

前言 2

序章 宇宙最大的謎題： 地球之外存在生命嗎？

暗淡藍點與航海家金唱片 14

地球只是宇宙的1個「暗淡藍點」 14

像地球一樣的星球在宇宙是獨一無二的嗎？ 16

航海家號攜帶的金唱片 17

世界各國陸續發射火星探測器 20

紅色行星，火星上也曾孕育生命？ 20

立志成爲太空強國的中國也發射了火星探測器 22

將火星石頭帶回地球的第一步 23

尋找有生命行星的詹姆斯·韋伯太空望遠鏡 25

NASA發射的革命性太空望遠鏡 25

主鏡在擾亂狀態下發射升空 27

剛開始觀測就有了諾貝爾獎級的發現！ 28

為何天文生物學正備受注目？ 31

將「地球生物學」擴張到宇宙 31

天文生物學受注目的2個原因 32

生命即使在嚴酷的環境下也能存續 34

人類如何看待地外生命的存在 35

想像異世界居民的古代人 35

主張外星人存在而被處以火刑的神父 36

羅威爾引發的火星運河爭議 37

太空探索時代的揭幕和外星生物學的誕生 39

第1部 太陽系內的生物探測

第1章 地球上的生物 是如何誕生的呢？

太陽系的行星們 42

距離的單位：天文單位和光年 42

依組成成分分類行星 45

衛星、小行星、隕石 44

冥王星與古柏帶天體 46

位於太陽系邊緣的無數小天體 47

太陽系的誕生與行星形成之謎 49

星星誕生自宇宙中的氣體和塵埃 49

太陽的誕生 50

岩石行星的誕生 52

氣體巨行星與冰巨行星的誕生 54

行星形成理論必須進行大幅修改？ 54

什麼是太陽系適居帶？	56
「生命能居住的区域」在哪裡？	56
火星表面無法存在液態水的理由	57
氣態巨行星周圍的適居帶	58
生命到底是什麼？	61
生物的4個「特徵」	61
擁有細胞膜和表皮等界線	61
可用化學反應合成、分解物質	62
會自我複製或繁衍後代	63
遵循文字演化	64
有關生命起源的研究歷史	66
生命來自非生物？	66
自然發生說的否定與演化論的登場	67
只有最早的生命是自然發生的？	68
米勒和尤里的衝擊性實驗	69
地球最早的生命是何時、何地誕生的？	71
不斷被天體轟炸的原始地球	71
地球海洋的誕生	72
尋找最古老生物的化石	73
地球的生物是在哪裡誕生的？	74
最初的生命來自宇宙？	76
知名科學家們曾信奉的「胚種論」	76
生命的種子是由彗星帶來的？還是智慧生物種下的？	77
地球的生物是由來自宇宙的有機物質形成的？	78

在極端環境中的生活的生物們	82
在深海生育的超嗜熱細菌	82
地表之下也存在生物的樂園！	82
發現能用近紅外線行光合作用的植物	83
宇宙中存在很多能利用紅外線的生物？	85

第2章

火星、木星、土星的衛星上存在生命嗎？

維京號探測器的火星生物探測任務	86
火星是滿布撞擊坑的乾燥星球？	86
火星的地形豐富，且曾經存在液態水？	87
從歡喜到失望的維京號火星生物探測計劃	89
在來自火星的隕石上發現了生命的蹤跡？	91
在南極發現的隕石引發巨大騷動	91
火星存在生命蹤跡的「4項證據」	92
這些結構物質的是微生物化石嗎？	94
火星在過去曾是「水星」	95
火星探測的新關鍵字是「找水！」	95
現在的火星地表也存在液態水！	96
在火星尋找有機物	98
今後的火星生物探測計劃	100
以未來的樣本回收為目標	100
生命探測跟「行星保護」的關係	101

從火星的衛星上帶回火星的生物證據？	103
木星・土星的冰衛星生物探測	105
兩極冰層下的廣大湖泊存在生命嗎？	105
擁有內部海的木星冰衛星們	106
2顆木星冰衛星的探測計劃	108
土星的衛星是最適合外星生物的行星？	109
極低溫和超高溫星球上也可能存在生命嗎？	111
負180°C的行星・土衛六上存在液態甲烷湖	111
或許會發現迥異於地球生物的「土衛六生命體」？	112
灼熱的行星・金星上也有生物？	113

第 2 部 太陽系外的生物探測

第 3 章 太陽系外也有 「第二地球」嗎？

「行星狩獵」的部門史	118
在堆場旁邊找螢火蟲有多難	118
終歸一場空的巴納德星系外行星	119
利用恆星的「前後搖晃」來尋找系外行星	121
找到的系外行星竟有意想不到的型態！	124
終於發現系外行星！	124

對系外行星發現的質疑聲音？	126
追蹤觀測的重要性	126
系外行星的多樣姿態	129
發現數量激增的原因	129
起初發現了大量「異形行星」	131
擁有極端前向軌道的怪異行星	132
甚至發現了《星際大戰》中出現的行星	134
這麼多樣的系外行星是如何誕生的？	136
各式各樣運用間接方式偵測系外行星的方法	138
利用都卜勒法偵測系外行星的黃金時代	138
凌日法的崛起與興盛	139
結合2種偵測法的最強組合技	141
漸變測法的「第3種間接偵測法」	142
克卜勒太空望遠鏡帶來的系外行星探測革命	144
使系外行星發現數量飛躍性上升的克卜勒太空望遠鏡	144
在發生故障後仍啓動新任務	145
後繼機種TESS發射升空	146
靠近太陽系且可能擁有海洋的系外行星？	147
系外行星探測的主要成果	150
幾乎所有恆星皆存在行星	150
系外行星的內部結構和大氣成分也十分多樣	151
開始發現宜居的系外行星	152
展開類地行星的性質調查	153

第4章

我們能找到 有生命存在的系外行星嗎？

好想直接觀測系外行星的光！	156
直接觀測系外行星的難度	156
銳化模糊圖片的自适应光學技術的威力	157
隱藏明亮恆星光芒的日冕儀	158
目標是直接拍攝系外行星	160
星體周圍的圓盤結構是由行星組成的？	161
捕捉到成長期原始行星的蹤跡	163
Column 日冕儀的歷史	166
用紅外線捕捉類地行星的姿態	168
恆星的质量、溫度與適居帶的關係	168
新型紅外線都卜勒儀器「IRD」的開發	169
揭開M型主序星的化學組成	170
成功用紅外線發現最初的系外行星	172
用次世代超大型望遠鏡尋找有生命的行星	174
當前的8~10m級大型望遠鏡	174
日本參與設計的30m級超大型望遠鏡計劃「TMT」	176
觀測南天的2個超大型望遠鏡計劃	178
太空望遠鏡的系外行星生物探測	180
地面望遠鏡與太空望遠鏡的角色差異	180
使用太空望遠鏡的天文測量法系外行星探測	181
太空望遠鏡和地面望遠鏡的合作	182
首次公布照片的詹姆斯·韋伯太空望遠鏡	183

未來的太空望遠鏡計劃	186
孤立的系外行星、流浪行星的探測	188
發現沒有主星，在太空飄流的行星	188
一次發現多達100顆流浪行星	189
流浪行星是如何誕生的？	190
流浪行星上存在生命嗎？	191
在系外行星尋找生命的徵兆	192
將探測器送往系外行星很困難	192
反問「地球上存在生命嗎？」的儲根實驗	193
什麼星生命印跡？	194
尋找太空植物的反射光！	195
質量比太陽更小的恆星周圍的系外行星生命探測	197
分析M型主序行星的紅邊	197
利用植物發出的「螢光」當生物標記	199
天文生物學的未来	201
系外行星探測、生物探測的未来展望	201
關於日本天文生物學中心	201
ABC的3個計劃室	203

序章

宇宙最大的謎題： 地球之外存在生命嗎？



暗淡藍點與航海家金唱片

● 地球只是宇宙的1個「暗淡藍點」

首先，讓我們先來看一張照片（圖0-01）。這張照片的名稱為「Pale blue dot」（暗淡藍點），是從太空拍攝到的地球照片。話雖如此，即便你越起腳趾仔細觀察，可能也找不到地球究竟在照片裡的哪個地方。

圖0-01 暗淡藍點



來源：NASA/JPL-Caltech

拍下這張照片的，是NASA（美國太空總署）的無人太空探測器航海家1號（Voyager 1，圖0-02）。1990年2月14日，航海家1號離開地球約60億km，來到冥王星軌道的外側。

圖0-02 航海家1號/使者



來源：NASA/JPL-Caltech

在結束當初設定好的木星和土星探測任務後，航海家1號繼續朝著太陽系邊緣航行。

美國天文學家卡爾·薩根（Carl Sagan，1934～1996）是航海家計劃的主持者之一。他在這時向NASA提議將航海家1號的攝影機轉向地球，拍攝了照片。

請再看一遍圖0-01。在靠近照片中央附近的淡淡太陽光線中間，是不是有個類似灰塵的小白點呢。這就是地球。時至今日，這張照片仍是目前從最遠處拍攝到的地球影像。

圖0-03 航海家號拍下的太陽系「全家福」



來源：NASA/JPL-Caltech

除了地球以外，航海家號也同時拍攝了太陽系中其他行星的照片（圖0-03）。雖然水星和火星沒有順利拍攝成功，但金星、木星、土星、天王星、海王星，以及太陽都有拍到其影像，這幾張照片或許可以說是太陽系的「全家福」吧。

● 像地球一樣的星球在宇宙是獨一無二的嗎？

天文單位是天文學用的距離單位，1天文單位約等於地球到太陽的平均距離，即1億5000萬km，而當時航海家1號跟地球的距離約為60億km，差不多等於40天文單位。



來源：NASA/JPL

拍攝地點與地球的距離，約是太陽和地球距離的40倍，地球在這張照片上不過是個不到1像素（pixel）、淡淡的藍色小點（pale blue dot）。在這個小點上，1990年當時約有50億人，而現在則有近80億人居住。不僅如此，估計約有500萬種到3000萬種的地球生物，全都生活在這個小小的藍點上。

看到這張圖片後，薩根（圖0-04）如此感嘆：

「這1像素就是我們，我們所有人。」（“This single pixel is us. All of us.”）

薩根同時也是一位有名的作家，出版了很多淺顯易懂、介紹天文學和行星科學魅力的書，相信很多讀者應該都讀過他在全球暢銷的《宇宙》一書。在他的著作《淡藍色的小圓點》（英文名：Pale Blue Dot）中，也仿如此寫道：

「沒有什麼能比從遙遠太空拍攝到的我們這小世界的這張照片，更能顯示人類的自負有多愚蠢。對我而言，這也是在提醒我們的責任所在：更和諧地對待彼此，並維護和珍惜這顆暗藍色的小點——這個我們目前所知唯一的家園。」

不僅如此，這張照片也讓我們不禁思考：像地球這樣的星球，在這片浩瀚的宇宙中是獨一無二的存在嗎？又或者，宇宙中存在很多類似地球的行星，而且那些星球上也都孕育著生命呢？還是說，宇宙中也存在環境跟地球大相逕庭，卻像地球上孕育了生命的行星，或是存在著上面生活著跟地球生命完全迥異的「異形生物」的星球呢？

● 航海家號攜帶的金唱片

航海家1號的姊妹船航海家2號（Voyager 2），在1977年發射升空，1979年到1980年代，這2架探測機先後來到比木星更外側的行星，也就是接連抵達木星、土星、天王星、海王星，讓我們看到太陽系外側行星們那遙遠超乎想像、卻又充滿魅力的模樣（圖0-05：木星大紅斑的放大圖，圖0-06：土星及其衛星，兩者皆由航海家1號拍攝）。

航海家號的英文名是「Voyager」，一如其名，這2架航海家號此時此刻仍在以時速大約6萬km的超高速，向著浩瀚的宇宙持續航行。

航海家1號在2012年，航海家2號也在2018年時離開了太陽圈，進入星際空間（interstellar space），來自太陽的帶電粒子風——太陽風無法抵達的

圖0-05 木星大紅斑放大圖



來源：NASA/JPL

圖0-06 土星及其環



來源：NASA/JPL

圖0-07 航海家號的金唱片



範圍稱為太陽圈，但離開太陽圈不等的離開太陽重力範圍的太陽系。一般認為在太陽系的邊緣，存在著一片名為歐特雲的小行星圈。這2架航海家號，預計會在距今約3萬年之後才能穿越歐特雲，完全離開太陽系。

這2架航海家號的機上，都攜帶了一片鍍金的銅製唱片（碟片）。這2張碟片俗稱航海家號金唱片（Voyager Golden Records，圖0-07：上面是唱片封面，下面是唱片本體）。

這2張唱片中記錄了地球上的各種聲音和訊息。收錄內容包含55種地球人不同語言的問候、海談、鳥類、雷鳴、鯨魚的叫聲等各種聲音，以及全世界的古典音



來源：NASA/JPL

樂和民族音樂等等。內容包括古典樂、爵士樂、搖滾樂，其中也有日本的民八本曲《鶴之巢籠》。除此之外，裡面還記錄了人類活動、地球景色、火箭等科學技術的照片和圖片的音訊化資料（可重現成圖片），封套上也印了關於唱片內容的符號化訊息。

在遙遠的未來，航海家號也許會遇到外星智慧生命體，也就是俗稱的「外星人」也說不定。科學家們希望，屆時外星人將能解讀金唱片的內容，知道地球這顆星球與地球人的存在，被寄與這份心願的金唱片，就像是人類丟入宇宙唱片大海的瓶中信。

在2022年7月，航海家1號已經來到距離地球約230億km（約156天文單位），航海家2號則在約190億km（約130天文單位）的地點。不知道我們送出去的瓶中信，是否會被外星人撿到，又是否會有收到回信的那天呢？說起來，宇宙中是否又存在其他生命呢？

地球上的生物 是如何誕生的呢？



太陽系的行星們

● 距離的單位：天文單位和光年

在第 1 章，我們將介紹與天文生物學基礎相關的地球歷史和地球生命誕生的情況。

首先要介紹的，是關於太陽系行星的基本知識。

我們的太陽系，由太陽這個恆星，以及在太陽重力牽引下繞著太陽公轉的行星等天體組成。恆星通過核融合反應自行燃燒並散發光芒。另一方面，行星不會自己發光，是透過反射恆星的光而被人們看見。

在序章中我們已經提到，太陽系中常常使用天文單位作為距離的單位。地球以橢圓形軌道繞著太陽公轉，而太陽和地球之間的平均距離約為「1 天文單位」。1 天文單位大約等於 1 億 5000 萬 km（準確數值為 1 億 4959 萬 7870.7 km）。

天文學也使用光年作為距離的單位。光年是光在 1 年內行進的距離為單位。1 光年大約等於 9 萬 5000 億 km。換算成天文單位，大約為 6 萬 3000 天文單位。光年在太陽系內幾乎用不到，主要是用於表示恆星之間或星系之間的距離。

在太陽系的行星中，位於最外側軌道的行星是海王星。太陽和海王星之間的平均距離約為 30 天文單位，大約 45 億 km（圖 1-01）。

圖 1-01 約簡天文單位



● 依組成成分分類行星

太陽系的行星按照距離太陽的距離順序排列，分別是水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星和海王星，共有 8 顆星體（圖 1-02）。在比海王星更外側的軌道運行的冥王星，曾經被認為是太陽系的第 9 顆行星。然而，它在 2006 年遭到「降級」，現在被歸類為矮行星一類。

圖 1-02 太陽系太陽系行星們（以地球為 1 倍的大小對比）



來源：NASA/JPL and Planetary Institute

根據組成分類，距離太陽較近的水星、金星、地球和火星，這 4 顆都屬於岩石行星（或稱地行星），它們的直徑相對較小，是每 1 cm³ 的平均質量為 5g（平均密度為 5g）以上的高密度天體。這是因為這些行星由金屬和岩石等重物質組成，岩石行星的表面擁有堅固的地殼。

另一方面，木星和土星被歸類為**氣體巨行星**（或稱**木行星**）。木星直徑約為地球的11倍，土星約9倍，而質量分別是地球質量的約320倍和約95倍，是非常巨大的行星。然而它們的平均密度很低，木星約為1.3，而土星約為0.7，甚至比水（1.0）還要輕。

這是因為氣體巨行星的主要成分是氫和氦等非常輕的氣體，行星表面沒有堅固的地盤。這些行星的核心由岩石、水、氦和甲烷等混合而成的冰組成，擁有質量約為地球10倍的地核。

天王星和海王星被稱為**冰巨行星**（或稱**海行星**），一如其名，它們是主要由水、甲烷和氫的冰塊組成的行星。它們的大小約為地球的4倍；質量方面，天王星約為地球的15倍，海王星約為地球的17倍。它們的核心由岩石和鐵組成，周圍被厚厚的冰層覆蓋，最外層覆有由氫、氦和甲烷組成的大氣層。

● 衛星、小行星、隕石

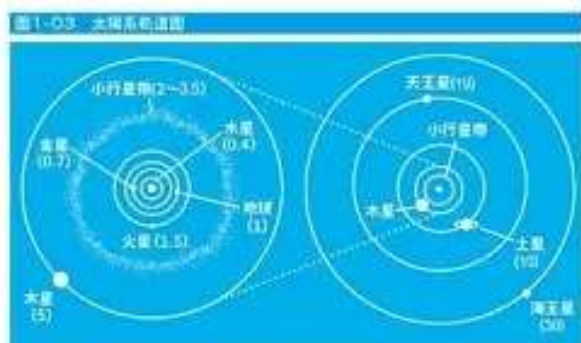
接著，我們再來說明比行星更小的太陽系小天體。

衛星是圍繞行星運轉的小天體，**月球**是地球的衛星。木星和金星沒有衛星，但火星有2顆，木星有72顆，土星有66顆，天王星有27顆，海王星有14顆衛星（這些數字是確定的數量，而木星和土星除了上述之外還有一些未確定的軌道天體）。

在火星和木星的軌道之間，特別是距離太陽約2~3.5天文單位的地方，存在著由數百萬顆小行星組成的小行星帶（圖1-03）。小行星的直徑最大不超過1000km，大多數都是直徑10km以下的小天體。

提到小行星，就不得不聯想到日本的小行星探測器「**隼鳥號**」和「**隼鳥2號**」。它們分別訪問了小行星**絲田**和**龍宮**，並將小行星上的沙土（樣本）帶回地球。這2顆小行星都屬於靠近地球軌道的**近地小行星**（那小行星帶的小行星屬於不同分類）。

科學家認為沒有成長為行星的小行星，保留了46億年前太陽系初期物



左側是木星到木星的軌道，右側是木星到海王星的軌道。括號內的數字是離太陽的距離（天文單位）。

質的性質。這就是為什麼小行星被稱為「太陽系的化石」。因此，隼鳥號和隼鳥2號帶回的樣本，對於了解太陽系的演化，以及地球上水和生命原料的起源，提供了重要的線索。

2022年6月，研究團隊就已經先行宣布從隼鳥2號由龍宮小行星帶回來的石頭和沙子中，發現了許多氨基酸和大量的水。今後的分析預期將會有更多的發現。

在小行星中，有些會因軌道擾亂而接近地球，最終被地球的引力捕獲而墜入地表。科學家認為在大約6600萬年前，一顆直徑約10km的小行星撞擊地球，最終導致了恐龍滅絕。另一方面，其他比體積遠比上述更小的小行星，因大多數會在大气中燃燒殆盡，但有時仍會有沒被燃燒殆盡的岩石落在地球上。這就是**隕石**。

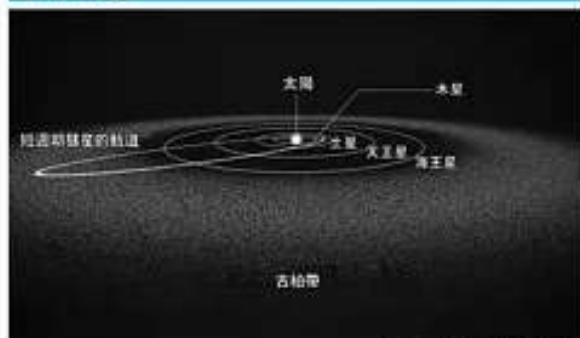
冥王星與古柏帶天體

如同前面所提過的，冥王星曾經被當成太陽系的第9顆行星，然而它其實是一顆大小（直徑約2400km）只有地球的衛星月球的一半，非常嬌小的天體。此外，太陽系其他行星的公轉軌道明明幾乎都在同一平面上，卻只有冥王星大幅偏離，存在著許多奇怪的特點。

隨著太陽系遠方的觀測有更多進展後，天文學家發現了許多與冥王星大小相似的天體，因此，冥王星在2006年被重新歸類到新設立的「矮行星」類。

科學家認為，在海王星的軌道外側廣達數百天文單位的範圍內，存在著無數像冥王星這樣的小天體，形成一片薄薄的面狀（帶狀）結構。這些小天體主要由冰（水冰）組成，儘管其中也存在直徑超過2000km的個體，但大多沒有那麼大，而且愈小的天體數量愈多。這個區域通常被稱為**古柏帶**（或稱埃奇沃思-古柏帶，Edgeworth-Kuiper belt），而其中的天體被稱為**古柏帶天體**（圖1-04）。埃奇沃思-古柏帶這個名稱是依據預測了該區域及其天體之存在的愛爾蘭天文學家肯尼思·埃奇沃思（Kenneth Edgeworth，

圖1-04 古柏帶



來源：日本國立天文台 天文情報中心

1880～1972）和荷蘭的天文學家傑拉德·古柏（Gerard Kuiper，1905～1973）兩人的名字命名。

一般認為，當古柏帶天體受某種原因改變軌道，便會變成週期性地靠近太陽的**彗星**（而且在彗星中屬於週期特別短的）。接近太陽後，彗星上的冰會融化，使其中的氣體和塵埃被吹走，形成長尾（離子尾）或扇形尾巴（塵埃尾）被天文學家觀測到。

位於太陽系邊緣的無數小天體

彗星分為週期約在200年以下的**短週期彗星**，週期超過200年的**長週期彗星**，以及接近太陽一次後就再也回不來的**非週期彗星**。

短週期彗星原本大多是古柏帶天體，其軌道平面幾乎與行星的軌道平面一致。而相形兩者，後兩者的軌道與行星的軌道無關，這就表明它們的來源是另一種天體。

長週期彗星和非週期彗星被認為來自比古柏帶更遠的地方，是以球殼狀圍繞太陽系的無數天體之一，其範圍在距離太陽1萬天文單位到10萬天文單位之間，推測有超過1兆個小天體存在。

這片區域稱為**歐特雲**（Oort cloud），被認為是位於太陽系最邊際的小天體（圖1-05）。荷蘭的天文學家簡·歐特（Jan Oort，1900～1992）在1950年預測了歐特雲的存在。

科學家推測歐特雲天體的主成分也是冰，然而由於歐特雲天體太過暗澹，因此目前仍然無法觀測到。