

# 太阳系外围探测的构想及可行性分析

PB21010383 于俊骛

2023 年 6 月 24 日

## 摘要

太阳系外围的天王星、海王星、柯伊伯带一直是深空探测的焦点。由于技术等条件受限，我们对太阳系外围了解甚少，资料不足。本文基于人类深空探测历史以及当下航天科技，推测未来深空探测——尤其是太阳系外围探测的发展方向，并进行可行性分析。

**关键字：**深空探测，深空通信，宇宙航行，太阳系外围，构想

## 0 引言

20世纪中叶人类文明进入太空时代以来，我们已经对地球的近邻——月球、火星、金星等进行了多次意义重大的探测，获取了充足的科学资料。而由于环境复杂、航天技术不够成熟等因素，我们对太阳系边缘的天王星、海王星、柯伊伯带等知之甚少。随着文明发展，人类势必涉足更广阔的天地，太阳系外围的探索将成为一个不可忽视的方向。

## 1 概况

### 1.1 天体简介

太阳系外围的天体主要为天王星(Uranus)、海王星(Neptune)、柯伊伯带(Kuiper Belt)中的矮行星和小行星以及庞大的奥尔特云(Oort Cloud)。

天王星和海王星为两颗巨型气态行星，体积接近，主要成分是氢气和冰，因此常被称为“冰巨人(Ice giants)” [1]。其表面温度极低，环境恶劣，诸如“大黑斑(Great Dark Spot)”的风暴呼啸不止，难以近距离观测。两颗行星距离地球很远，以工质推进方案，探测器需要历时十年以上到达。它

们的公转周期均较长，行星位置排列规整的发射窗口期可遇而不可求。综合以上因素，通过航天器对天王星和海王星直接探测较为困难，因此目前只有旅行者2号（Voyager 2）对飞掠了这两颗恒星。

行星	赤道半径	轨道半径	公转周期	表面温度	卫星数目
天王星	25559km	20AU	84.3年	53K	27
海王星	24764km	30AU	164.8年	55K	14

表 1: 天王星与海王星部分参数

柯伊伯带是冥王星轨道外侧、黄道面附近的一处天体密集环带，与太阳的距离为40到50Au。其中包含了冥王星(Pluto)等知名矮行星与一系列小行星。这里曾一度被认为是太阳系的边缘。柯伊伯带是包括哈雷彗星(Halley's Comet)在内的一系列短周期彗星的出发地，且被广泛认为是海卫一、土卫九等太阳系内天体的物质发源地，因此对柯伊伯带的研究对太阳系的演化具有重要意义。而在“距离远”的基础上，柯伊伯带的又具备“范围大”的特点，这或许使得航天器对它的探测只能是管中窥豹。

奥尔特云是仅存在于理论上的区域，它位于柯伊伯带外，延伸至距离太阳2光年的位置。即使人类距地球最远的探测器之一——旅行者1号(Voyager 1)，以超过20km/s的速度，也要经过约300年才能进入奥尔特云，并且再耗费约30000年才能穿越，彻底离开太阳系。由于存在性存疑且距离过于遥远，本文的“太阳系外围”暂不考虑奥尔特云。

## 1.2 探测历史回顾

由于距离太过遥远，远距离航行的能力不足，我们过去对太阳系外围的探测以天文观测为主。以太太阳系外围的三颗主要天体为例（表2），它们仅仅各见证了一艘航天器的造访。

旅行者2号分别于1986年和1989年接近天王星和海王星，成为至今唯一一艘近距离探测这两颗行星的航天器。旅行者2号最初定位为木星和土星探测器，在预定目标完成后，能源仍然充足，便借助土星引力弹弓以及176年一遇的规则行星排列方式（图1），消耗较少能量，依次拜访了天王星和海王星。旅行者2号首次发现了天王星的星环及多颗卫星，并明确了其行星磁场方向；途径海王星时，首次近距离拍下了海王星照片，并发现了巨型风暴“大黑斑”。

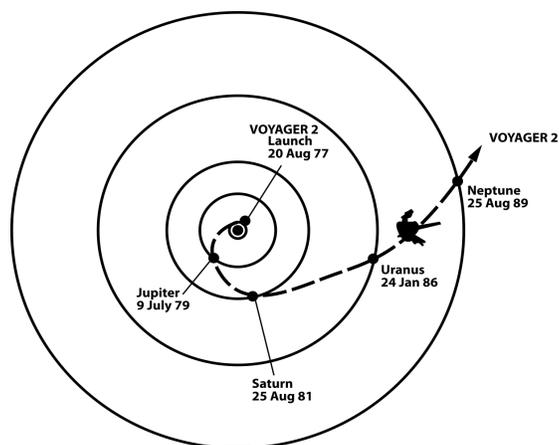


图 1: 旅行者2号轨道

为弥补旅行者2号未能接近冥王星的遗憾，NASA于2006年，发射了轻型探测器“新视野号(New Horizons)”，借助木星的引力弹弓加速前往冥王星，成功接近并拍摄了曾被奉为“太阳系第九大行星”的冥王星以及它的卫星卡戎(Charon)。完成这项任务后，它继续向太阳系外飞行，同时探索人类未曾踏足的柯伊伯带，发现了鸟神星(Makemake)、阋神星(Eris)、妊神星(Haumea)等矮行星以及大量小行星。

天体	发现时间	首次造访	造访次数
天王星	1781	1986	1
海王星	1846	1989	1
冥王星	1930	2015	1

表 2: 太阳系外围天体探索情况

## 2 时间的延续

迄今为止，前往太阳系边缘的五艘探测器先驱者10/11号(Pioneer 10/11)、旅行者1/2号、新视野号均于地球联系信号微弱，且很多科学仪器进入休眠状态，难以继续开展科研探测任务。因此，为了能够可持续地对太阳系外围进行探测，必须延长探测器的使用寿命[2]。

## 2.1 能源供应

以目前的航天技术，无工质飞船仍然遥遥无期。由Tsiolkovsky公式

$$v = u \ln \frac{M}{M_0} \quad (1)$$

工质飞船的推进必须反方向抛开质量才能获得更高的速度，且这个过程是对数增长。通过狭义相对论效应对其进行修正，得到

$$v = c \frac{1 - \left(\frac{M}{M_0}\right)^{\frac{2u}{c}}}{1 + \left(\frac{M}{M_0}\right)^{\frac{2u}{c}}} \quad (2)$$

对该式在  $v \ll c$  时进行 Taylor 展开，则式(2)仍近似为式(1)。

因此，无工质飞船出现之前，我们很难实现星际航行。但是，通过改进燃料，提高能量转换效率，使实际速度趋近于理论速度，仍然可以使我们游刃有余地探访太阳系的外围。

### 2.1.1 可控核聚变

可控核聚变是当下的重要课题，一经实现，有望永久性解决能源危机。目前核聚变的两个重要方向是氘氚聚变和氦-3聚变。



氢核聚变也是宇宙航行的一个理想能源[6]，它的热值是传统化学燃料的 $10^7 \sim 10^8$ 倍。根据Einstein质能方程，氢核聚变的效率高达0.1%，可以大幅度降低所需燃料的质量，提高火箭质量比。一个需要加注5000吨化学燃料的推进器，改为核聚变燃料后只需154克。可控核聚变只要极少的燃料，就能产生巨大的能量，是未来深空远航能源的不二之选[9]。

另一方面，根据式(1)，为了获得更高的速度，我们需要多的质量。氢元素是宇宙中最丰富的元素，因此捕获、收集氢元素成为了一个可行方案。科学家们曾设计了一个“管道形”航天器，可以捕获星际空间中的氢元素，并将它们排出，用于反推航天器。该方案由于效率太低而被舍弃。然而，一旦人类掌握了可控核聚变技术，可以将这些粒子中可供聚变的部分（氘、氚、氦-3等）加入反应堆，为航行提供能量。更一般地，探索太阳系外围时，航天器可以大量捕获四颗气态行星上的氢元素。依照这种方案，即使无法实现恒星际航行，探索太阳系的难度也会大大降低。

元素	${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	${}^3_2\text{He}$
丰度	99.985%	0.016%	0.004%	0.000138%

表 3: 几种元素及其同位素的天然丰度

### 2.1.2 无线充电

航天器携带的能源有限，而地球上的能源是充足的，那么我们能否直接从地球上对航天器进行供能呢？

2021年，俄罗斯“能源”航天公司对外宣称将开展代号“鹈鹕”的实验，测试太空中激光能量传递的方案。一旦被证实可行，该项技术可被用于深空探测航天器的供能。

目前的激光传输技术相对落后，且在大气中衰减严重，显然无法从地面向数十个天文单位外的航天器直接供能。但是，我们可以在火星、木星等轨道上布设环绕器，充当“继电器”的作用，在行星位置排列合适时，指令人造地球卫星间接向太阳系外围的航天器输送能量。激光在真空中损耗较小、精度较高，可以比较高效地供能，有效延长深空探测器的续航寿命。

## 2.2 材料升级

为了进一步获取信息，我们必须对天体进行近距离探测。天王星、海王星表面环境恶劣，近距离探测对航天器的材料提出了很高的要求。

近距离探测需要材料抗压性很强。伽利略号(Galileo)再入器（图2）是人类制造的最坚固的探测器之一，它在进入木星大气层后，被加速至47km/s，重力过载228G，很快解体。虽然天王星和海王星环境相对于木星稍许“优越”，在接近其表面时，航天器仍面临巨大抗压挑战。

航天器的耐热、耐寒性也无比重要。过高温和过低温都会使科学仪器停止工作。伽利略号就因大气摩擦，表面产生高达15500摄氏度的高温，其外部包裹的近150kg隔热材料烧掉了一半以上。为了能尽可能接近行星表面，升级隔热材料和配备缓降措施都必不可少。

最后，为了减少干扰，航天器需要先进的电磁隔离材料。无处不在的宇宙射线和行星表面的强磁场，都会使科学仪器迅速报废。

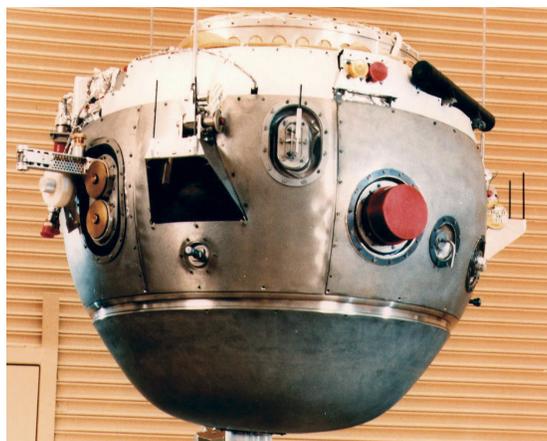


图 2: 伽利略号再入器

### 3 空间的扩展

随着深空探测的范围越来越大，航天器与地球也相隔天涯。为了前往太阳系外围的航天器能够顺利执行任务，“后勤保障”必须跟上。

#### 3.1 长距离通信

旅行者1号已经进入星际空间，那里必然有更多人类未知的奥秘。然而它早已与我们失联，在2022年，旧金山的艾伦望远镜阵列(ATA)特意转向旅行者1号的远去方向，也只捕捉到了15分钟来自它的信号。预计2036年，旅行者1号将与人类永久失联，成为银河系中的流浪者。

电影《流浪地球2》中说过：“没有人类的文明毫无意义。”我们可以类似地表述——如果探测结果只能在太空中漫无目的地游荡，这对人类科学的发展毫无意义。因此，我们必须和探测器保持良好的通信渠道，使每一个科学成果都能“为我所用”。

##### 3.1.1 提高灵敏度

航天器能量供应是有限的，应当优先服务于科学装置运转和轨道修正，所以需要大量耗能的“放大信号”的方案并不现实。相应的，提高信号接收器的灵敏度成为重中之重。地球大气层与地磁场对信号的影响较大，在

地面接受遥远探测器的信号及其困难。

一方面可以扩大接收面积，建造类似“中国天眼(FAST)”的大型射电望远镜；另一方面，可以将信号接收器送入地球轨道，甚至在月球上建立基地，负责信号接收，这样可以最大程度减少干扰，保证信号的完整性。

### 3.1.2 量子通信

量子通信是量子力学与通信技术交叉的成果[4]。这种基于量子纠缠的通信原理，具有强保密、高保真、瞬时性的特点。由于隐形“太空竞赛”的存在，一手的科学资料需要具备保密性；而且量子纠缠不受环境的影响，几乎不可能出现信号损坏、信息错位等风险，最大程度保证了探测成果的完整性、准确性。

太阳光到达柯伊伯带需要数小时，因此在传统的通信方式中，地面对航天器的遥控有着无法规避的延时。在这种条件下，航天器很难处理突发状况，地面也无法即使采取应对措施，为探测带来很大不确定性。而量子纠缠是一种“超距作用”，它是为数不多能够超越光速的存在。若能将量子通信应用于航天，地面和航天器之间可以实现“几乎同时”的联络。

2016年，我国发射了全球首颗量子通信卫星“墨子号”，在近地轨道进行了验证了大量理论，证实了量子通信的可能性[6]。因此，未来我们有望建成一张覆盖地球乃至太阳系主要天体的高效、保密通信网，超远距离控制航天器便不再是难题。

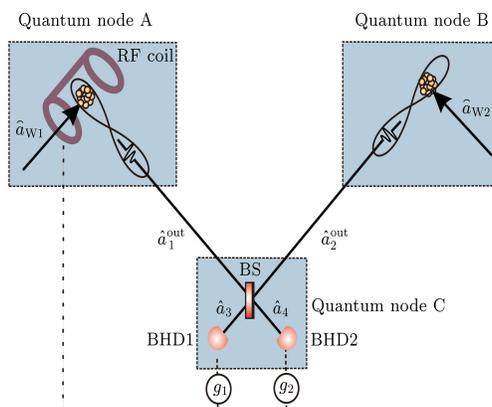


图 3: 量子纠缠概念图

## 3.2 中继站

如果无法一步登天，我们可以一步一个脚印，慢慢走。建立“中继站”是深空探测的一个前景广阔的方向，它可以避免“战线拉得过长”，简化程序，降低工作量。

### 3.2.1 信号中继星

2018年，我国“鹊桥号”中继星抵达地月拉格朗日点(Lagrange Point)，作为月背探测器的信号中继站。类似地，进行深空探测时，我们也可以发射这样的信号中继星，将其布设于太阳系内行星或其卫星的环绕轨道上。长距离信号传输失真严重，可以拆分为多个短距离传输。信号到达每个中继星时，经过校验和简单修复后，再发射到下一颗中继星。以此，地球和航天器之间可以实现高保真信号转递。

不过，该方案有着传输速度较慢的缺点，显然不能用于遥控。但它可以将前方的图像、声音等高质量地传回地球，使得我们获得具有更高的科学价值的探测成果。

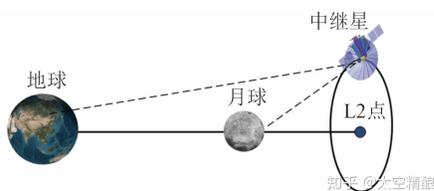


图 4: “鹊桥”工作示意图

### 3.2.2 卫星基地与空间站

一旦载人深空探测实现，人类便有望在火星以及气态行星的部分卫星表面建立基地。在此基础上，人类距离太阳系边缘更进了一步。借助航行距离近、逃逸速度小等优势，在基地上发射航天器，需要的燃料远远小于地球。更多的能量可被用于点火器和科学装置，极大地扩展了我们可探测的空间范围。同时，地外行星距离太阳较远，受到太阳活动的影响较小，进行天文观测、火箭发射都具有优越性。

建立地外空间站也是太空基地的一种有效方案。《三体》中，地球人为了躲避“光粒”武器的打击，建立了环绕木星、土星的“太空城”，甚至可供飞船起飞。只要可以实现航天器内部生态系统的可持续发展，并完善防宇宙射线措施和重力系统，提升火箭的运载能力，这种地外空间站也是可以实现。届时，我们有能力多视角、近距离地对太阳系外围进行探索和观测。

## 4 探测的深入

### 4.1 采样分析

为了准确研究天体的物质组成，采样分析必不可少。

#### 4.1.1 悬浮器

天王星和海王星均为气态行星，内部固、液核处压强巨大，放置着陆器几乎不可能[1]。为了能深入探测天王星、海王星的大气性质，我们可以设计“悬浮器”。它与一般的环绕器不同，并不停留在环绕轨道上，而是深入大气层。在抗压、抗电磁干扰、耐极端温度技术均成熟的前提下，可类似于伽利略号，由环绕器向行星表面发射一个携带悬浮器的再入器。该悬浮器需要类似“飞艇”的设计，可以通过改变自身密度，实现升降，并配备小型推进器。

只要避开类似大黑斑的强烈风暴，悬浮器可以随着大气对流在天王星或海王星上空漂浮，对大气进行采样。任务完成后，悬浮器将带有推进器和样品的舱体发射至环绕器。环绕器所处环境相对稳定，更有利于样品分析；若技术成熟，也可以将样品运回地球。

#### 4.1.2 仪器小型化

为了在抵达后仍有足够能量进行采样、分析，我们需要将各种科学仪器小型化，以减少运输耗能。这对精密仪器制造技术提出了要求。既要“轻便”，又要“精准”，才能最大可能地实现准确分析样品，并将结果传回地球的效果。

## 4.2 返回器

### 4.2.1 反向引力弹弓

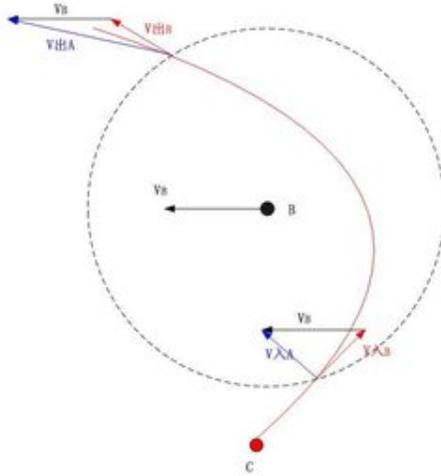


图 5: 引力弹弓图示

引力弹弓是人类目前深空探测航行的主要手段（表4）。探测器与天体组成的系统相对独立，由能量守恒、动量守恒和角动量守恒

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}MV_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}MV_2^2 \quad (5)$$

$$m\vec{v}_1 + M\vec{V}_1 = m\vec{v}_2 + M\vec{V}_2' \quad (6)$$

$$m\vec{r}_1 \times \vec{v}_1 + M\vec{R}_1 \times \vec{V}_1 = m\vec{r}_2 \times \vec{v}_2 + M\vec{R}_2 \times \vec{V}_2 \quad (7)$$

只要航天器以合适的位置和初速度和进入天体的引力范围，即可获得天体的能量，达到加速的目的（图5）。引力弹弓加速效果奇佳，如旅行者二号经过天王星后，绝对速度提高了近10%。

我们不妨换位思考，根据式(5)(6)(7)，如果 $r_1$ 和 $v_1$ 合适，天体也可以对航天器起到减速作用。此时航天器的能量向天体传递，航天器能量降低。由椭圆轨道的能量公式

$$E = -G\frac{Mm}{2a} \quad (8)$$

航天器相对太阳的轨道半长轴 $a$ 减小，航天器向太阳靠近。只要行星位置合适、参数控制恰当，再适当予以轨道修正，这种“反向引力弹弓”理论上

可以将航天器向太阳系中心吸引，有望帮助航天器通过消耗很少的能量返回地球，避免航天器超过第三宇宙速度而一去不返。

航天器	旅行者1号	旅行者2号	新视野号	卡西尼号(Cassini)
天体	木星	木、土、天王星	木星	金星(2次)
目的地	土星	海王星	冥王星	土星

表 4: 引力弹弓案例

#### 4.2.2 人造行星

我们设计建造了大量人造卫星，但至今没有“人造行星”的出现。事实上，五艘探测器飞出太阳系，表明人类已经有能力将航天器加速到第三宇宙速度。下一步，我们获取可以考虑发射这样的“人造行星”。

所谓的人造行星，并不意味着航天器需要有行星般的体量。这里指的是航天器可以如行星一般，以太阳为中心天体，进行椭圆轨道航行。

首先，地球上发射的航天器可以经过金星(Venus)、水星(Mercury)的(可能不止一次)引力加速，以合适的初速度接近太阳，使得航天器不至于被高温或太阳风损坏。同时，借助太阳引力适当加速，利用太阳绕银心黑洞(Galactic Black Hole)旋转的动量，使末速度达到小于第三宇宙速度的某个值，将轨道修正为类似于短周期彗星的大离心率椭圆轨道。

该方案使得探测器能够抵达近至水星、远至柯伊伯带的太阳系大部分区域。由于太阳系天体密度不高，航天器与天体相撞概率很小。当探测器抵达近日区域时，可以通过太阳能板接收并储存能量，用于远日区域的装置供能、轨道修正、信号传输等。只要不受到太阳活动、彗星撞击、宇宙高能射线等的影响，该方案理论上可以使航天器长期运行。

#### 4.3 载人探测

当航天器为我们探明前路后，人类最终一定会忍不住好奇心，亲自去太阳系的外围看一看。载人深空探测相较于无人探测难度陡增，航天员的科学素养、应急能力、身体素质、心理状态都是会对载人深空探测产生重要影响。载人航天的主要难点分为以下四类：

1. 保障人员精确可靠到达、着陆地外天体并安全起飞返回地球；

2. 保障人员在长期飞行及长期驻留任务时的居住及生活环境；
3. 保障人员在地外天体的大范围机动作业；
4. 保障人员长期任务中的健康和安。全。

其中每一项都事关重大，决定着探测任务的成功与否以及完成度。在航天器自身飞向星辰大海的同时，还需要考虑人的适应性。从无人到载人，想必也将是驶向天穹的征途上，难以绕开的险峰。

## 5 结语

迄今为止，以上的构想仅仅是构想，但绝不是一纸空谈。随着航天技术的突飞猛进和科技爆炸式的发展，人类的视野甚至足迹，终有一天会到达我们曾经望而却步的彼方。纵然那时可能已是沧海桑田，人类探索未知、奋勇登攀的精神，也将遍布地球文明涉足的每一个角落。正如 Dr.Ernst Stuhlinger 给修女 Mary Jucunda 的回信中所写：

“太空探索不仅仅给人类提供一面审视自己的镜子，它还能给我们带来全新的技术，全新的挑战和进取精神，以及面对严峻现实问题时依然乐观自信的心态。我相信，人类从宇宙中学到的，充分印证了 Albert Schweitzer 那句名言：‘我忧心忡忡地看待未来，但仍满怀美好的希望。’”

## 致谢

感谢冷伟、毛竹两位老师的《宇宙宜居性：行星揭秘》课程，让我重新想起仰望星空。仰观宇宙之大，俯察品类之胜。当我将漫天星河装入浮躁的内心，一切喜怒哀乐都显得那么不值一提。

最后，我希望用16周课堂报告上未能讲出的结束语作为本文的结尾：

当我们重新审视这张《太阳系全家福》时，会注意到地球仅仅是这一个小点，大小甚至不足一个像素。

然而就是这样一个小点，承载了一切历史上存在过的人，我们认识的人，我们所爱之人。

在广袤宇宙中，地球的摇篮无比渺小，而人类的梦想却很大。我们要去探索自己有幸存在的空间，想要渡过银河的彼岸、飞向天空的尽头。

与此同时，我们将人类社会的物质、思想、科学、艺术浓缩成一张铄目的金碟，送往未知的空间，不顾一切地为璀璨的文明留下记号——至少，我们曾经来过。

我想，这或许就是“旅行者号”们“旅行的意义”。

## 参考文献

- [1] Sushil K. Atreya et al. “Deep Atmosphere Composition, Structure, Origin, and Exploration, with Particular Focus on Critical in situ Science at the Icy Giants”. In: *SPACE SCIENCE REVIEWS* 216.1 (2020). ISSN: 0038-6308. DOI: 10.1007/s11214-020-0640-8.
- [2] JJ Bertin and SW Johnson. “Access to space - Systems and technologies to support it”. In: *JOURNAL OF AEROSPACE ENGINEERING* 10.2 (1997), pp. 53–59. ISSN: 0893-1321. DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(1997)10:2(53).
- [3] Jie Cao, Guoqiang Xu, and Fan Xu. “Overview of Deep Space Exploration Space Transportation Systems and Control Technology”. In: *2014 IEEE CHINESE GUIDANCE, NAVIGATION AND CONTROL CONFERENCE (CGNCC)*. IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Yantai, PEOPLES R CHINA, AUG 08-10, 2014. IEEE Beijing Sect; IEEE; IEEE AESS Beijing Chapter; IEEE CSS Chapter, Singapore; AVIC; IEEE CSS Chapter, Nanjing, China. 2014, pp. 2433–2438. ISBN: 978-1-4799-4699-0.
- [4] Nicolas Gisin and Rob Thew. “Quantum communication”. In: *NATURE PHOTONICS* 1.3 (2007), pp. 165–171. ISSN: 1749-4885. DOI: 10.1038/nphoton.2007.22.
- [5] Chao-Yang Lu et al. “Micius quantum experiments in space”. In: *REVIEWS OF MODERN PHYSICS* 94.3 (2022). ISSN: 0034-6861. DOI: 10.1103/RevModPhys.94.035001.
- [6] R MITALAS. “EFFICIENCY OF NUCLEAR-ENERGY GENERATION BY HYDROGEN BURNING”. In: *ASTROPHYSICAL JOURNAL* 338.1, 1 (1989), pp. 308–313. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.1086/167200.

- [7] O. Mousis et al. “Scientific rationale for Uranus and Neptune in situ explorations”. In: *PLANETARY AND SPACE SCIENCE* 155.SI (2018), pp. 12–40. ISSN: 0032-0633. DOI: 10.1016/j.pss.2017.10.005.
- [8] S. A. Stern et al. “The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons”. In: *SCIENCE* 350.6258 (2015). ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.aad1815.
- [9] E TELLER et al. “SPACE PROPULSION BY FUSION IN A MAGNETIC DIPOLE”. In: *FUSION TECHNOLOGY* 22.1 (1992), pp. 82–97. ISSN: 0748-1896. DOI: 10.13182/FST92-A30057.