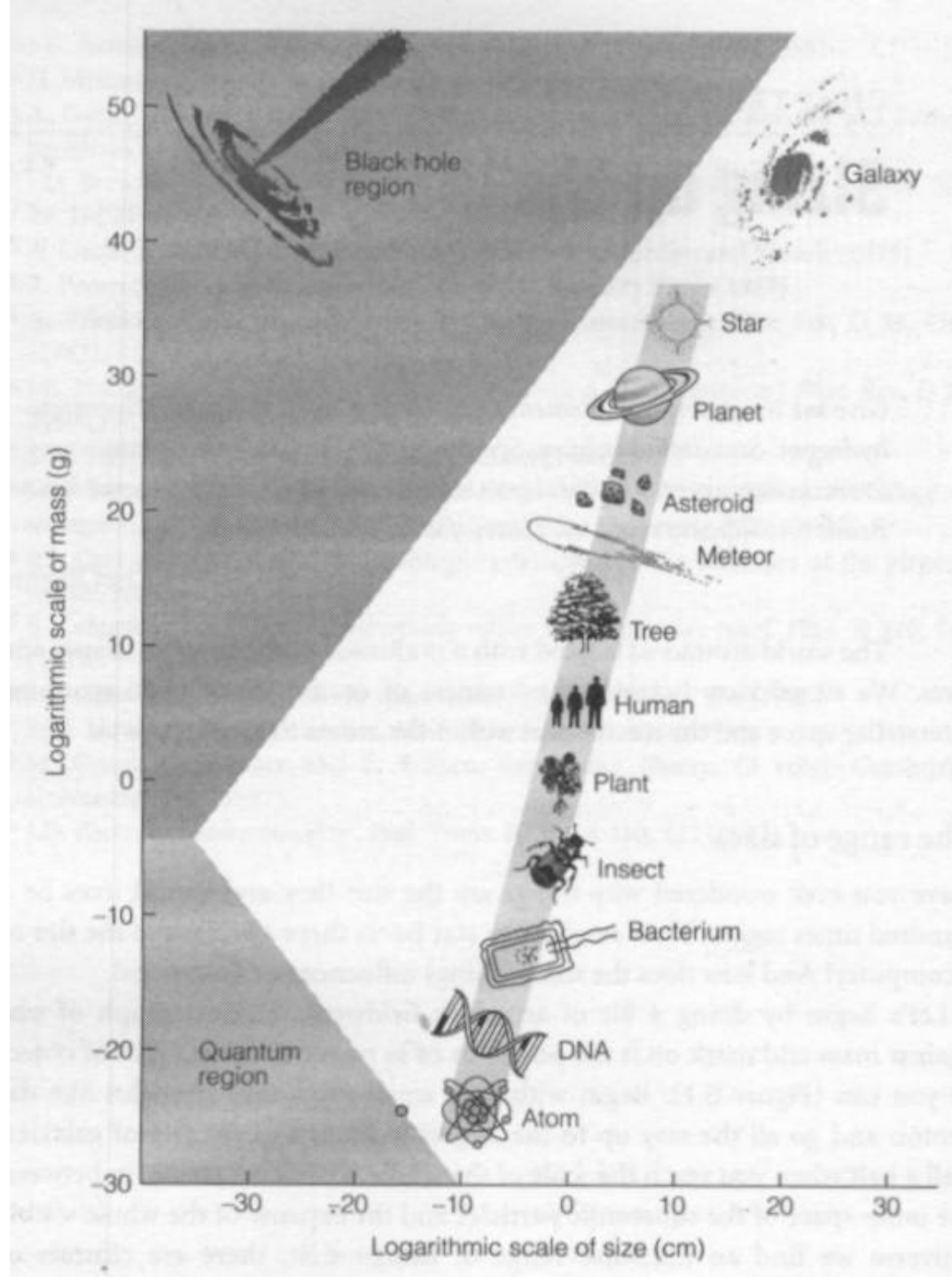


4% 一般物質, 22% 暗物質, 74% 暗能量



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

宇宙的終極命運？



認知 心靈 自由意志



生命



DNA, Evolution(演化)



非生命物質

宇宙中適合生命演化的環境非常難得

我們目前還不知道是否有「外星人」

依據演化論，人類的出現似乎只是巧合而已

不過演化之艱難，讓生命自有其莊嚴

人雖渺小但卻珍貴

French philosopher Blaise Pascal:

"I feel engulfed in the infinite immensity of spaces whereof I know nothing and which know nothing of me. I am terrified...The eternal silence of these infinite spaces alarms me."

費曼說：「有很多事情，我對它們是一無所知，例如問『我們為何在這裡？』是否有任何意義？．．．我不一定要有個答案。沒有答案並不會讓我感到害怕，迷失在一個神祕而沒有目的的宇宙也不會令我慌張。依我的理解，宇宙就是那個樣子。或許吧。它不會嚇著我。」

愛因斯坦曾說：「我不相信有私人的神（Personal God）。在我身上如有任何能被稱為是宗教性的東西，那它是對由我們的科學所能揭露出來、自然的結構之無窮仰慕。」

單僅擁有科學知識並不足以形成一個人文的、理性的、科學的世界觀。還得要能拋開對個人福禍的牽掛，不盲從，有正視現實的勇氣。這樣的要求，對大多數人來說恐怕是吞不下去的。我們經長期演化出來的生物本能 大約和如此的世界觀是不相容的。

But Abrams and Primack argue that humans still hold a central and special position in the Universe, perhaps not geographically but in many other ways. For example, we are special because we are made of the rarest material in the Universe, namely large atoms. Also, we live at a central time, because most nearby galaxies are past their violent youths but are not yet senescent. And we live at the midpoint of our planet's life, which is a few billion years old, and which has a few billion more years before it will be roasted by our Sun swelling into a red giant. And humans have a reasonably central size, roughly halfway between the smallest length scales ( $10^{-33}$  cm) and the distance to the cosmic horizon ( $10^{28}$  cm).

# 物理定律 — 運動方程式

世界是「命定」(deterministic)的嗎？

**不是！**

因為不確定性(Uncertainty)

**我們無法精確地預測未來！**

**(無論是古典世界或是量子世界)**

起伏(fluctuation)是自然的本性之一  
(例如布朗運動、量子現象)

人文世界的發展也常常是隨機、無規的，  
個人命運也大致如此

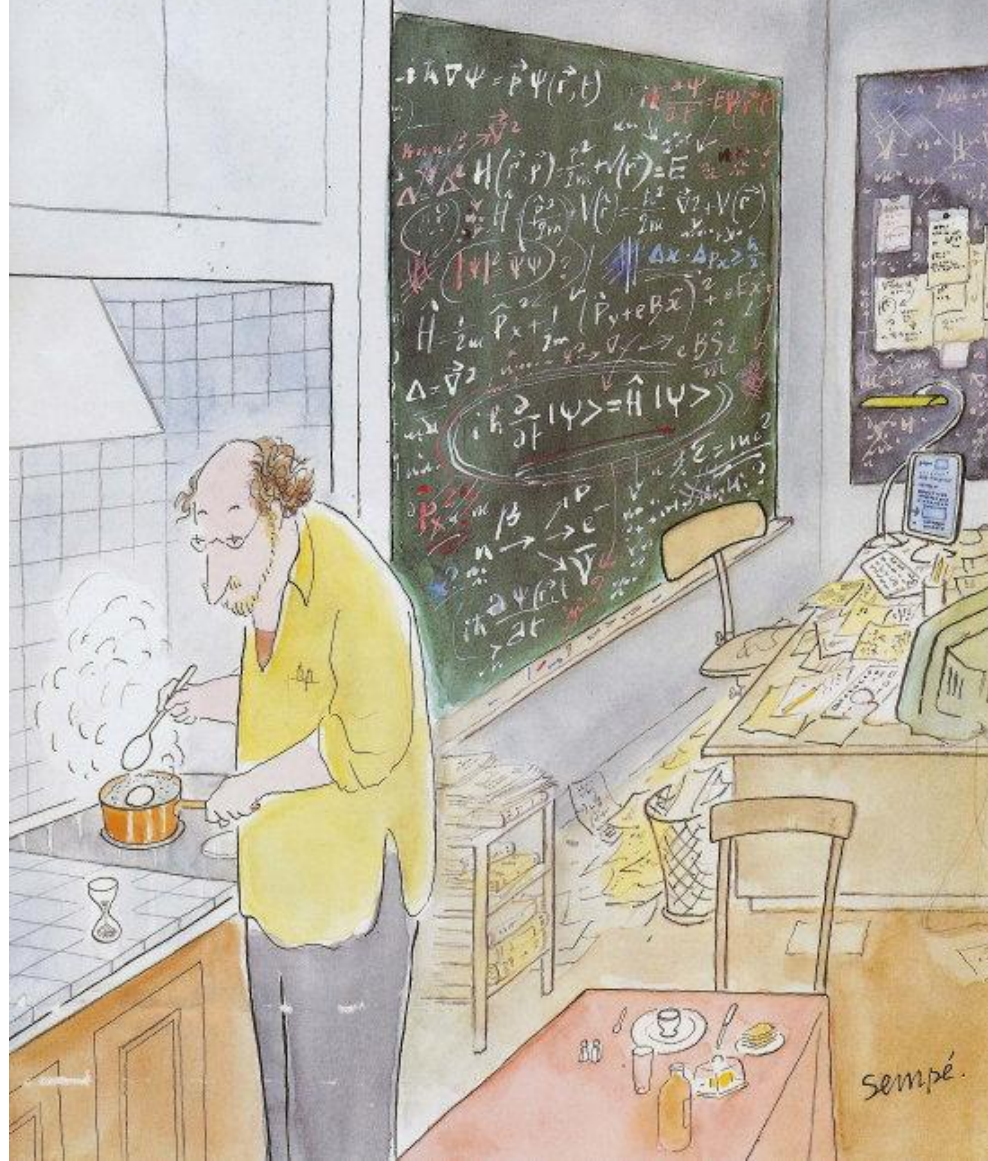
大多數人覺得很難適應這樣的情況

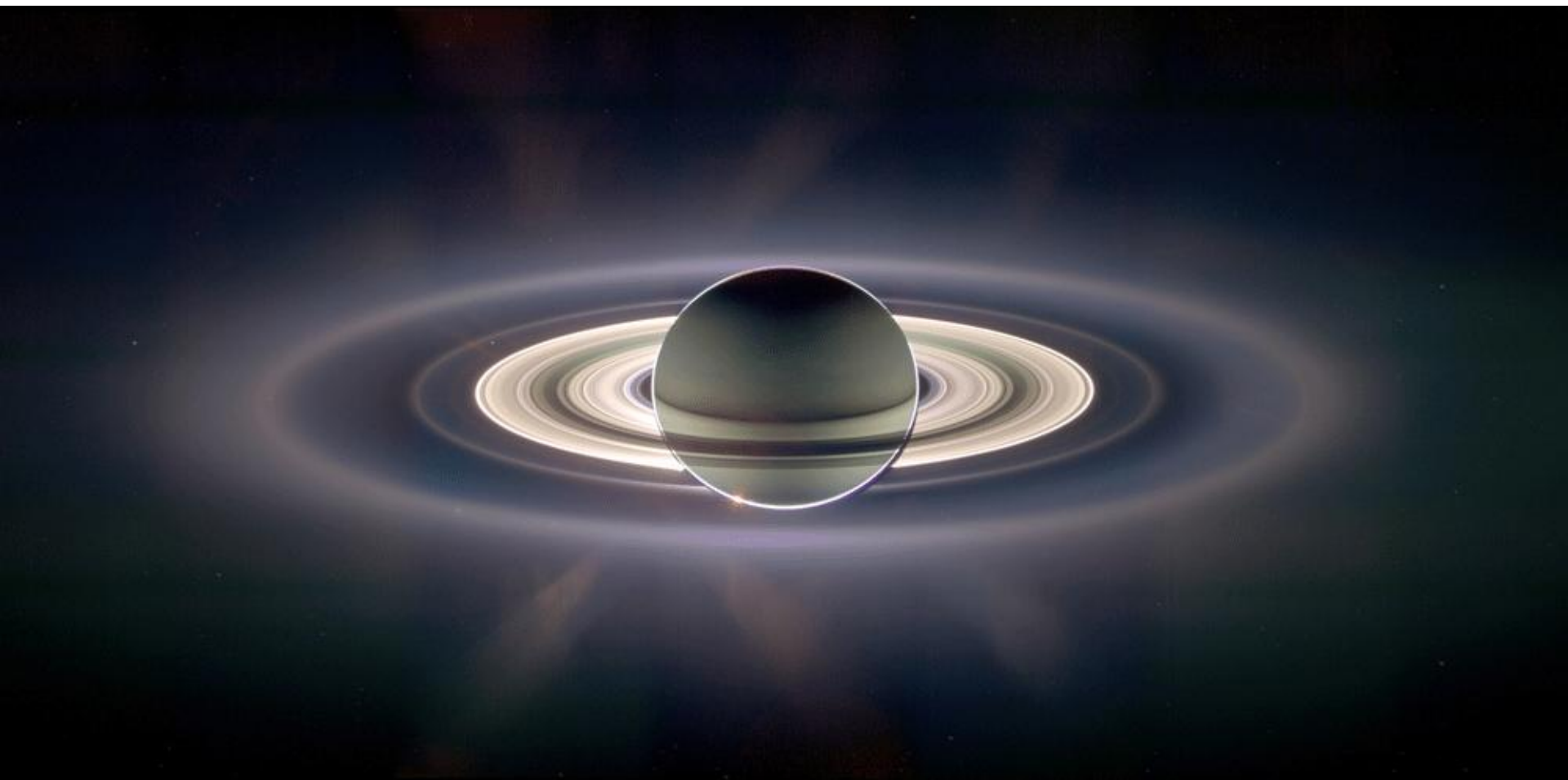
PRICE \$4.50

THE

MAY 21, 2007

PRICE \$4.50 THE MAY 21, 2007  
NEW YORKER





## Epicurus (341 B.C.-270 B.C.)

“He was no scholar. He scorned the sciences in general, equated mathematics and falsehood, and showed contempt for rhetoric and letters. The important thing was how to live happily”

“happiness consists of inner peace”

“two concurrent forces constantly threaten our peace of mind”

- Gods – interfere at every turn
- Death – gateway to hell

“How can the soul recover the tranquility which it has lost? It must be shown that the gods take no part in the daily lives of men, and that death is the end of everything. “

“Epicurus saw that atomism, better than any other system, could furnish the proof required by the soul.”

- atoms obey mechanical laws —gods cannot interfere, no mysterious and supernatural forces!
- soul is simply a combination of atoms, therefore it decays after death just as the body and all other things decay— **Death is no evil, for we are completely destroyed!**