

A dramatic photograph of a SpaceX Falcon Heavy rocket launch. The rocket is seen from a low angle, with its three boosters and central core ascending. A massive plume of fire and smoke is visible at the base, and a bright, intense light emanates from the engines, creating a powerful visual effect. The background is dark, emphasizing the rocket and its fiery trail.

2024 清大天文營

物理人眼中的 太空科技

2024.08.02 | 林彥興 | 清大物理館

Outline

- 開場
 - 我是誰？為甚麼會有這個課程？
 - 你應該期待什麼？
- 正式課程：物理人眼中的太空科技
 - 火箭的物理原理
 - 基礎軌道力學
 - 可重複使用火箭

關於我

➤ 學業上

- 新竹高中：地科競賽選手（2015 – 2016）
- 清大理雙 物理/天文物理雙專長（2017 – 2021）
- 清大天文所 碩士生（2021 – 2023）

➤ 學業外

- 清大天文營工人（2018）
天文社教學長（2018）、副社長（2019）
- 新竹女中天文社指導老師（2019 – 2021）
- EASY 天文地科團隊總編輯（2017 – now）



林彥興

為什麼會有這個演講？

入坑太空科技：

2016.07.18 CRS-9 Mission



Zuma Mission



為什麼會有這個演講？

- 系上營隊：太空發展最前沿（2018）
- 科普文章：
 - 2019 | 科學月刊：登陸火星後，洞察號都在做什麼？
 - 2021 | Pansci：隼鳥二號的億里長征
 - 2021 | Pansci：一閃一閃亮晶晶，滿天都是人造衛星
 - 2021 | 科學月刊：雙小行星重新定向試驗 DART
 - 2022 | Pansci：淺談近地軌道商業服務的歷史
 - 2023 | 科學人：一路波折的木衛探測史
 - 2024 | 科學月刊：Hera 任務

飛向太空的星際飛鏢 雙小行星重新定向試驗 DART



Take Home Message

曾經令恐龍滅絕的小行星，是地球可能面臨來自太空的威脅之一。為了保護地球免受小行星的撞擊，NASA 的 DART 探測器，即將衝撞小行星並觀察後續變化。DART 探測器搭載一架口徑 20.8 公分的相機，且使用離子推進器作為動力，再搭配名為 SMART Nav 的自動導航軟體執行任務。在 DART 撞擊小行星之後，後續再藉由歐洲太空總署的「希拉」探測器，以更先進的儀器測量小行星被 DART 撞擊後的反應，讓我們能進一步理解這些地球的危險鄰居。

DART 任務概念圖。
(NASA/Johns Hopkins APL/
Steve Gribben)



林盛源
EASY 天文地理團隊總編輯。
努力在強漢中仰望繁星。

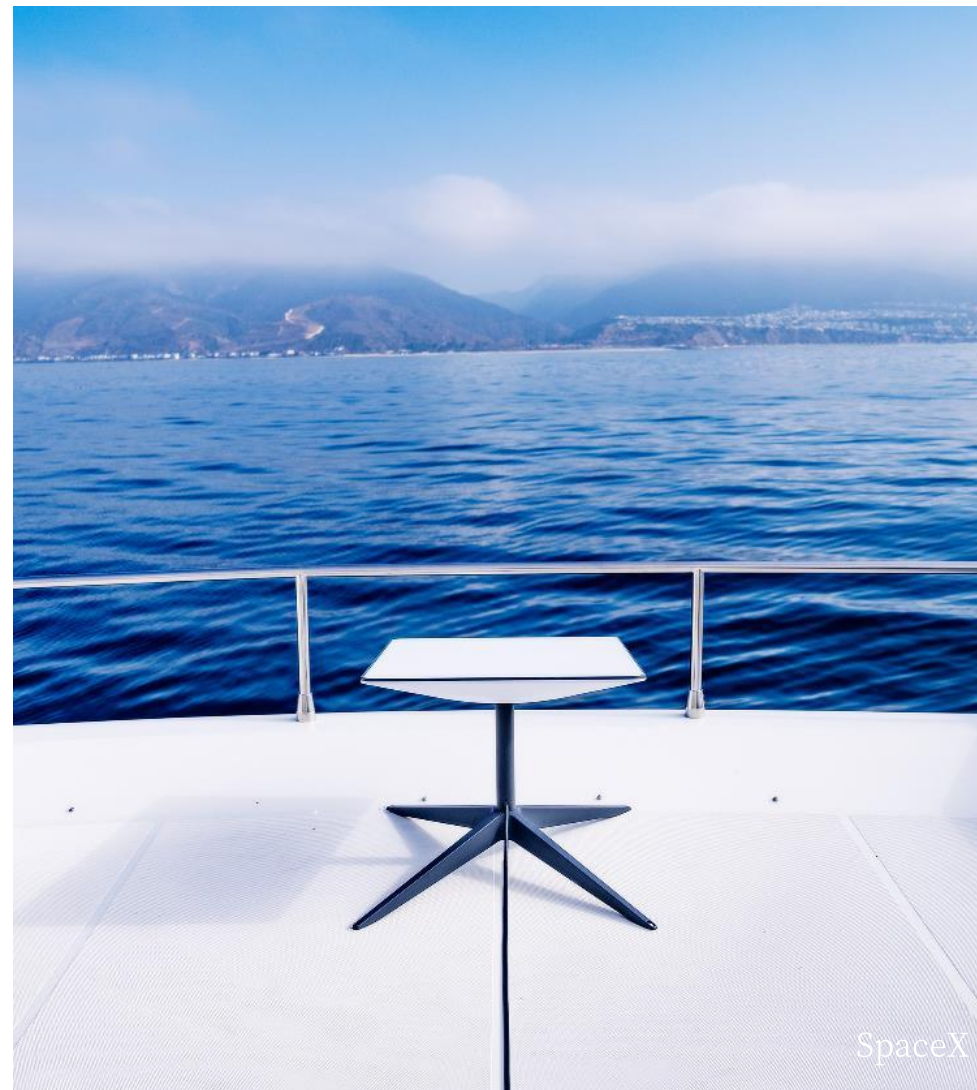


黃子楨
一個從小不知道怎麼回事超愛
石頭的傢伙。生活在岩礦堆裡
的大學生。

自 45 億年前地球誕生以來，數不清的隕石從天空墜落。有些帶來繁榮的契機，有些則招致毀滅。6600 萬年前，稱霸陸地一億多年的恐龍就因為一顆和臺北盆地差不多大的小行星而滅絕。美國科幻作家尼文（Larry Niven）曾經說過：「恐龍之所以會滅絕，就是因為他們沒能探索太空。」在這個各國紛紛望向星空的時代，人類是否能夠避免重蹈覆轍，躲過天降的災難呢？美國國家航空暨太空總署（NASA）領導的新計畫——DART 探測器（圖一）便是人們在這方面邁出的第一步。

為什麼會有這個演講？

- 太空相關議題近幾年越來越常進入大眾視野
福衛、立方衛星、大型低軌星座
- 太空被視為國家未來最重要的發展領域
太空中心升格、企業打入 Starlink 供應鏈等
- 半業餘 / 半專業的介紹當代太空科技
建立太空相關的物理基礎和能夠
理解、欣賞、嚴謹討論太空時事的基本素養
同時認識人類科學與工程的輝煌成就



SpaceX

物理人眼中的太空科技 Part 1

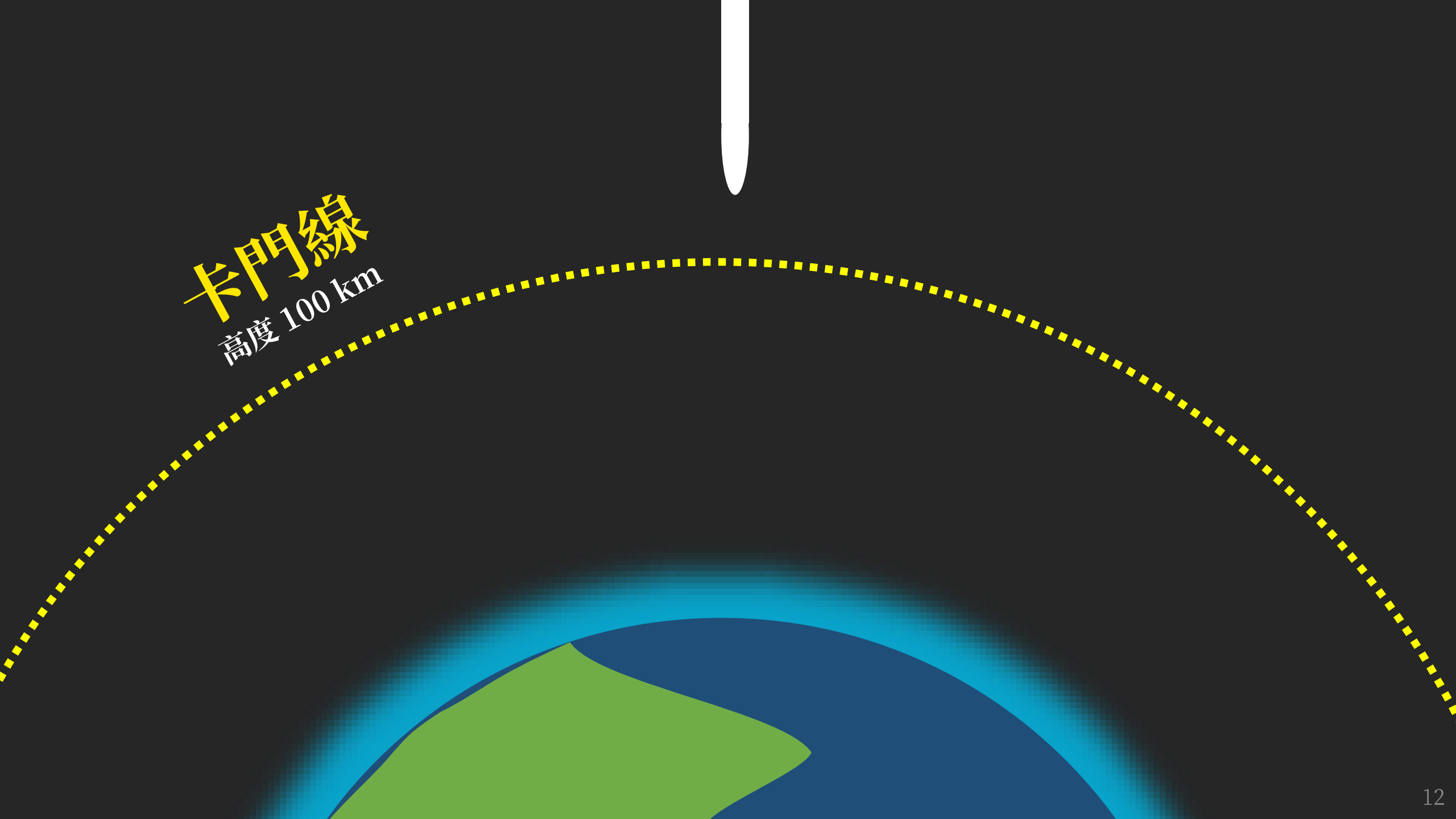
火箭的物理原理

提問

「進入太空」和「進入軌道」
是一樣的意思嗎？

卡門線
高度 100 km

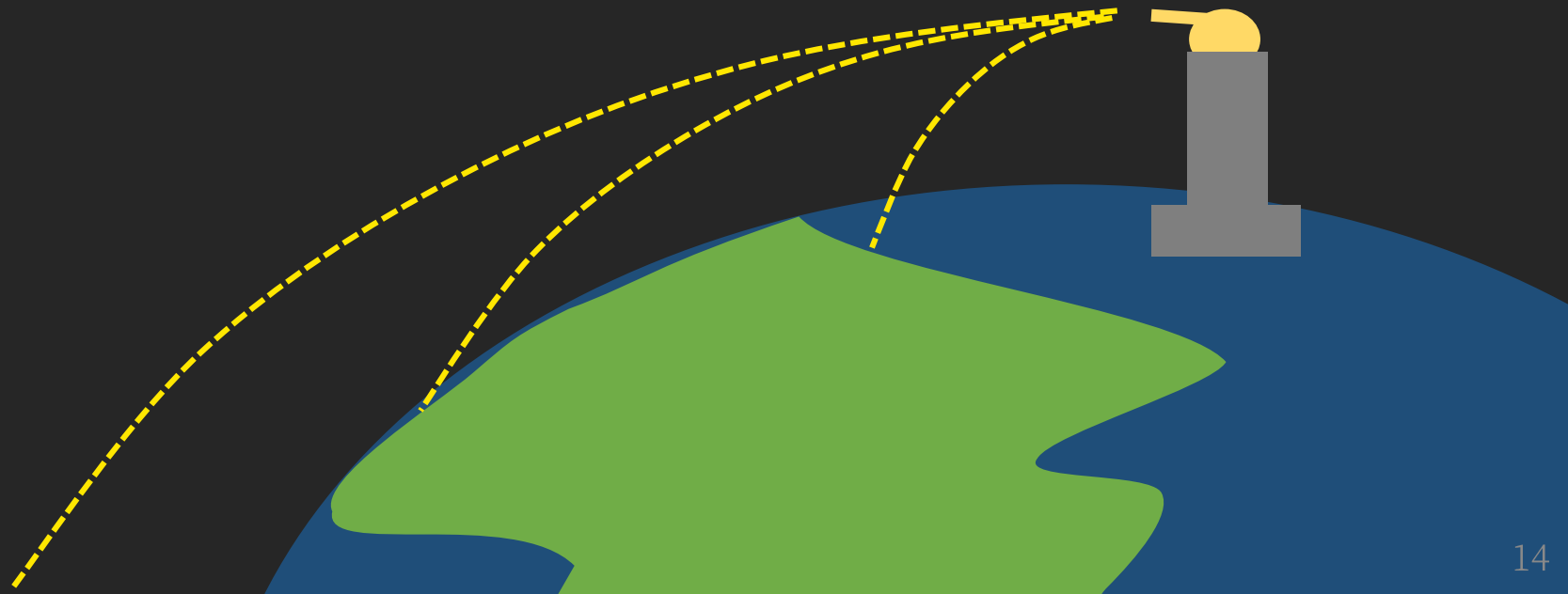


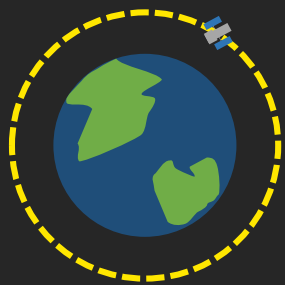
A diagram illustrating the Kármán line. At the bottom, a stylized Earth is shown with a green landmass and a blue ocean. Above the Earth's surface is a thick blue atmospheric layer. A yellow dotted arc represents the Kármán line, which is labeled with the text '卡門線' and '高度 100 km'. A white, elongated, teardrop-shaped object is positioned at the top center of the image, pointing downwards towards the Kármán line.

卡門線
高度 100 km



所以該怎麼做呢？





速度：進入軌道

如此衛星才能長時間留在太空而不會落回地球表面。
軌道越高，需要的能量也就越多。



高度：脫離大氣

大氣沒有明確的邊界，但大部分衛星運行高度都離地超過 **400 公里**，否則酬載會因為空氣阻力減速墜落。

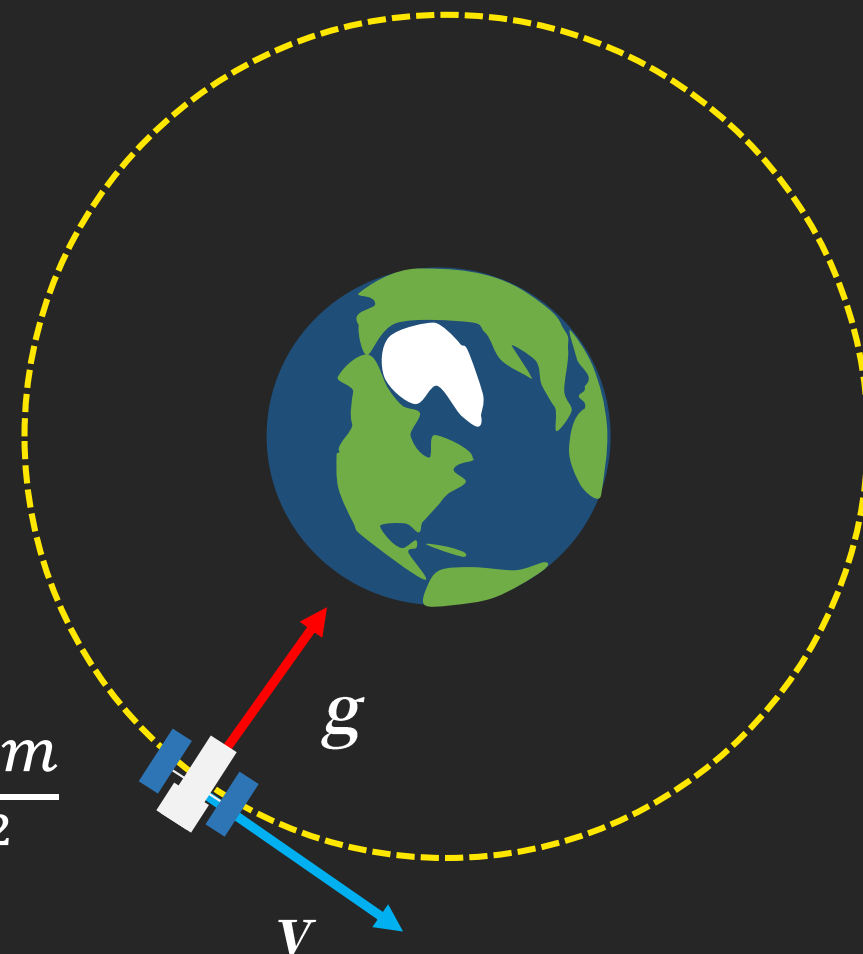
需要多快的速度呢？

牛頓第二運動定律： $F = ma$

等速率圓周運動的向心力： $a_c = \frac{v^2}{r}$

向心力由重力提供： $F_c = ma_c = m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$

所以軌道速度： $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$

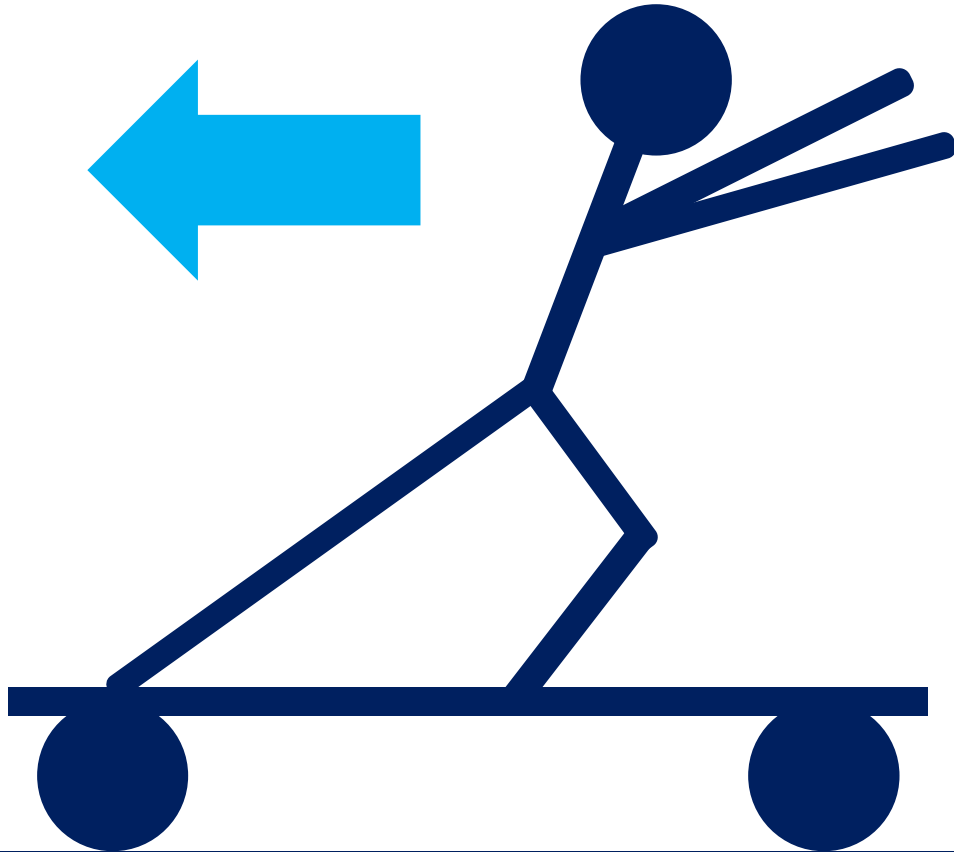


如果軌道高度為 400 公里，帶入上式
之後計算得到的結果大約是

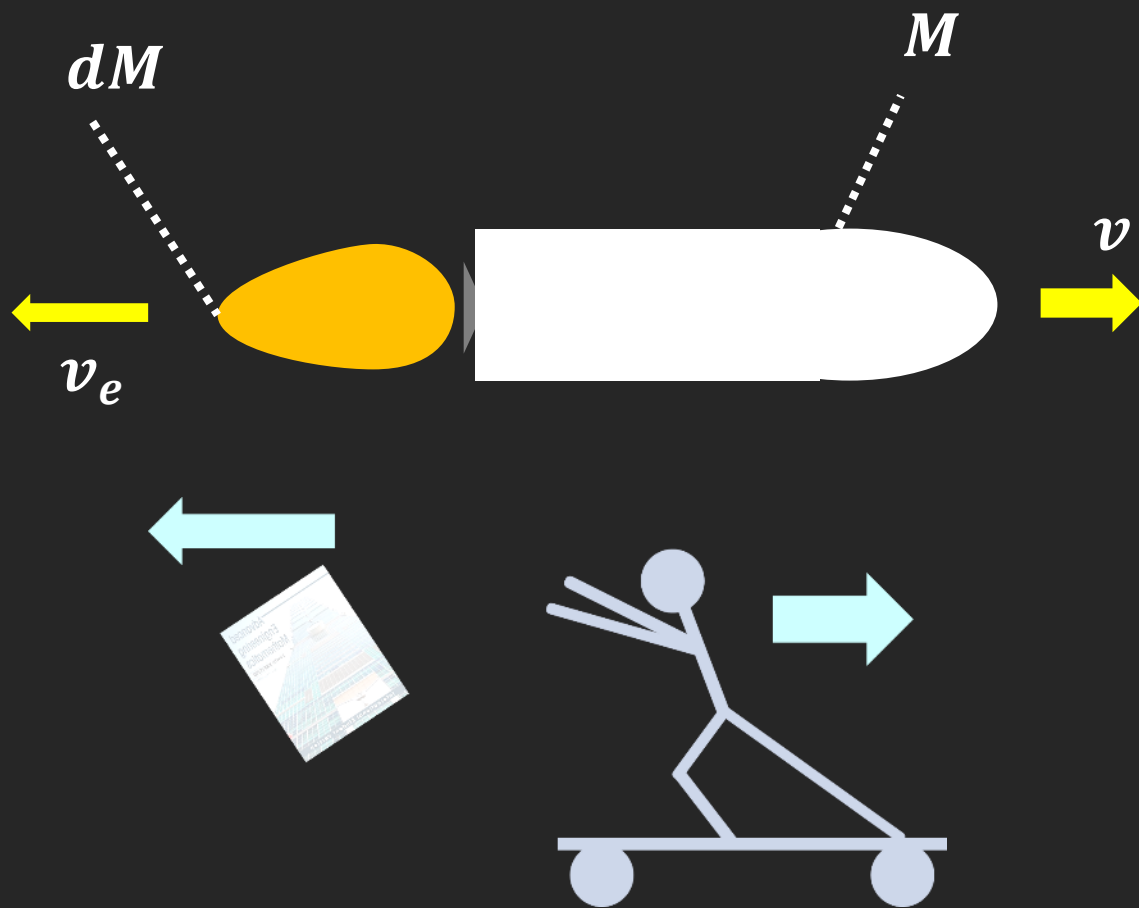
7.7 km/s

如何達到這樣的速度呢？

動量守恆 / 牛頓第三運動定律！



火箭的物理：動量守恆



$$Mdv = -v_e dM$$

$$dv = -v_e \frac{dM}{M}$$

$$\int_{v_i}^{v_f} dv = -v_e \int_{m_i}^{m_f} \frac{1}{M} dM$$

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_i}{m_f}$$

火箭方程式 Rocket Equation

速度增量
Delta v

比衝 Specific impulse

$$\Delta v = I_{sp} \times g \times \ln \frac{m_i}{m_f}$$

火箭總重

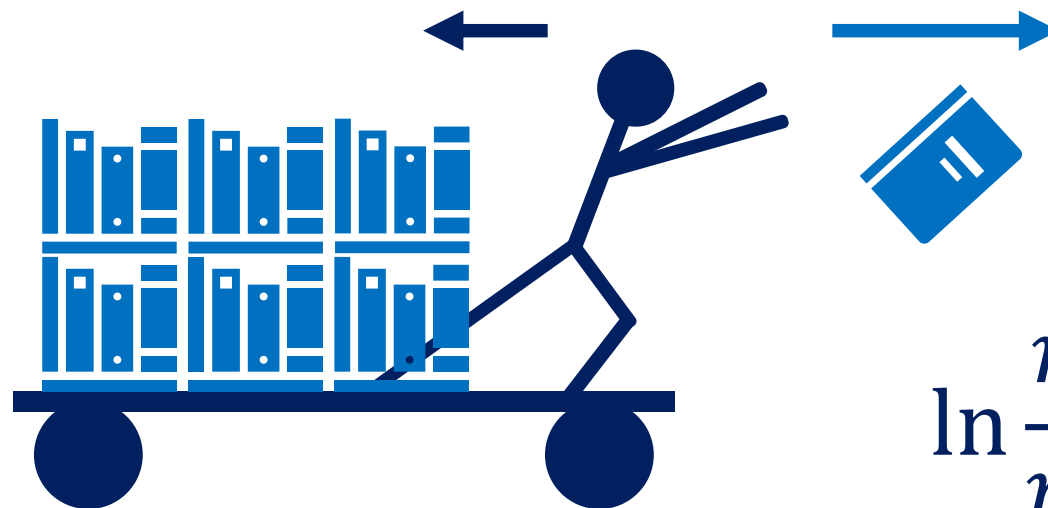
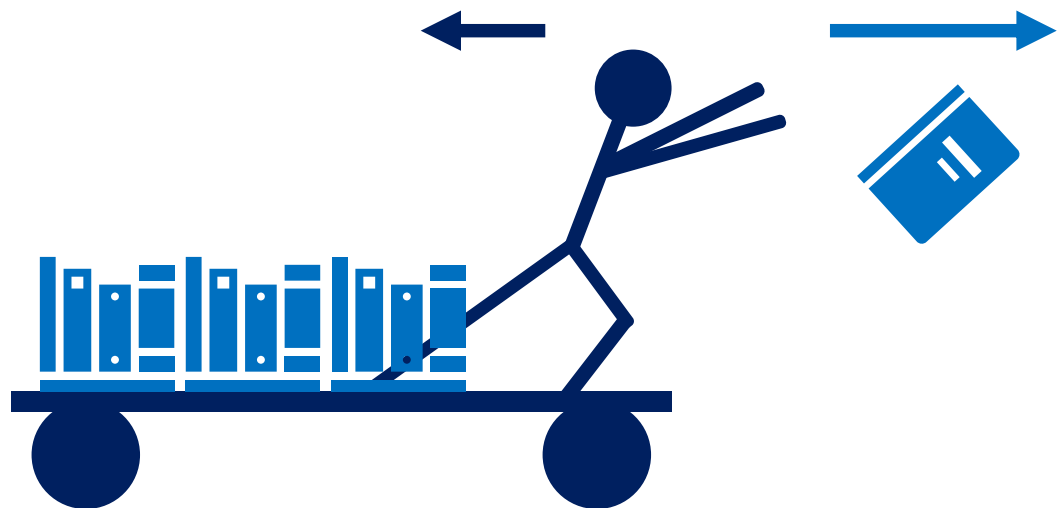
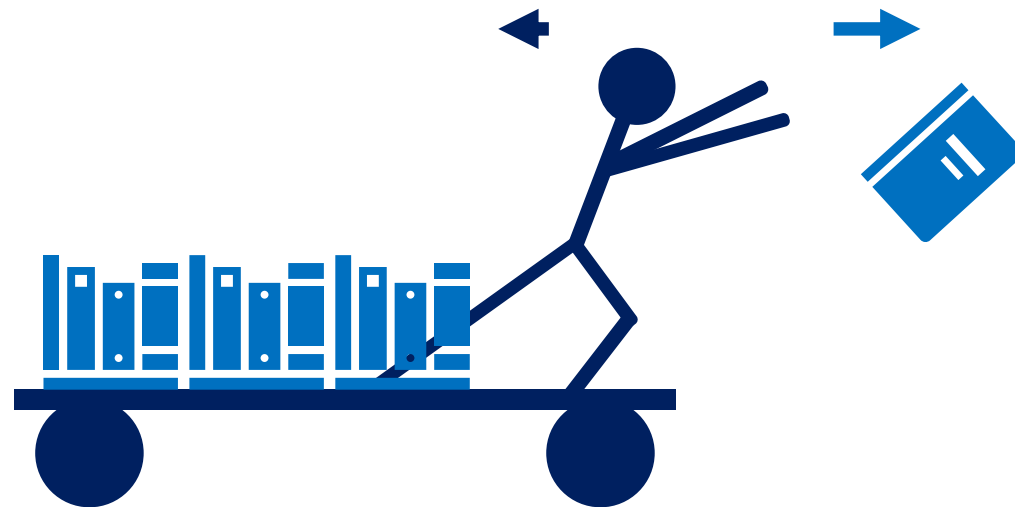
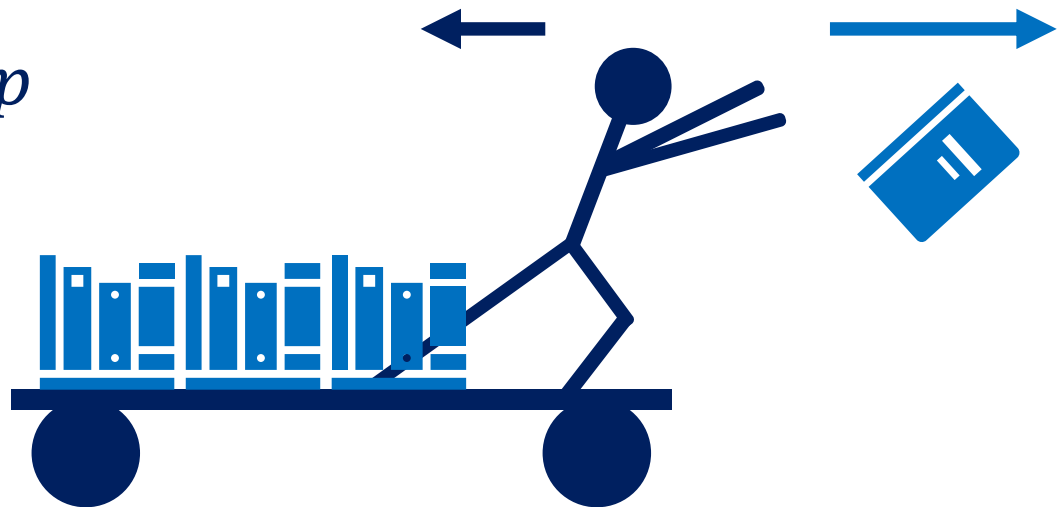
質量比 Mass ratio

火箭空重

地表重力加速度

自然對數

I_{sp}



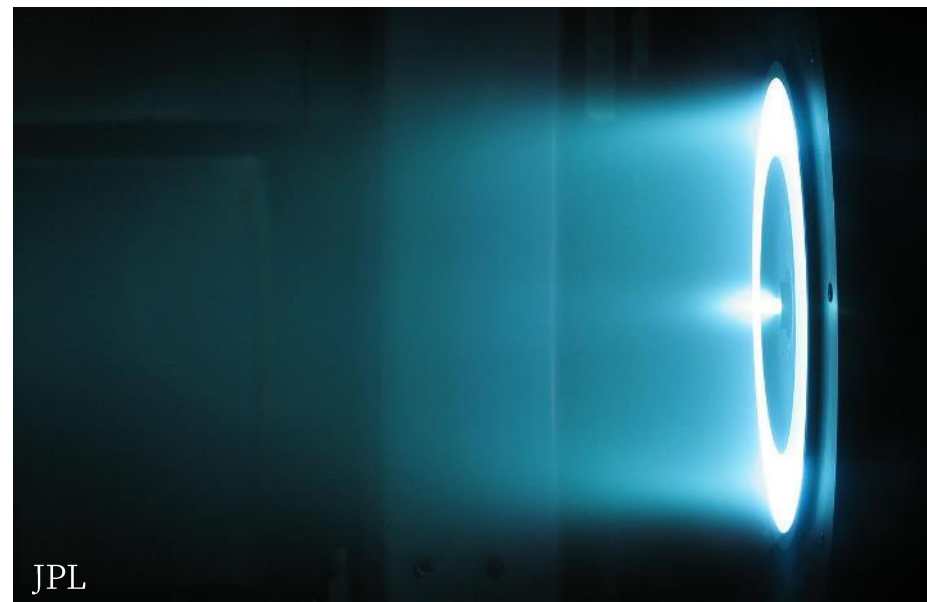
$\ln \frac{m_i}{m_f}$



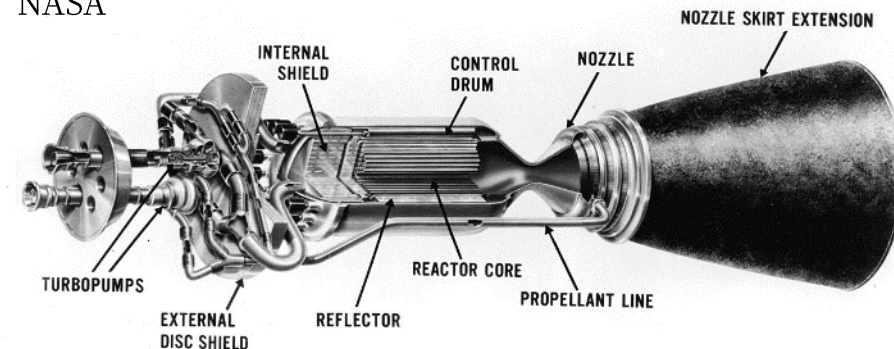
在丟出質量前後，動量保持不變，但是動能顯然增加了
新增的能量從何而來？

火箭的能量來源 Energy source of rockets

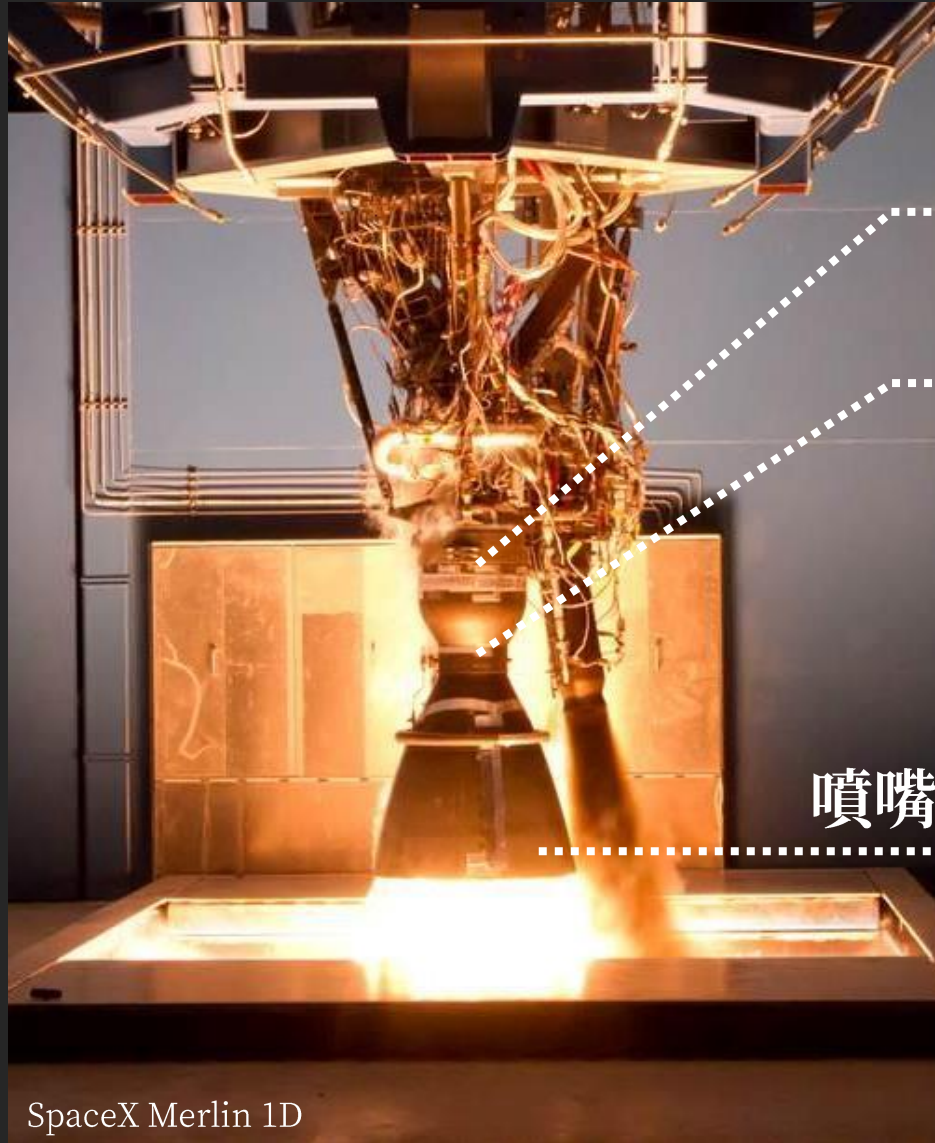
- 化學火箭：來自化學反應釋放的化學能
 - 液態火箭引擎 Liquid Engines
 - 固態火箭引擎 Solid Motors
 - 混和動力火箭引擎 Hybrid Motors
- 電力火箭：來自太陽/核電池的電能
 - 離子火箭引擎 Ion Engines
- 核能火箭：來自核分裂釋放的核能
 - 核熱火箭 Nuclear Thermal Engines



NASA



液態火箭引擎 Liquid Rocket Engines

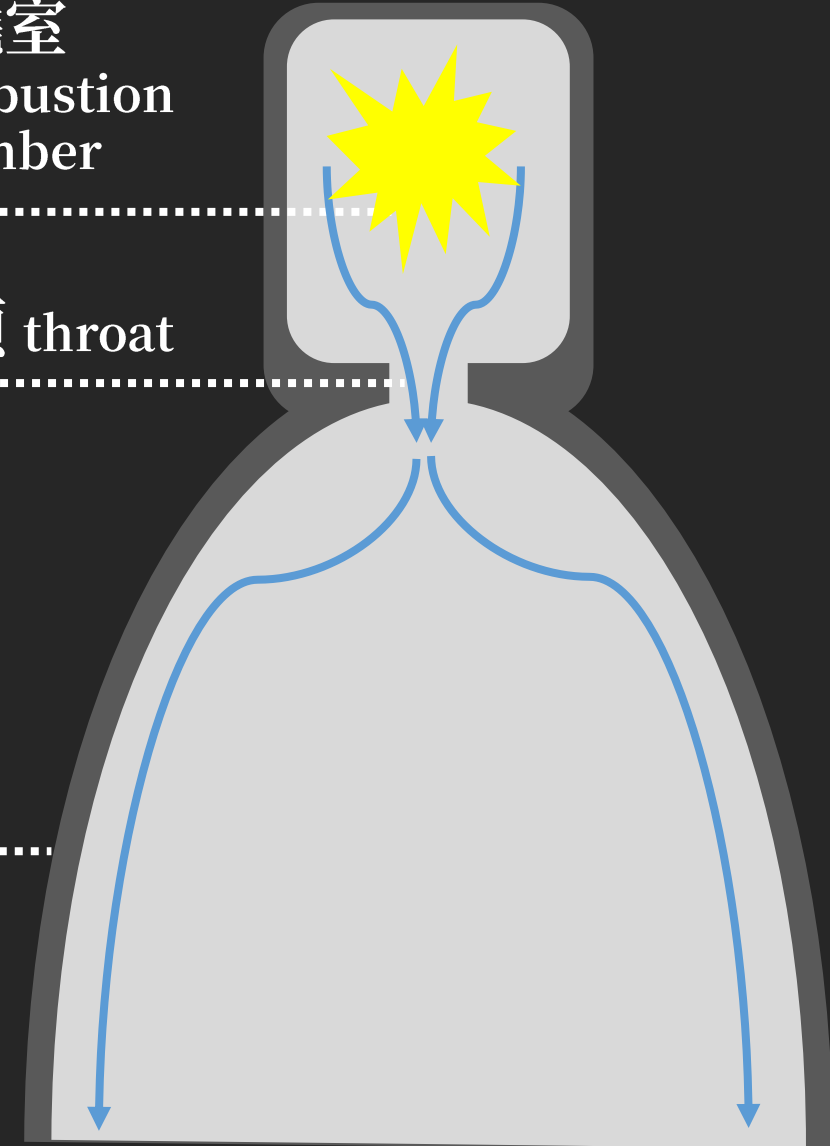


SpaceX Merlin 1D

燃燒室
Combustion
Chamber

喉頸 throat

噴嘴 Nozzle



火箭推進劑 Rocket Propellant

➤ 推進劑：用於噴出產生推力的物質

➤ 主流運載火箭使用化學反應提供能量

推進劑 = 燃料 (Fuel) + 氧化劑 (Oxidizer)

➤ 常見的推進劑組合

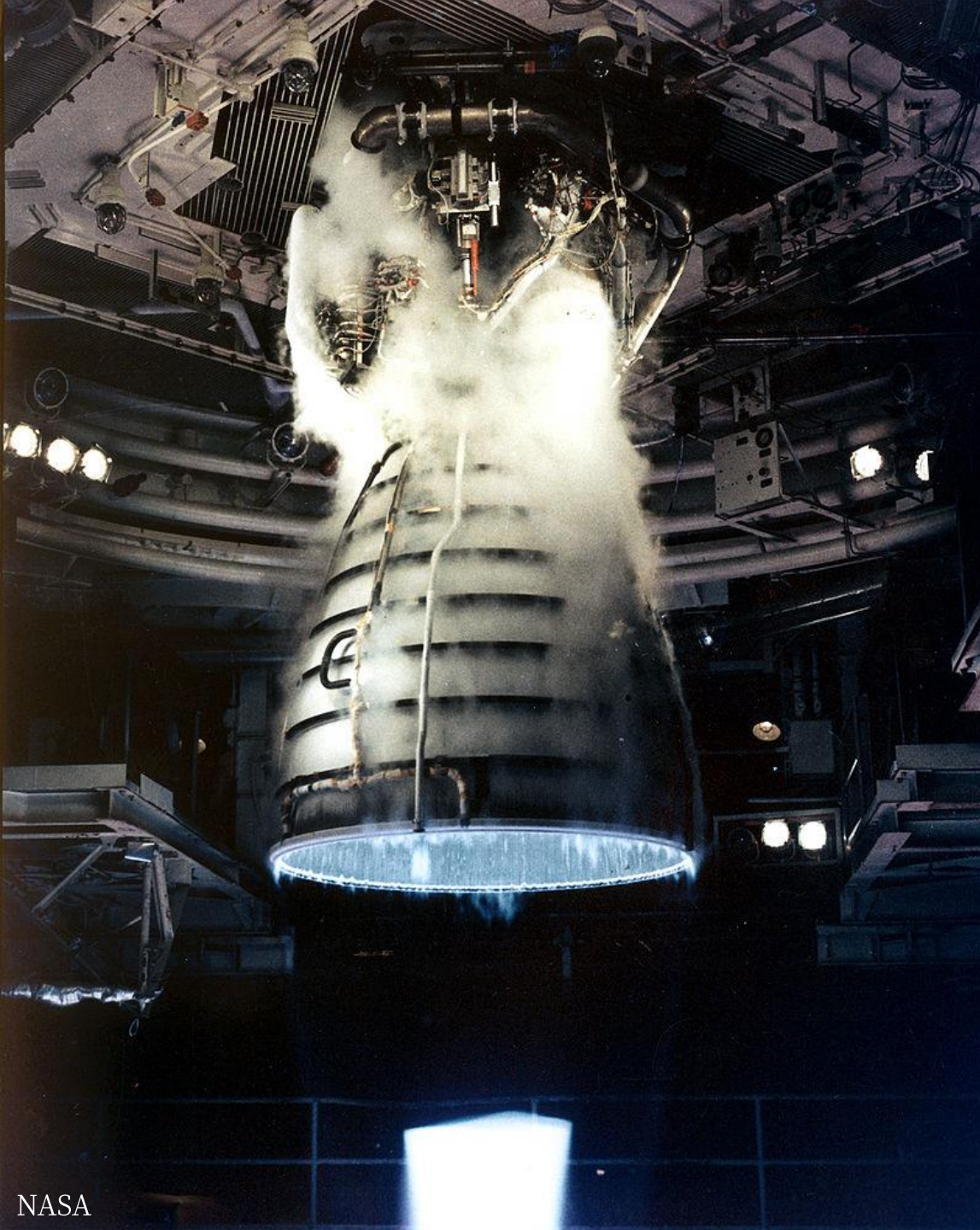
➤ 液態氫 LH2 / 液態氧 LOX：高比衝 (400+) 低密度 | e.g. SSME

➤ 煤油 RP-1 / 液態氧 LOX：中等比衝 (300+) 高密度 | e.g. RD-180

➤ 甲烷 Methane / 液態氧 LOX：中高比衝 (300+) | e.g. Raptor

➤ 自燃推進劑 Hypergolic propellant：劇毒，中等比衝 (300+)





太空梭 | RS-25

Space Shuttle Main Engine, SSME

推力：190 噸（海面），230 噸（真空）

比衝：366 – 452 s



擎天神五號 | RD-180

推力：390 噸（海面），420 噸（真空）

比衝：311 – 338 s



星艦 | Raptor

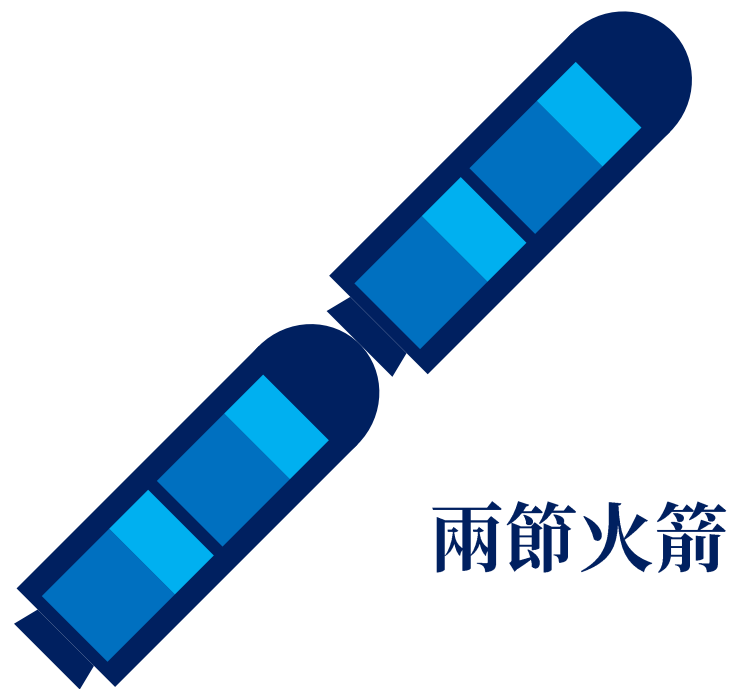
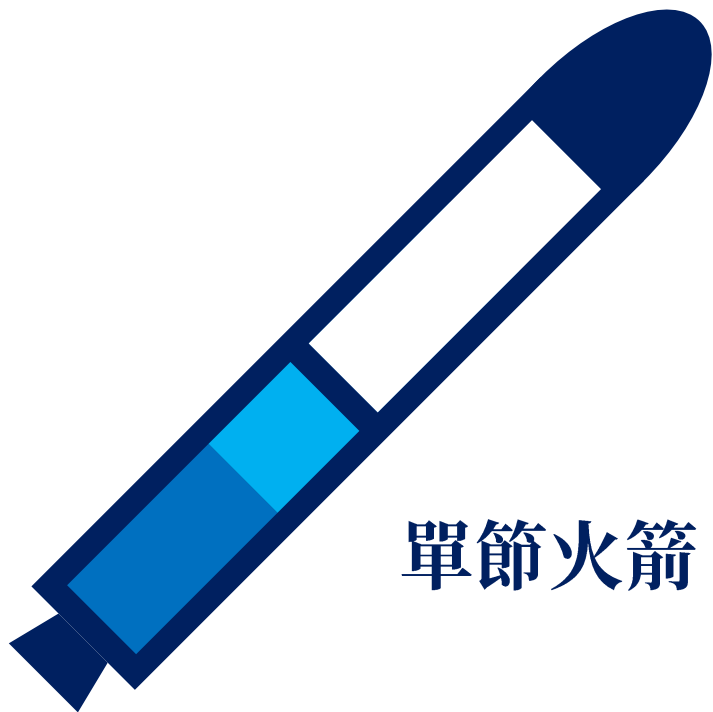
推力：230 噸（海面）、258 噸（真空）

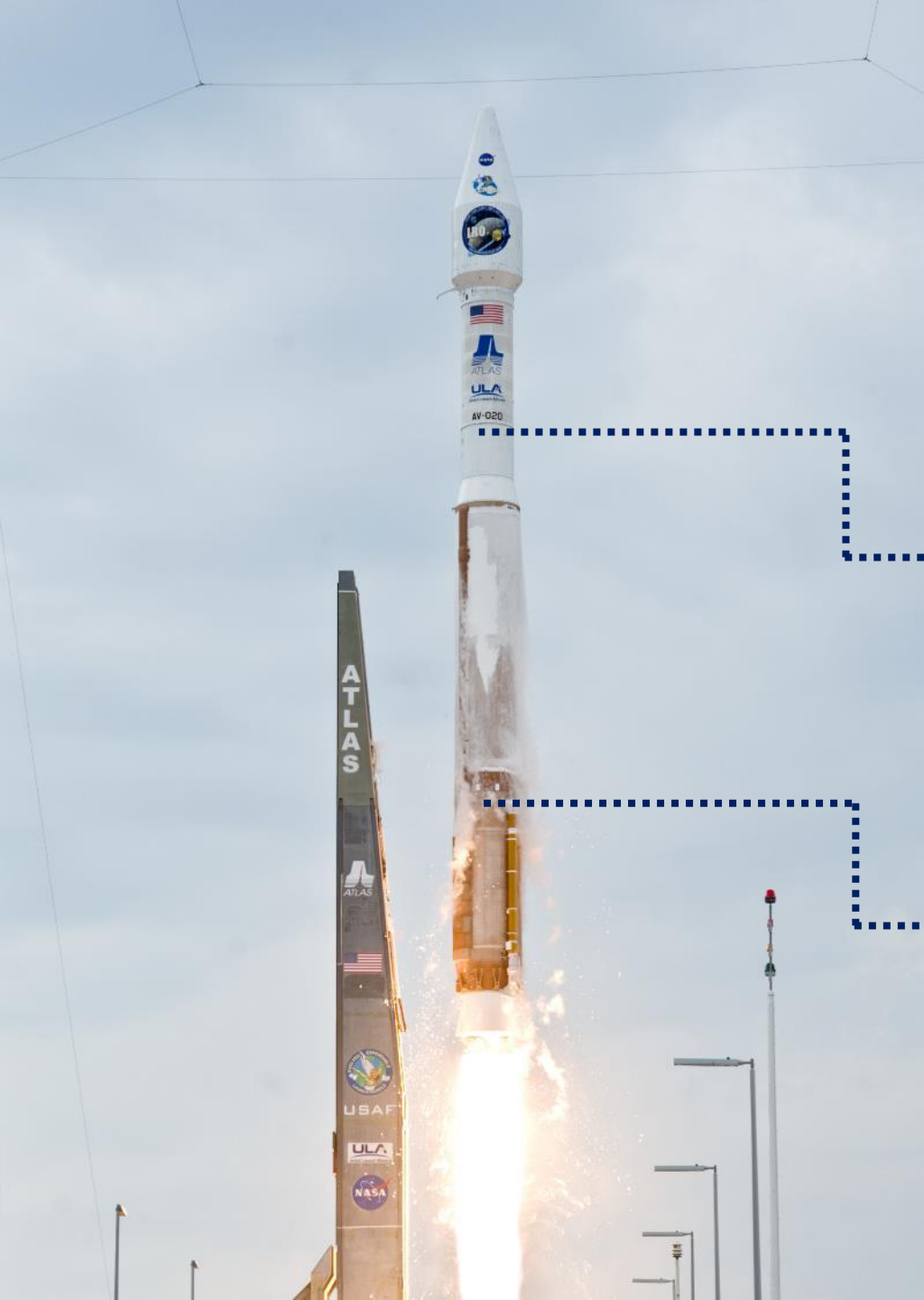
比衝：330 – 363 s



火箭分節 Rocket Staging

- 試想一下，火箭飛行時，其實浪費了許多推進劑於推動「空的推進劑槽」
- 不想浪費推進劑，何不把空的推進劑槽丟掉呢？=> 火箭的分節





擎天神五號 Atlas V

第二節

總重：23 噸，質量比：10

引擎：RL-10，比衝：450，推力：10 噸

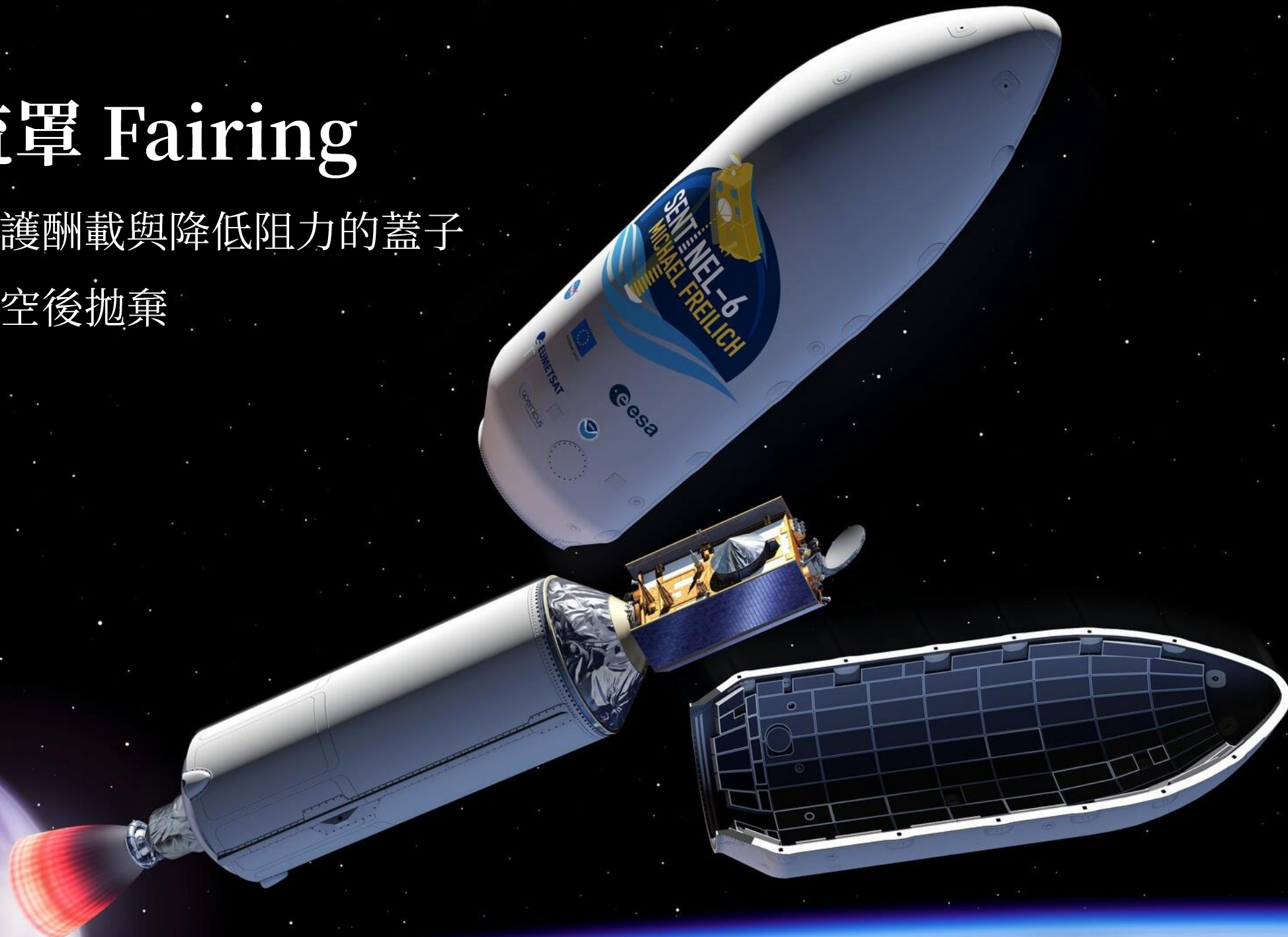
第一節

總重：305 噸，質量比：15

引擎：RD-180，比衝：320，推力：400 噸

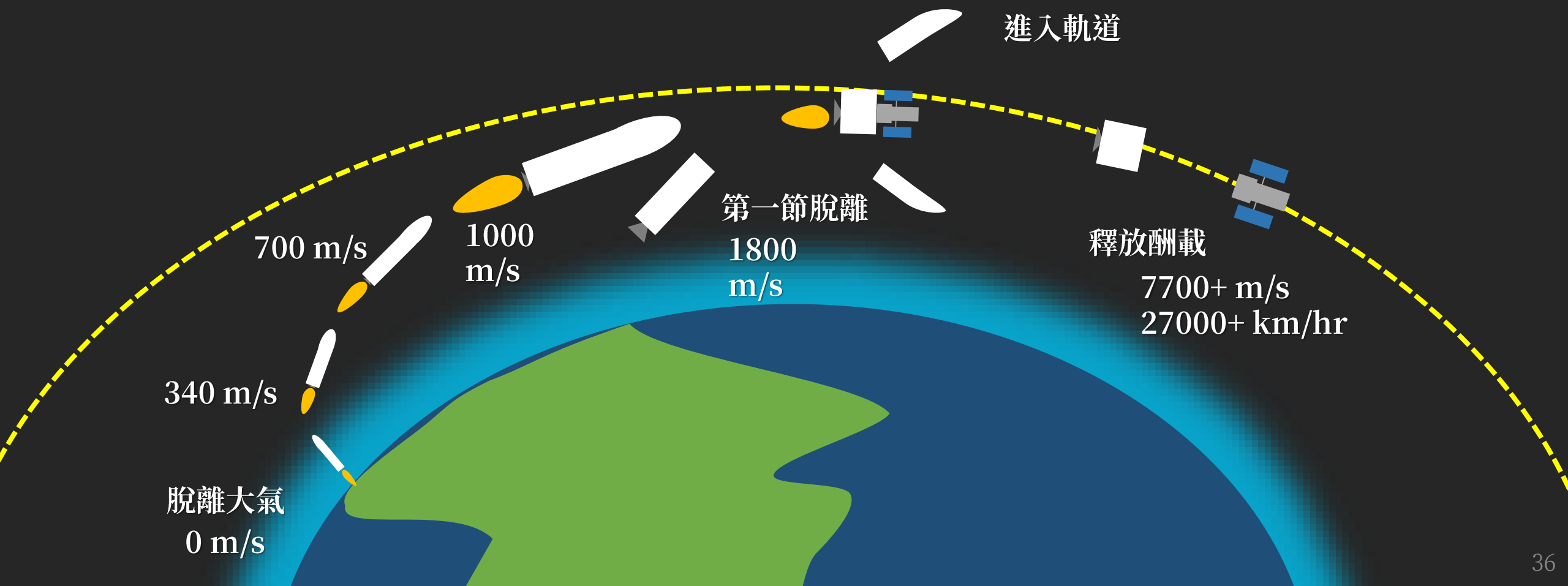
整流罩 Fairing

用於保護酬載與降低阻力的蓋子
進入太空後拋棄





衛星如何進入軌道？



物理人眼中的太空科技 Part 2

基礎軌道力學

為什麼需要了解軌道力學？

把衛星送上軌道了，但接下來它到底會怎麼走？

如果我想從一個軌道前往另一個軌道，該怎麼做？

克卜勒定律

Kepler's Law of planetary motion

- K1：軌道呈**圓錐曲線**：也就是橢圓、拋物或雙曲線。

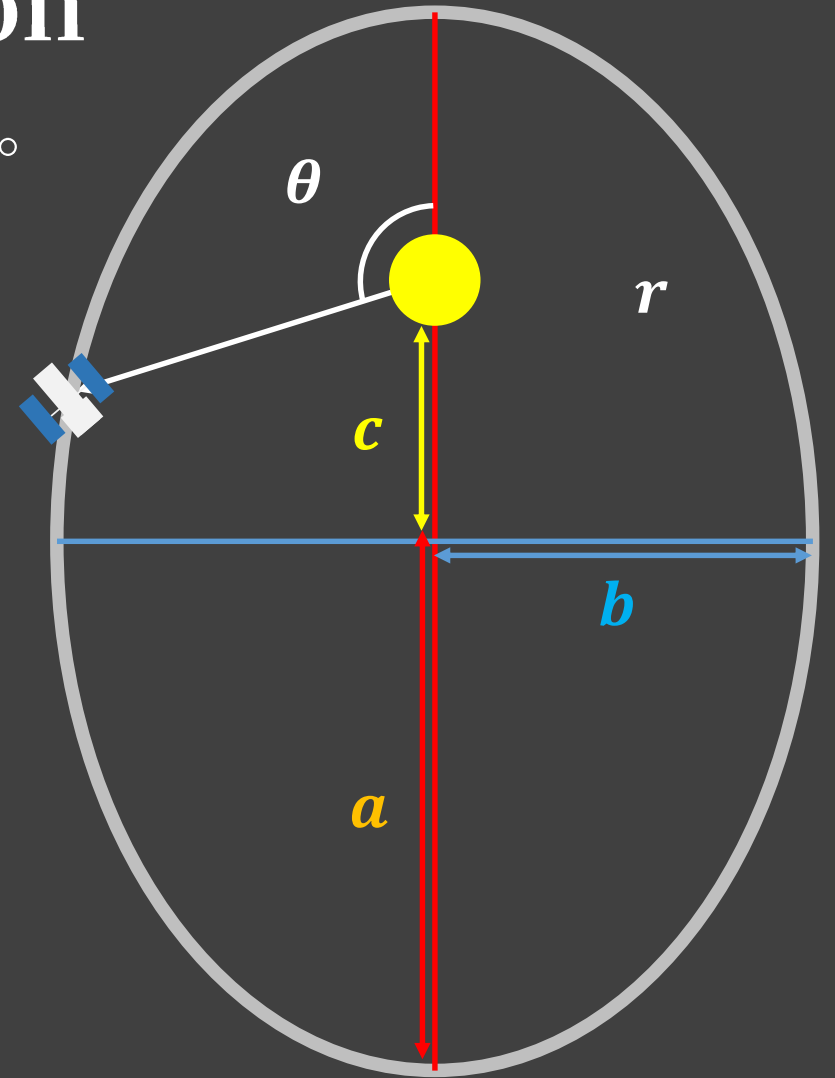
$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

- K2：單位時間內天體與焦點連線掃過的**面積**相同。

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{L}{2m}$$

- K3：軌道**週期**平方與**半長軸**三次方呈正比。

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$



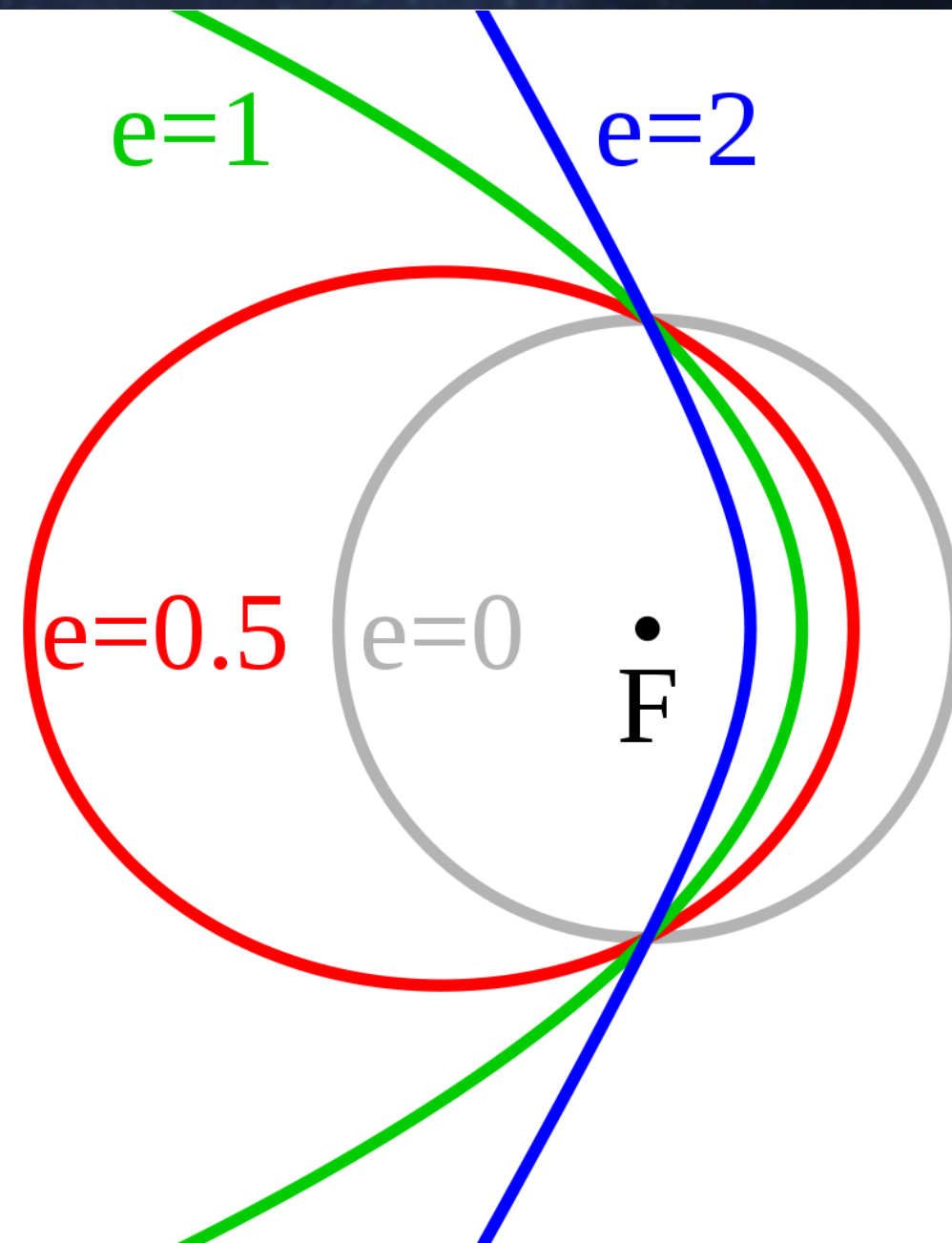
其中 e 為軌道的離心率（eccentricity），
它的數值決定了軌道的形式：

- $e = 0 \Rightarrow$ 圓形軌道
- $0 < e < 1 \Rightarrow$ 橢圓軌道
- $e = 1 \Rightarrow$ 拋物線軌道
- $e > 1 \Rightarrow$ 雙曲線軌道

而 e 的數值，決定於衛星在某一點所具備的速度方向與大小。

如果速度低於逃逸速度，則 $e < 1$ ；

如果高於逃逸速度，則 $e > 1$ 。



常見的軌道類型

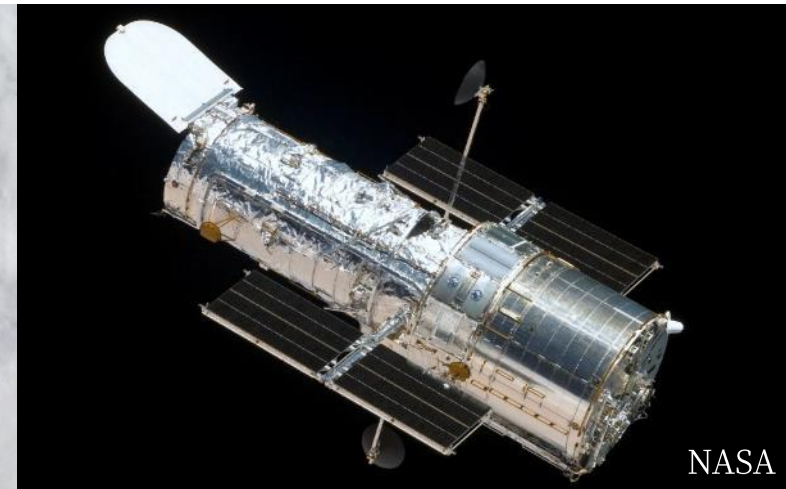


近地軌道 LEO

- Low Earth Orbit
- 泛指高度 2000 公里以下的圓形軌道
- 大部分的科學衛星、資源衛星、間諜衛星都在此類軌道中運行
- 著名例子
 - 國際太空站 (ISS)
 - 太空梭 (STS)
 - Starlink
 - 哈伯太空望遠鏡 (HST)

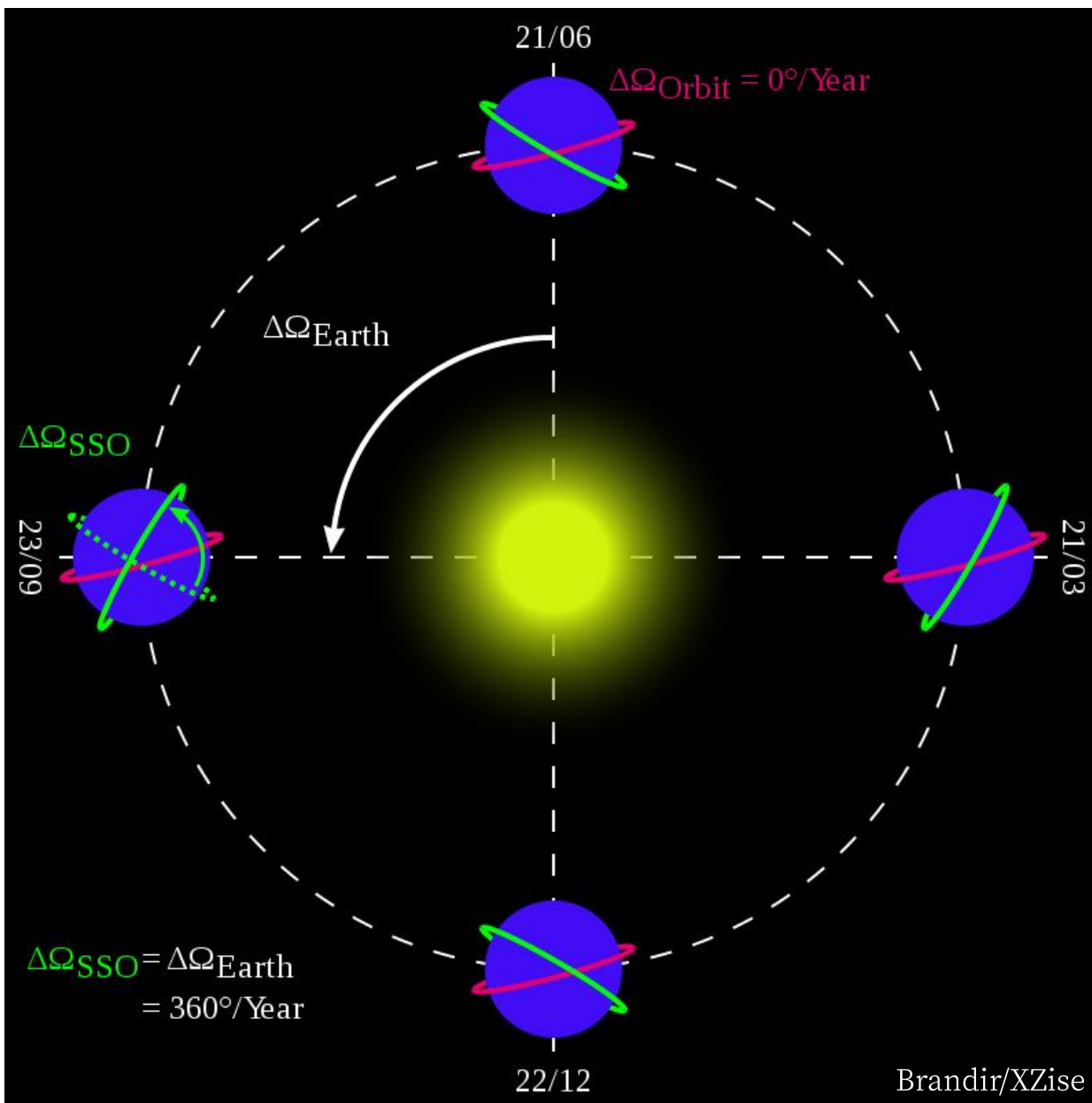


S119E009765



極軌道 Polar Orbit

- 高軌道傾角
衛星經過兩極地區的軌道
- 衛星的軌道可以覆蓋大部分的地球表面，尤其是同步衛星無法看到的兩極
- 特殊的極軌道：太陽同步軌道 SSO
 - Sun-synchronous orbit
 - 軌道面進動與地球公轉週期相同
 - 衛星拍攝時太陽仰角恆定
方便影像校正和分析，廣泛用於影像衛星



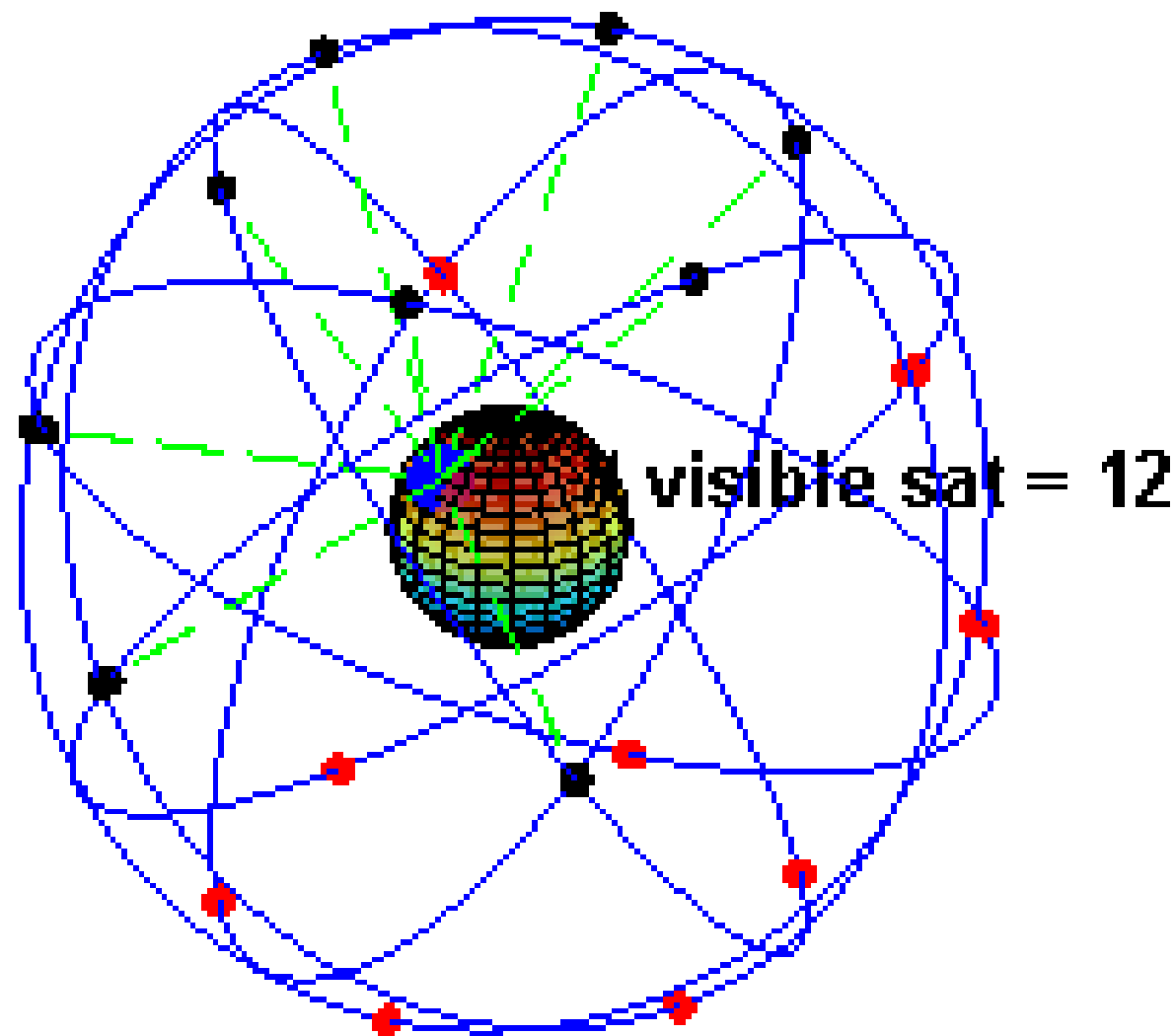
Brandir/XZise

中地球軌道 MEO

典型使用者：全球導航系統

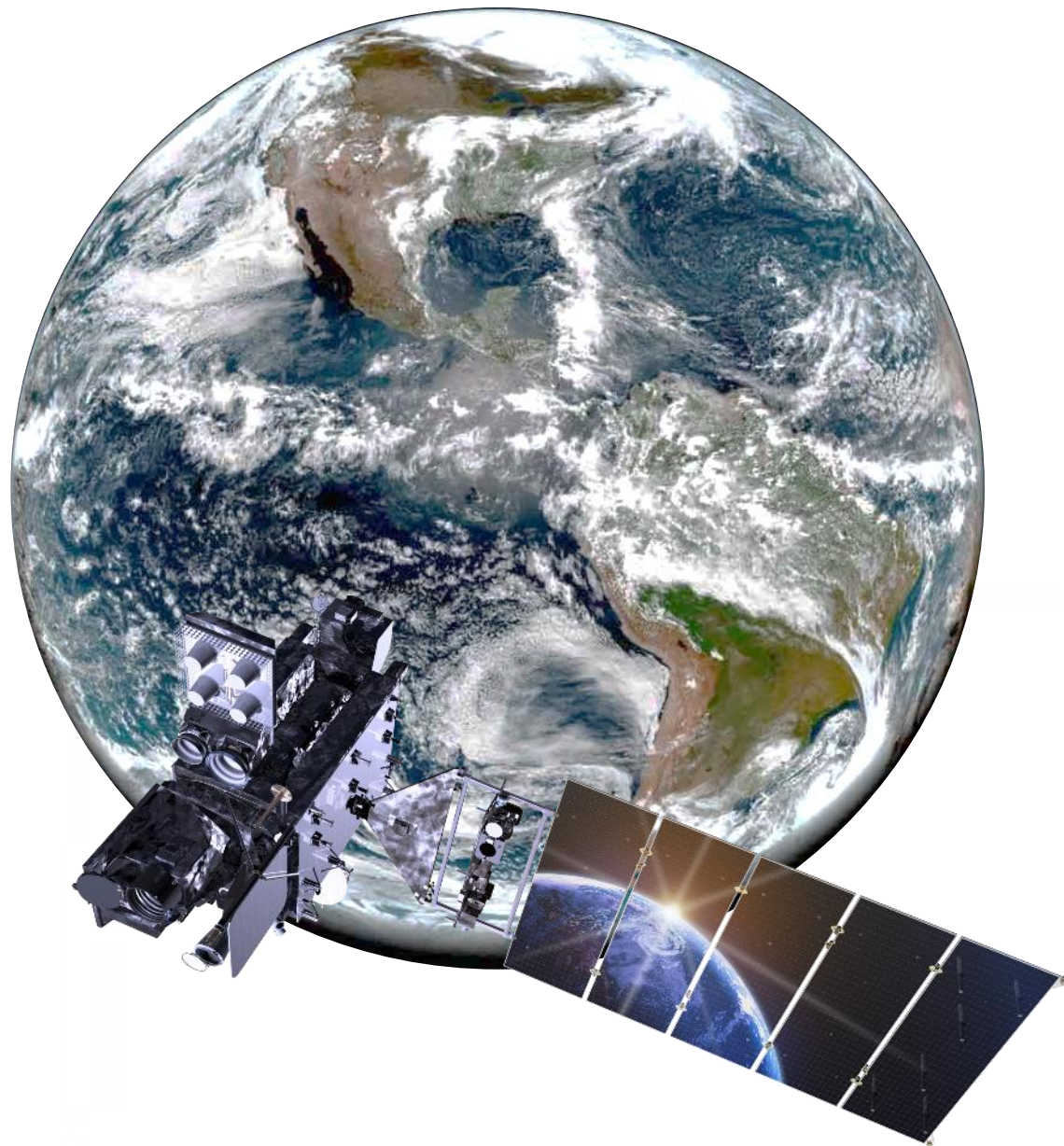
軌道高度約 20000 公里

- 美國 GPS
- 中國北斗
- 歐洲 Galileo
- 俄羅斯 GLONASS



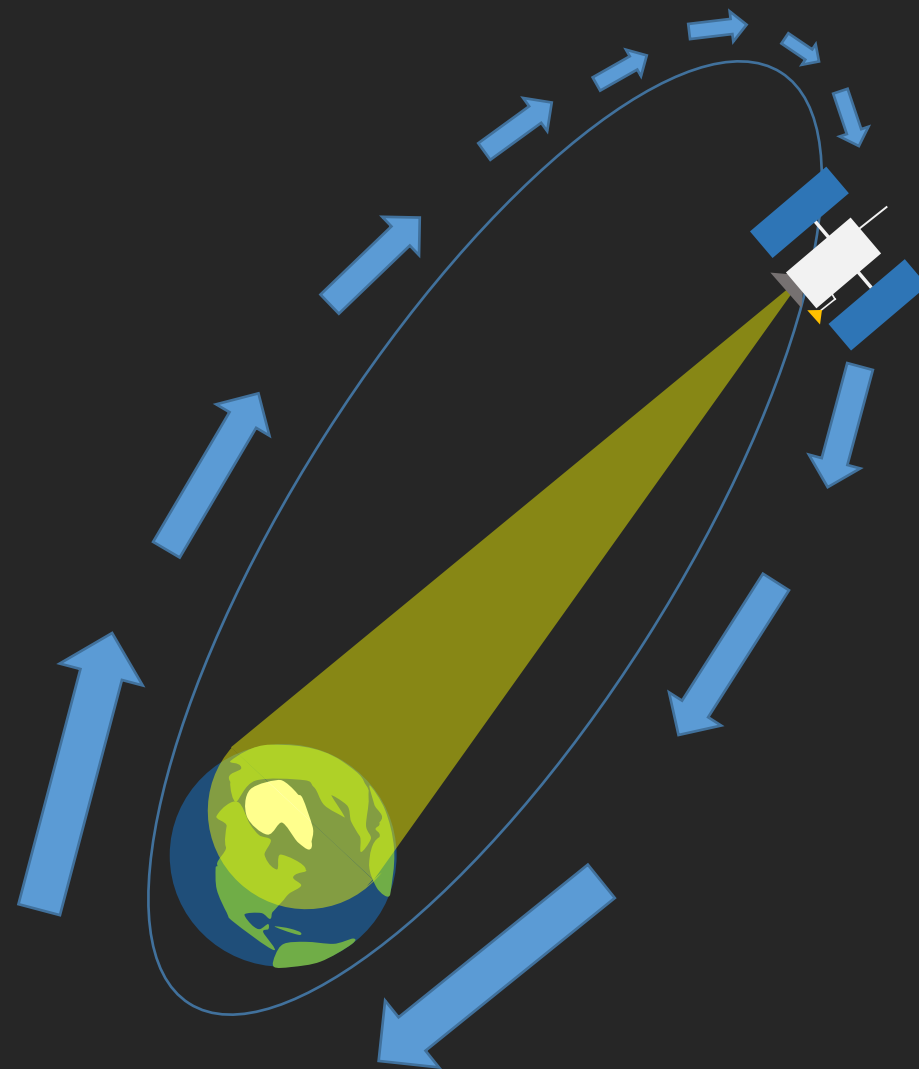
地球靜止軌道 GEO

- 赤道上空，高約 36000 公里衛星
繞地週期與地球自轉相同
從地面上看，衛星固定於天球上
- 典型使用者
 - 同步氣象衛星 (e.g. GOES、向日葵)
 - 同步通訊衛星 (e.g. SES、TDRS)
 - 同步監視衛星 (e.g. SBIRS)



高橢圓軌道 HEO

- 具有高離心率的軌道
通常為了強化對高緯地區的長時間連線
或是遠離地球干擾
- 典型例子
 - 閃電軌道 Molniya orbit
 - SBIRS HEO
 - 錢卓太空望遠鏡 Chandra



次軌道 Sub-orbit

- 軌道與地面有交點
無法完整環繞地球的軌道
- 常見使用者：
 - 探空火箭 Sounding Rocket
 - 彈道飛彈 Ballistic Missiles



轉移軌道 Orbital Transfer

➤ 如何讓衛星從一個軌道前往另一個軌道？

➤ 最簡單的轉移方式：

霍曼轉移 Hohmann transfer orbit

以一個橢圓形軌道的近心與遠心點

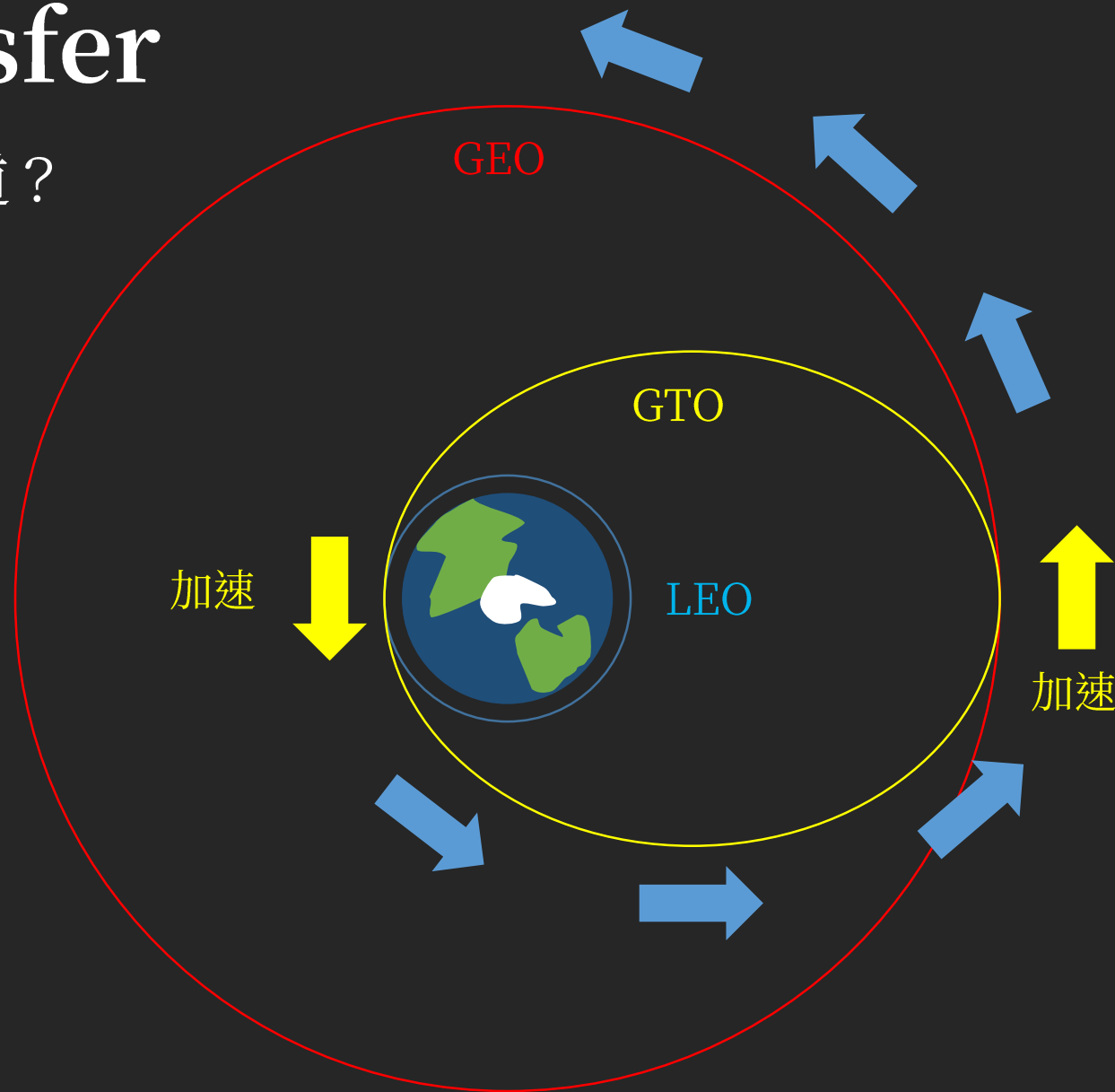
將現存軌道與目標軌道相連

➤ 為進入這個橢圓軌道，需要**兩次**加速

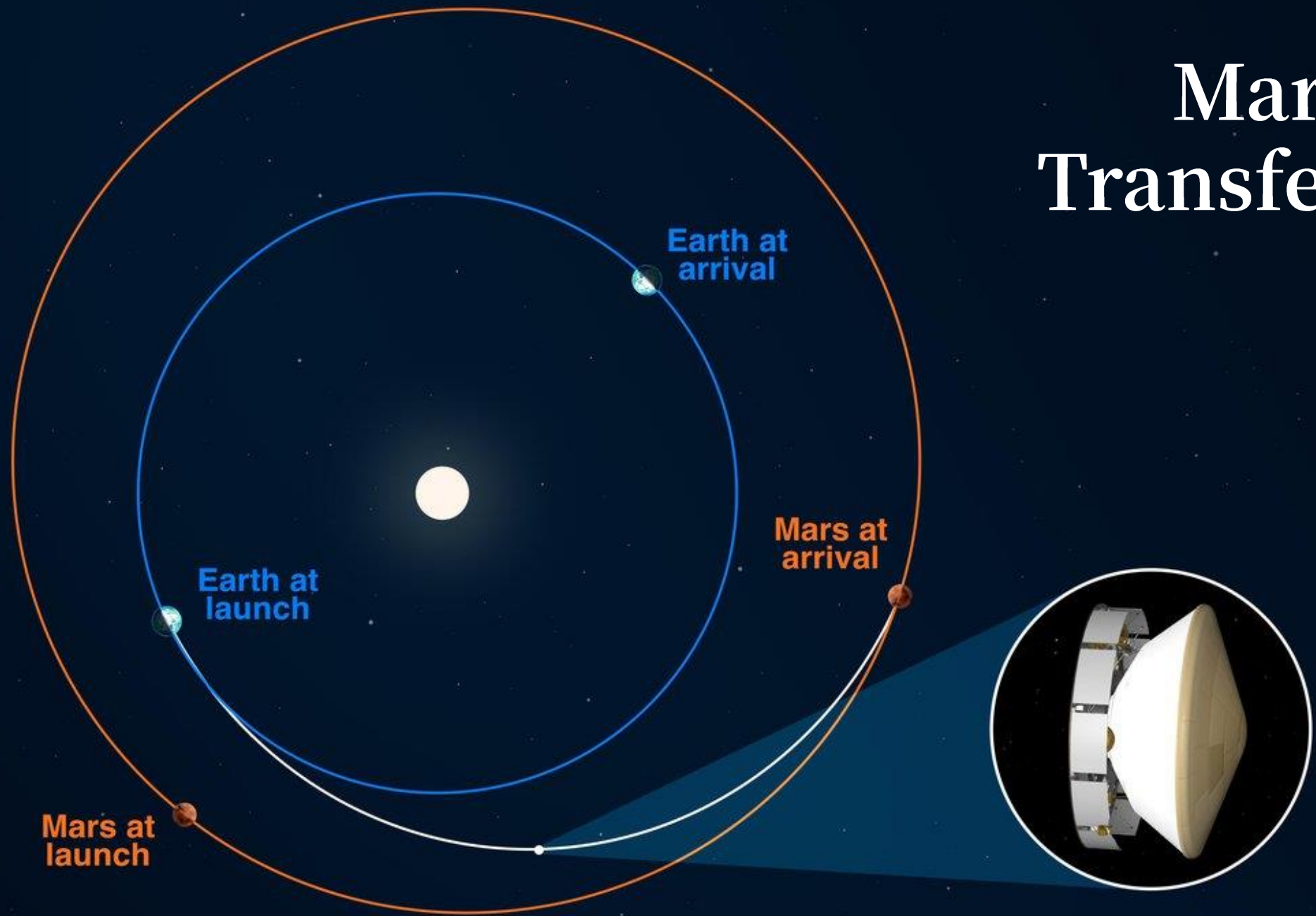
➤ 一次從原軌道切入轉移軌道

➤ 一次從轉移軌道切入目標軌道

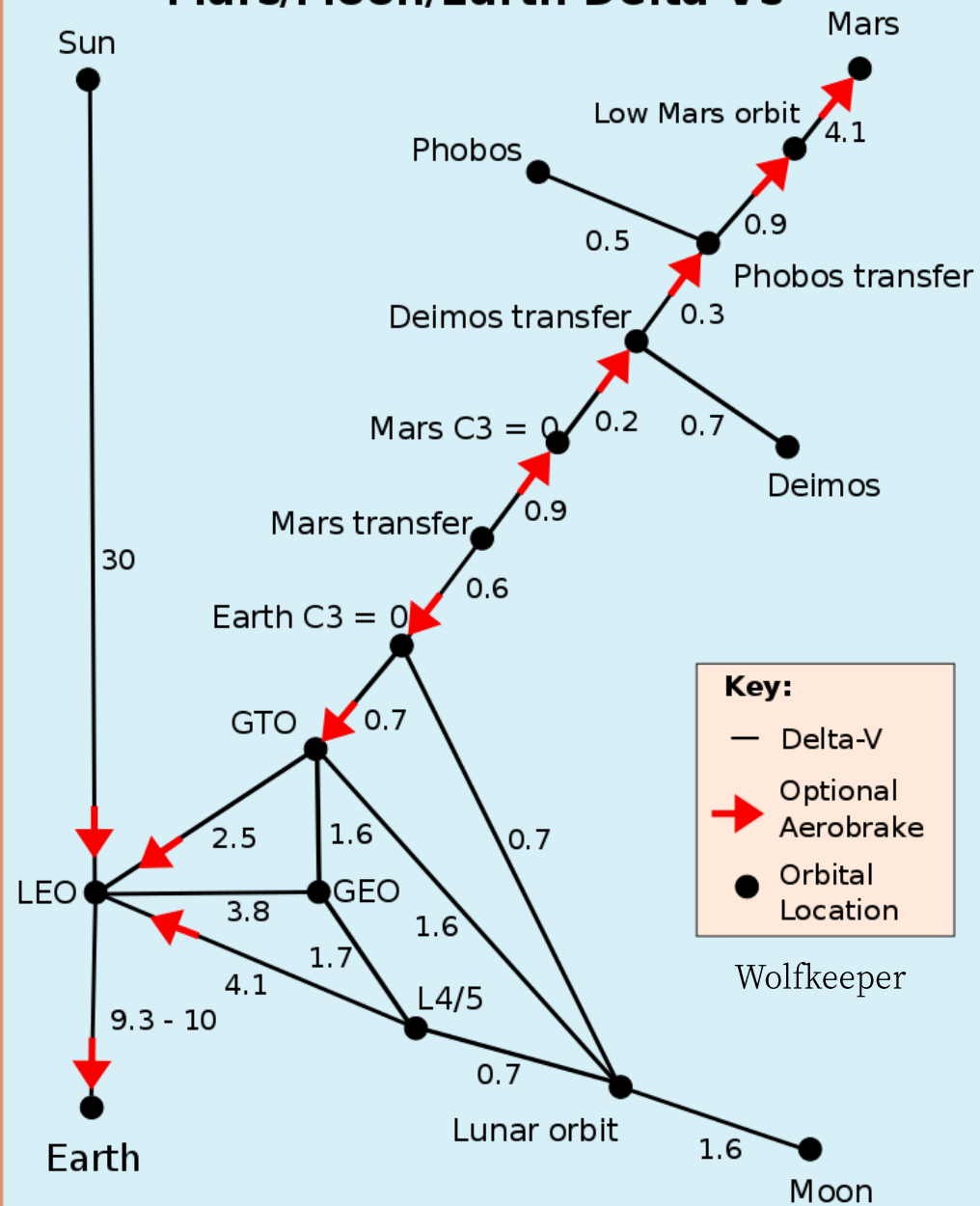
➤ 加速 → 改變速度大小 → 速度增量 Δv



Mars Transfer



Mars/Moon/Earth Delta-Vs

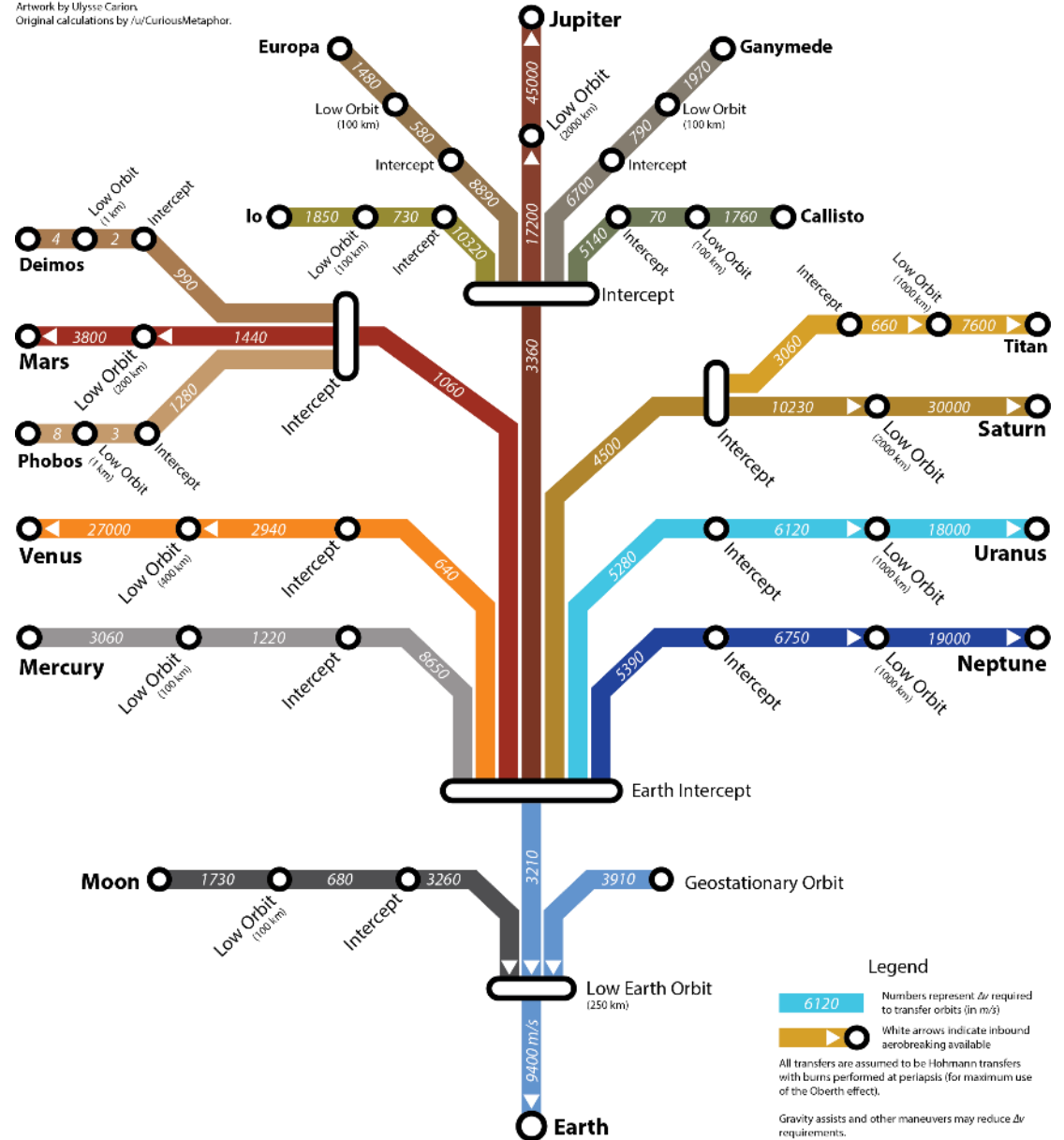


N.B. Not all possible routes are shown.
Delta-Vs are in km/s and are approximate

The Solar System

A subway map

Artwork by Ulysse Carion.
Original calculations by Au/CuriousMetaphor.



在軌會合 Orbital Rendezvous

➤ 如何讓兩艘太空船在軌道上會合？

- 一、兩者必須進入相同的軌道

- 二、兩者必須處於同個位置

➤ 加速？

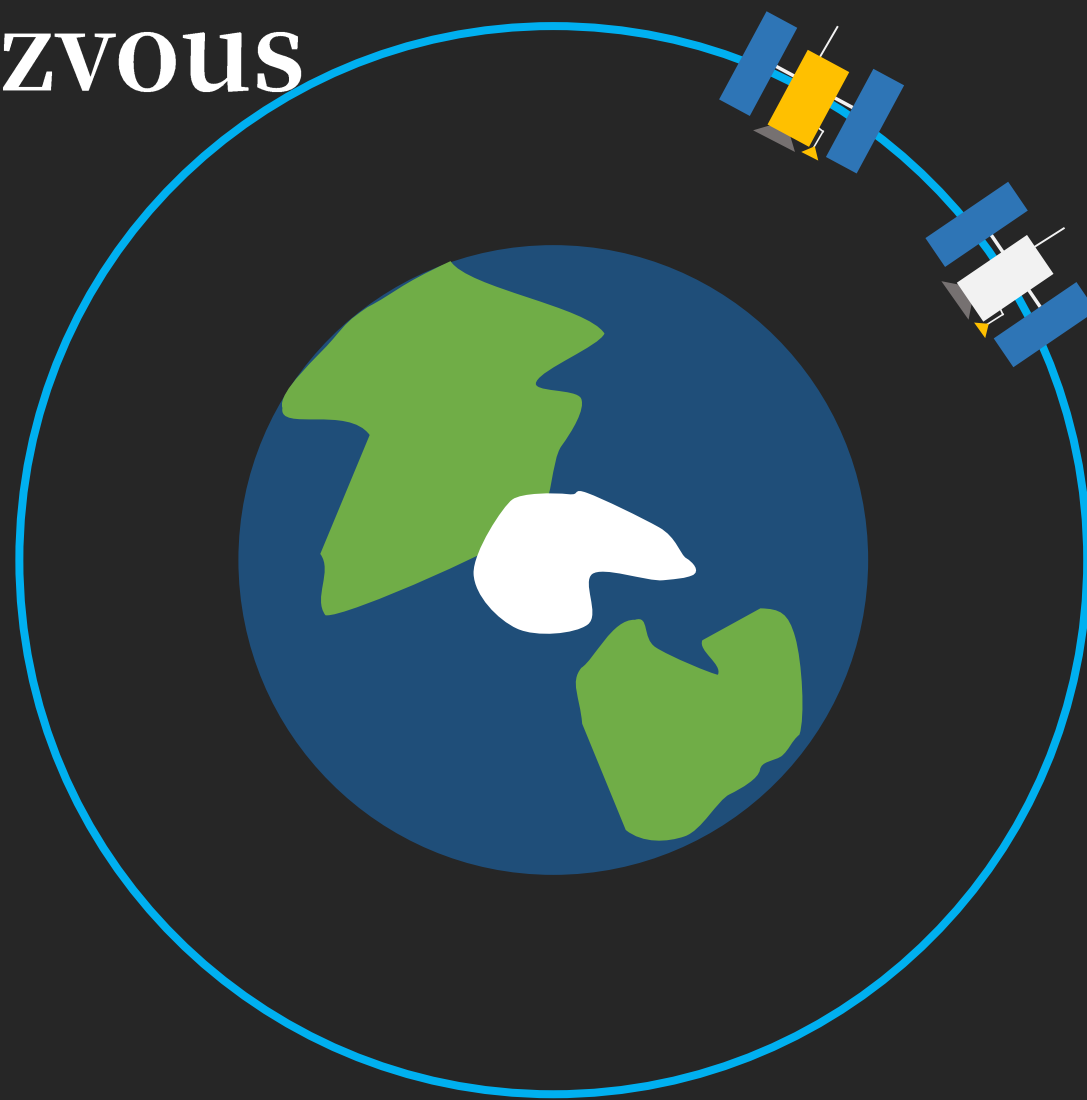
- => 進入更高能量、半長軸更長的軌道

- => 軌道週期更長，走完一圈後反而離得更遠

➤ 減速！

- => 進入更低能量、半長軸更短的軌道

- => 軌道週期更短，走完一圈後才可能會合

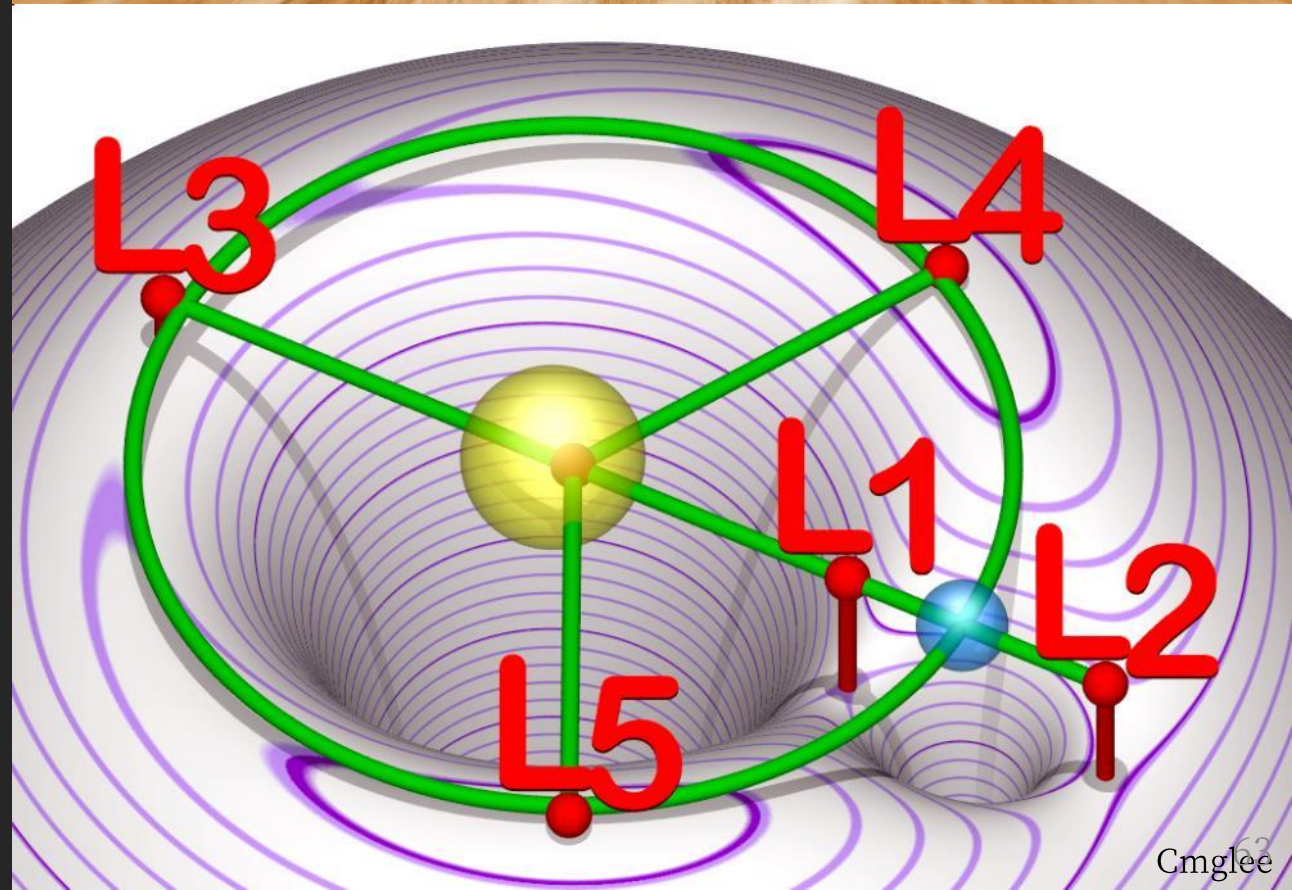


在軌會合：國際太空站



更困難的問題 更豐富的機會

- 大氣阻力：軌道衰減 Orbital decay
氣動減速 Aerobraking
- 地球橢圓率、日月引力影響：
軌道攝動 Orbital Perturbation
- 多體問題：
拉格朗日點 Lagrange points
暈輪軌道 Halo Orbits
- 輻射壓 Radiation pressure：
太陽帆 solar sail



小結 Summary

Ask yourself :

- 進入太空和進入軌道有什麼不一樣？
- 火箭是以什麼原理加速前進？其能量來源為何？
- 常見的火箭推進劑組合有哪些？火箭為什麼要分節？
- 克卜勒行星運動三定律是哪三個？
- 常見的衛星軌道有哪些？它們各自有什麼特色？
- 如何在軌道之間轉移？有哪些因素會影響衛星軌道？

物理人眼中的太空科技 Part 3

可重複使用火箭



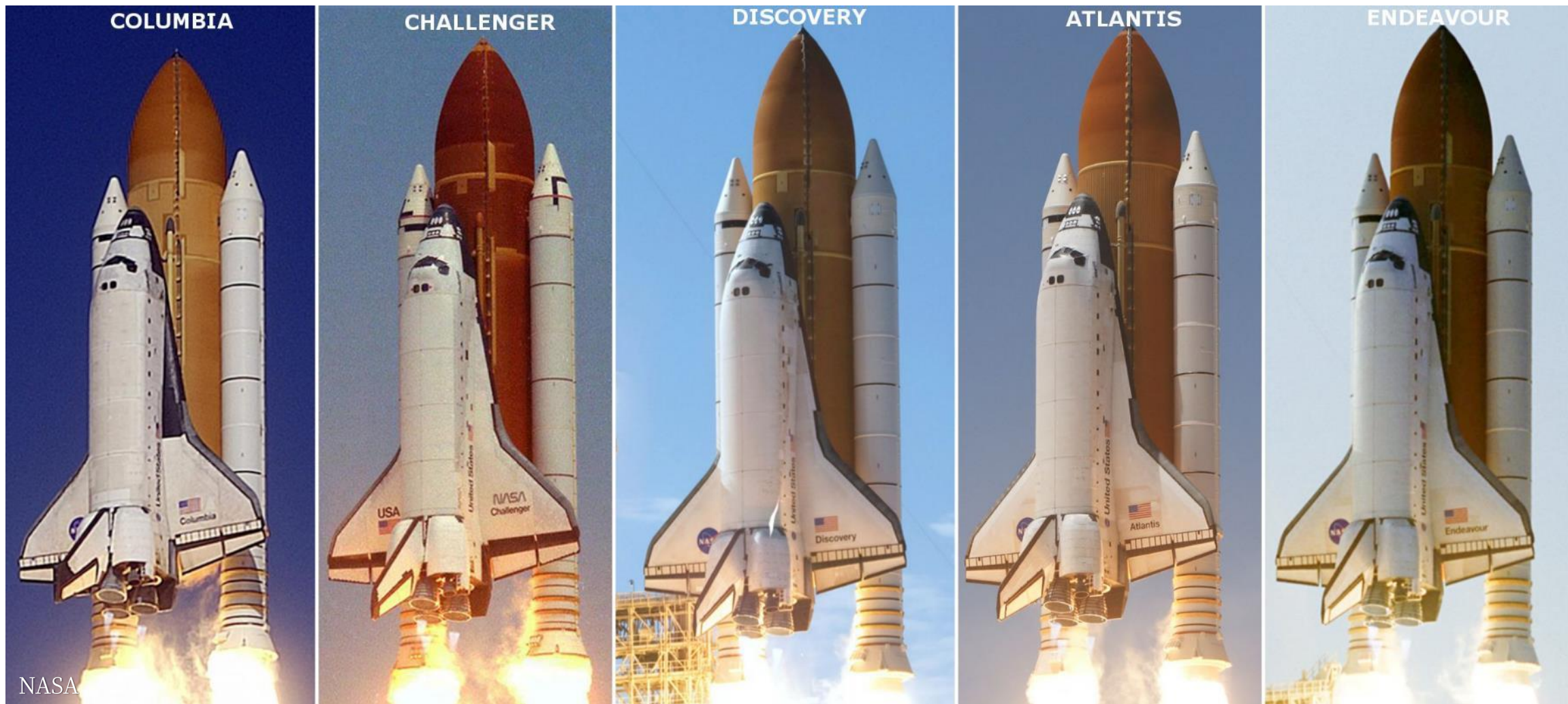
$$\frac{(3 \times 10^8) \times 30}{400} \sim 2 \times 10^7 \text{ NTD}$$



擎天神五號 Atlas V

- 發射總質量：500+ 公噸
- LEO 運載能力：~ 20 公噸
- 一次發射，只有 5% 的質量才會進入軌道
其他 95% 都消散、燒毀於大氣或墜入海洋
- 發射費用：~ 1 億美金
- 太空計畫僅有大企業與政府機構能夠負擔

過往的努力：太空梭計畫

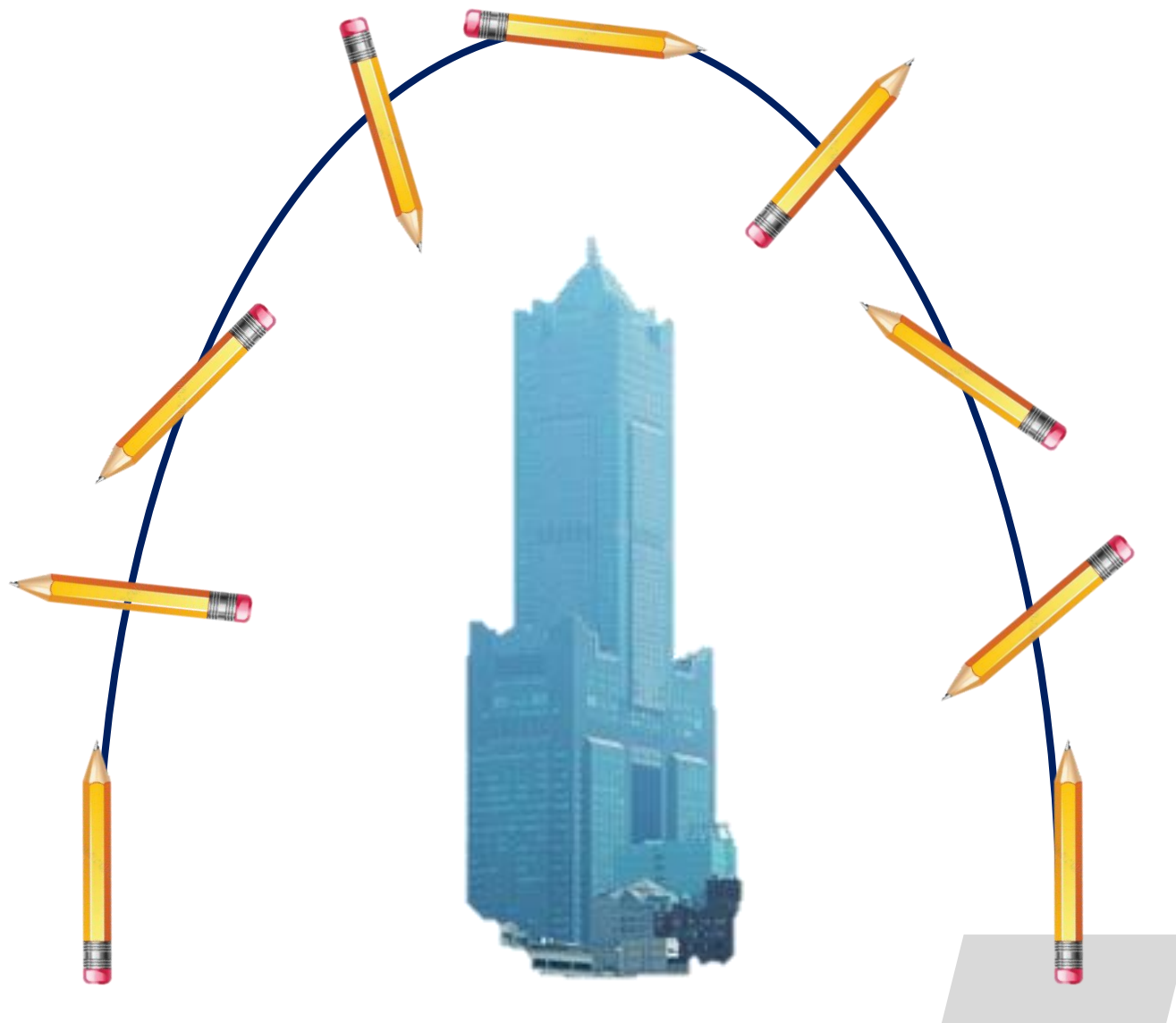




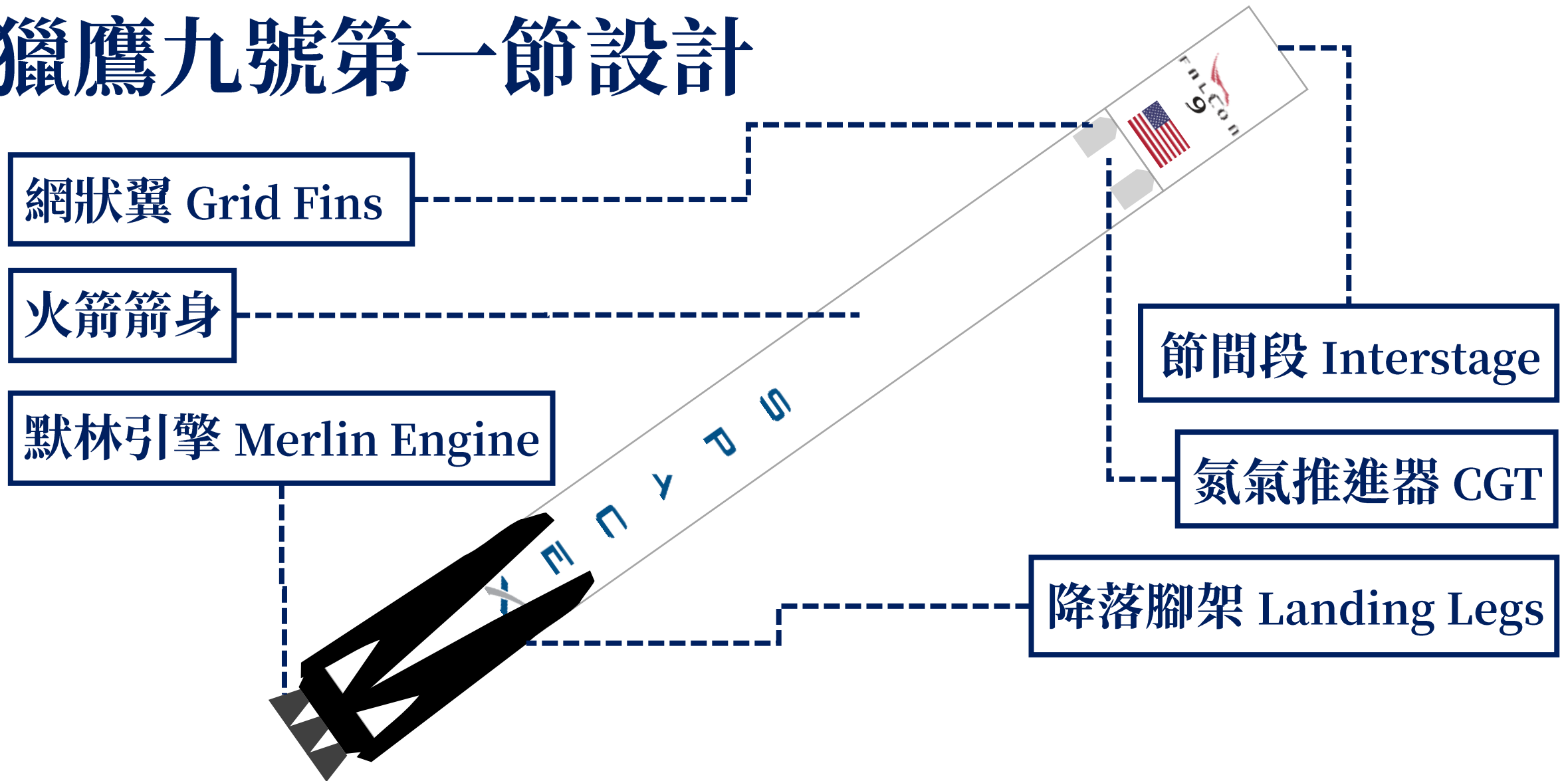
- 伊隆·馬斯克 (Elon Musk) 於 2002 年成立
- 目標：讓人類成為跨行星物種
Making Human a Multiplanetary species
- 建立一種能夠**快速可重複使用**的發射系統
降低前往太空所需的花費
- 回收 → 輕度整備 → 再發射
重複使用除推進劑外的硬體以分攤製造成本

這很難嗎？

很難
超級難。



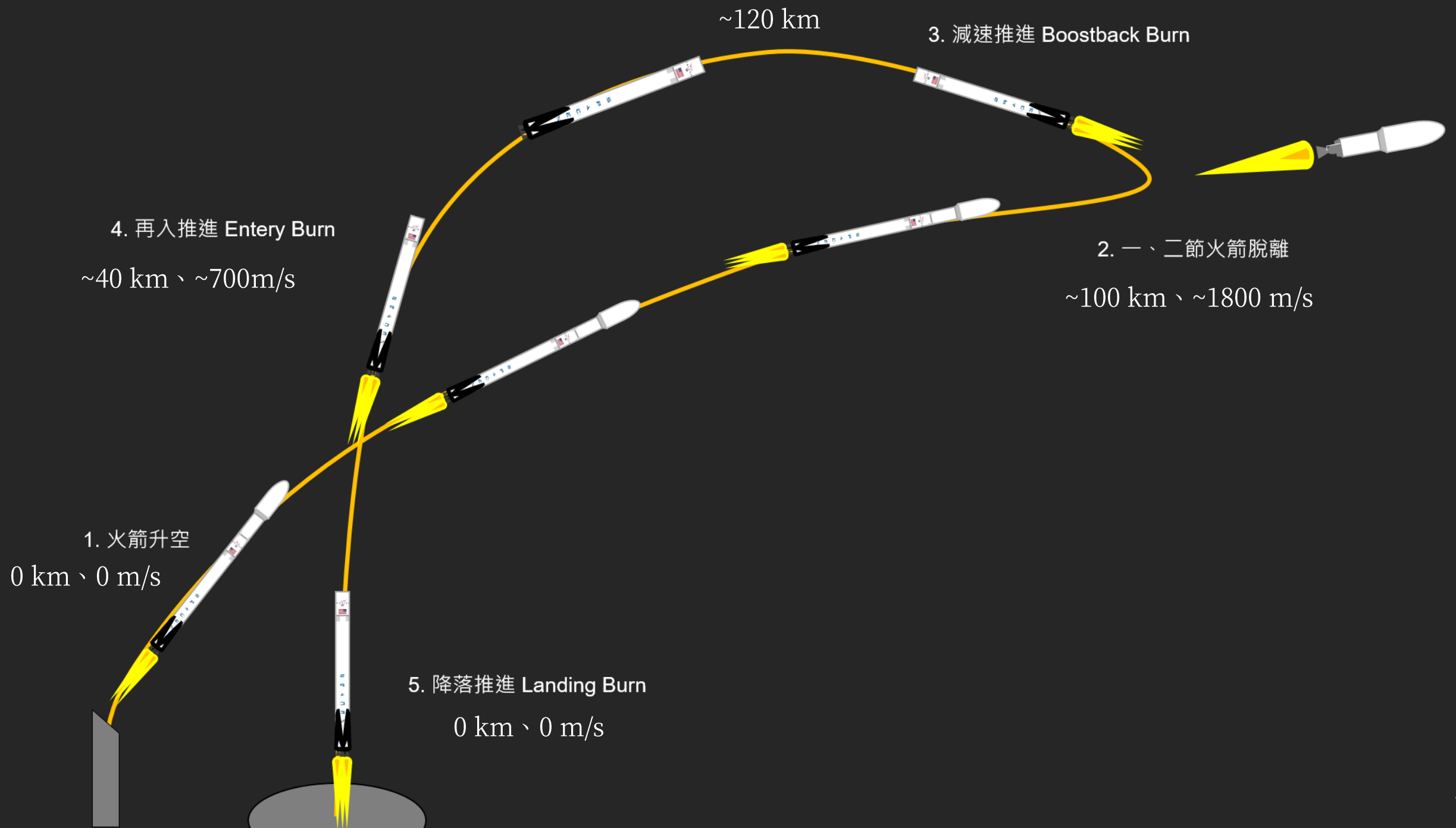
獵鷹九號第一節設計



降落地點

- 陸上降落場
 - 卡納維爾角：LZ-1/2
 - 范登堡基地：LZ-4
- 無人航太陸駁船 (ASDS)
 - Of Course I Still Love You
 - 「當然我還愛你號」
 - Just Read The Instructions
 - 「請閱讀說明書號」
 - A Shortfall of Gravitas
 - 「肅穆的引力不足號」







T+ 00:00:00

STAGE 2

TELEMETRY

SPEED

ALTITUDE

00000
km/h

00.0
km

UPCOMING

LIFTOFF

STARTUP

THE FALCON 9 FLIGHT COMPUTERS
HAVE TAKEN CONTROL OF THE
COUNTDOWN

CRS-13 Hosted Webcast

<https://youtu.be/OPHbqY9LHCs>

LAUNCH: CRS-13

STARTUP

MAX-Q

STAGE 1 BOOSTBACK

STAGE 1 LANDING

DRAGON DEPLOY

SPACEX

LIFTOFF

MAIN ENGINE CUTOFF

STAGE 1 ENTRY BURN

SECOND STAGE ENGINE CUTOFF

ARRAY DEPLOY



重複使用！

- 2015.12 首次陸上降落成功
- 2016.04 首次海上降落成功
- 2017.03 首次重複使用第一節火箭
- 2018 重複使用比例達 55%
- 2019 重複使用比例達 70%
- 2021 起重複使用比例大於 90%
- 如今，獵鷹九號是史上最可靠、發射次數與頻率最高的運載火箭。

2024 年初至今發射質量為世界總和五倍以上



火箭回收的 運力損失



超過負荷的大型衛星
交由更大的火箭發射



A photograph of a Falcon Heavy rocket launching. The rocket is positioned vertically on the left side of the frame, with its three boosters visible. A large, bright orange and yellow flame and smoke plume is at the base of the rocket. To the right, another rocket is visible in the distance, also launching. The background is a clear blue sky with some light clouds. A semi-transparent dark grey horizontal band is overlaid across the middle of the image, containing the title and URL.

Falcon Heavy & Starman

<https://youtu.be/A0FZlwabctw>

其他參賽選手

- 聯合發射同盟 (ULA)
火神火箭 (Vulcan)
- 藍色起源 (Blue Origin)
新格倫火箭 (New Glenn)
- 火箭實驗室 (RocketLab)
電子、中子火箭 (Electron/Neutron)
- 國家航天局 (CNSA)
長征十號甲 (CZ-10A)





Starship 計畫

- SpaceX 的下一代
完全可重複使用 超重型 運載火箭
- 兩節式火箭：
 - 超級重型助推器 Super Heavy
 - 星艦 Starship
- LEO 運力：100+ 公噸
- 可在軌加注推進劑

Starship will help enable humanity return to the Moon
and ultimately send people to Mars and beyond

<https://youtu.be/-Oox2w5sMcA>



A dramatic low-angle shot of a Starship rocket launching. The rocket is on the left, angled upwards, with a massive plume of fire and smoke trailing behind it. The background is a dark, deep blue sky with streaks of light from the launch. The text "Starship IFT-4" is overlaid in a large, white, serif font.

Starship IFT-4

<https://www.youtube.com/watch?v=j2BdNDTlWbo>



SpaceX



Starship IFT-5

很多沒機會提到的點

- 大型軌道通訊衛星星座 Mega Constellation
 - Starlink, Oneweb, Kuiper, 國網, G60, etc
- 小型火箭與立方衛星
 - RocketLab, Astra, Virgin Orbit, Firefly, Relativity Space, etc
 - Planet Lab, MarCO, CAPSTONE
- 軌道 / 次軌道太空旅遊 Orbital / Sub-orbital tourism
 - Blue Origin, Virgin Galactic, Axiom Space, etc.
- 商業太空 Commercial Space
 - 商業補給服務 CRS、商業成員計畫 CCP、商業太空站 CLD、商業月球酬載服務 CLPS 等



總結 Summary

可重複使用火箭 Reusable Rockets

- 載具能否重複使用對其操作成本至關重要
- 重複使用除推進劑之外的火箭硬體以降低成本
- 理念的實踐與證實：SpaceX 獵鷹九號 Falcon 9
- Starship：新時代，敬請期待。