

# 木卫二的内部结构模型和海洋层

## —— 伽利略探测的最新研究进展

张 鸿 张承志

(南京大学天文系 南京 210093)

### 摘 要

伽利略探测获得了木卫二的最新探测资料,其更精确的重力探测数据使深入研究木卫二的内部结构成为可能。研究表明,木卫二有着比较复杂的内部结构:最外层是水冰层,中层是岩石幔,中心是金属核(Fe 或 Fe-FeS)。但重力探测数据并不能确定水冰层中水的物态。多方面的证据(如理论、地学、磁场等证据)都表明木卫二的表面冰层下存在液体的导电海洋层,其中磁场方面的证据可能最为有力,概述了对木卫二的内部结构模型和海洋层两方面的研究,并推断潮汐演化是木卫二海洋层存在的重要原因。

关键词 木卫二 — 内部结构模型 — 拉普拉斯共振 — 潮汐演化

分类号 P137.1

## 1 前 言

作为太阳系中最大的行星,木星拥有众多的卫星,其中 4 颗最大的卫星是伽利略于 1610 年发现的,被称为伽利略卫星。木卫一 (Io)、木卫二 (Europa) 和木卫三 (Ganymede) 3 颗内伽利略卫星处于拉普拉斯共振 (Laplace resonance) 状态,这是太阳系中唯一的三体共振的例子。

最初,人们对伽利略卫星的内部结构信息知之甚少。20 世纪下半期,两次大的空间探测(旅行者探测和伽利略探测)掀起了对伽利略卫星的研究高潮。旅行者探测计划始于 20 世纪 70 年代末。旅行者 1 号 (Voyager 1) 和旅行者 2 号 (Voyager 2) 分别于 1977 年 9 月和 8 月在美国佛罗里达的肯尼迪宇航发射中心发射升空。旅行者号最初的设计目的是进行近距离研究木星、土星和土星环,以及这两颗行星的大卫星。为了完成这个任务,飞船的预期寿命被设计为 5 年。旅行者 2 号于 1989 年完成了近海王星的飞行任务后,继续执行它的扩展任务 VIM (Voyager's Interstellar Mission)。旅行者探测器的主要发现是<sup>[1~4]</sup>。

国家自然科学基金“九五”重点项目 (19833010) 资助课题

特约稿 2001-09-24 收到

(1) 证实了木卫一上有活动火山存在。Morabito 等人<sup>[1]</sup>描述了首次发现的一个活动火山的喷发情况。这是人类首次在地球以外的天体上发现活动火山，也是旅行者号最惊人的发现之一。

(2) 木卫二表面有大量交叉的线性结构 (linear features)。科学家们认为这是由潮汐加热引起的内部物质运动造成的。

(3) 木卫三表面有坑状和沟状两种地形，面积各近一半。坑状地形布满环形山，与木卫四的地形类似；沟状地形中，环形山较少。说明木卫三表面的冰壳受到整体构造运动的影响。

(4) 木卫四的表面冰壳布满了陨击坑和环形山，显示木卫四表面的年代已很久远。

这些发现从侧面反映了伽利略卫星内部活动的剧烈程度。木卫一有活动火山，说明它的内部活动非常剧烈，这使得科学家们去思考木卫一如此巨大的能量从何而来？在伽利略探测以前，人们认为木卫一的能量来源可能是放射性元素的衰变或欧姆耗散<sup>[5~8]</sup>。但这些均不足以解释木卫一的巨大能量。Peale 等人<sup>[9]</sup>于 1979 年首先提出潮汐加热是木卫一最可能的能量来源。他们认为拉普拉斯共振使得伽利略卫星的受迫轨道偏心率远大于其自由轨道偏心率，此时产生的潮汐热足以融化木卫一的内部物质。Yoder<sup>[10]</sup>随后详细讨论了潮汐对伽利略卫星轨道共振的作用。他认为作用在木卫一和木星上的潮汐控制着伽利略卫星的共振构形，且潮汐产生的热量足以使得木卫一存在一个液体核。

伽利略探测计划于 1989 年正式启动，其主要目标是<sup>[11,12]</sup>：(1) 探测木星大气的化学组成和物理状态；(2) 探测木星卫星的化学组成和物理状态；(3) 探测木星的磁场。

伽利略飞船历经 6 年的长途跋涉，于 1995 年 12 月飞临木星，开始了对木星及其伽利略卫星的观测。其主要探测结果有：

(1) 自从旅行者探测以来，由于火山活动，木卫一的表面又发生了很大的变化，与旅行者号探测到的情况迥然不同<sup>[13,14]</sup>，这说明木卫一的内部活动很剧烈。

(2) 确认木卫三内部存在固有磁场<sup>[15]</sup>。观测资料表明，木卫一和木卫二也有磁场存在的迹象<sup>[16,17]</sup>。

(3) 大量证据表明木卫二的壳层下面可能存在由液态水形成的海洋层<sup>[18~21]</sup>。

对木卫三存在固有磁场，目前公认的看法是因其液体 Fe-FeS 核中的发电机制导致的<sup>[22]</sup>。而液体核很可能是历史上轨道演化中积累的潮汐能产生的<sup>[23]</sup>。

两次探测计划均对木卫二作了较多的探测。旅行者号主要探测其地形、地貌；伽利略号则获得了木卫二的高分辨照片和其存在磁场的信息。多方面的研究还表明木卫二的表层下很可能存在液态海洋层。虽然在伽利略探测之前，也有人建立过具有海洋层的木卫二模型，但并没有有力的证据。当然，要证实木卫二是否存在海洋层，最好的方法是发射一颗木卫二的轨道探测器。伽利略探测还获得了木卫二的重力场探测数据，这也为进一步深入研究伽利略卫星的内部结构提供了可能。所有这些都使得科学家们对木卫二产生了极大的兴趣。本文拟对木卫二的内部结构模型和海洋层的有关研究作一回顾。

## 2 伽利略卫星的最新参数

伽利略飞船的跟踪数据可确定伽利略卫星重力场展开式高阶项的系数，如  $C_{22}$ <sup>[24~27]</sup>。

而对于轨旋同步的伽利略卫星, 有  $J_{20} = \frac{10}{3}C_{22}$  [28]。  $J_{20}$  和  $C_{22}$  来源于卫星的自转形变和木星对卫星的潮汐形变, 其大小与卫星的内部结构有关。  $J_{20}$  和  $C_{22}$  可以用来确定无量纲的平均惯量矩  $I/mR^2$  [28]。  $I/mR^2$  反映了天体的内部物质向中心的聚集程度。对于一个均匀分布的天体,  $I/mR^2 = 0.4$ 。伽利略卫星的  $C_{22}$  和  $I/mR^2$  的值和其它一些物理参量列于表 1 中 [24~27,29]。表中,  $m$  是伽利略卫星的质量,  $R$  是平均半径,  $a$  是轨道半长径,  $e$  是轨道偏心率,  $i$  是轨道倾角,  $R_e$  是平均赤道半径,  $q = \frac{\omega^2 R_e^3}{GM}$  ( $\omega$  是自转角速度,  $M$  是木星的质量) 是伽利略卫星的形状参数,  $C_{22}$  是二阶 Stokes 系数,  $\bar{\rho}$  是平均密度,  $I/mR^2$  是无量纲的平均惯量矩。

表 1 伽利略卫星的有关参数

参数	木卫一	木卫二	木卫三	木卫四
$m/\text{kg}$	$8.9319 \times 10^{22}$	$4.7910 \times 10^{22}$	$1.4817 \times 10^{23}$	$1.0762 \times 10^{23}$
$R/\text{km}$	1818.1	1560.7	2634.1	2408.4
$a/\text{km}$	$4.216 \times 10^5$	$6.709 \times 10^5$	$1.070 \times 10^6$	$1.883 \times 10^6$
$e/10^{-3}$	4.1	10.0	0.6	7
$i/(\circ)$	0.040	0.470	0.195	0.281
$R_e/\text{km}$	1826.1	1561.3	2634.5	2408.8
$q$	$1.727 \times 10^{-3}$	$4.987 \times 10^{-4}$	$1.912 \times 10^{-4}$	$3.693 \times 10^{-5}$
$C_{22}/10^{-6}$	559	131.5	38.18	10.5
$\bar{\rho}/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.5294	3.014	1.935	1.839
$I/mR^2$	$0.378 \pm 0.007$	$0.346 \pm 0.005$	$0.3105 \pm 0.0028$	$0.359 \pm 0.005$

### 3 木卫二内部结构模型

在伽利略探测之前, 人们获得的木卫二内部结构的信息很少。最初, 认为木卫二的内部结构是薄或厚的冰层包着硅的氧化物 [30]。而伽利略探测表明木卫二可能具有一个更为复杂的结构 [26]。它的表面是水冰层, 约有 100km 厚。其中最外层是薄于 10 km 的冰层, 下面可能是液态的海洋层。水冰层下是岩石幔, 中心是金属核。

目前, 建立木卫二内部结构模型的方法主要有 3 种: Anderson 等人的方法 [24~27]、Kuskov 等人的方法 [31,32] 和我们所采用的方法 [28,33]。这 3 种方法最基本的出发点是一致的, 均是以平均密度  $\bar{\rho}$  (或质量  $m$ ) 和无量纲的平均惯量矩  $I/mR^2$  作为基本约束条件。平均密度 (或质量) 的误差是二阶无穷小量, 可以忽略不计 [31];  $I/mR^2$  的误差范围参见表 1。仅以这些约束条件建立的模型是不唯一的。这 3 种方法的不同在于: 后两种模型加上了不同的附加约束条件。

Anderson 等人 [26] 利用伽利略卫星的重力探测数据, 建立了木卫二的两层和三层模型。在其模型中, 各层的密度是均匀的。即使是最简单的两层模型, 也不可能得到唯一的解。他们的两层模型是外层的水冰层和内层岩石、铁混合的核。这种模型, 外层的水冰层至少 150km 厚, 内层的物质 (含相当数量的铁) 平均密度约  $\geq 4\text{g}/\text{cm}^3$ 。三层模型则将幔单独划分出来。最外层的水冰层为 100~300km。幔主要由岩石组成, 幔的密度在  $3.00\sim 3.80\text{g}/\text{cm}^3$  之间, 其密度上限为  $3.8\text{g}/\text{cm}^3$  [26]。核的组成有两种可能: 铁核 (Fe,  $8.00\text{g}/\text{cm}^3$ ) 或铁和硫化亚铁的混合物 (Fe-FeS,  $5.15\text{g}/\text{cm}^3$ )。铁核的半径是 468~625km, 而 Fe-FeS 核的半径在 625~1014km 之间。

伽利略飞船探测到木卫二有磁场存在的迹象<sup>[17]</sup>，这表明木卫二有金属核的可能性很大。两层模型已与实际观测不相符合。

Kuskov 等人<sup>[34,35]</sup>将他们建立月球内部结构模型的方法应用到伽利略卫星上。这种方法包括以下几个步骤：推断幔的化学组成、决定核的大小和用从观测得到的量(如  $I/mR^2$  等)估计内部的密度分布。他们将幔分成多层(一般是 5 层)，每层的密度均匀。从而可以大致知道幔中的密度分布情况。他们首次将化学组成与通常的约束条件(平均密度  $\bar{\rho}$  和  $I/mR^2$ )结合在一起建立一个自洽的模型。Kuskov 等人用  $\text{Na}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{CaO} - \text{FeO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  系统来确定幔的化学成分和密度。为此，他们编制了一个软件包 THERMOSEISM，用来计算高温、高压下的物质平衡，并详细讨论了幔的 3 种可能的物质组成：H、CM 和 CV、L 和 LL 球粒状陨石成分。对于 H 球粒状陨石成分，木卫二幔的平均密度在  $3.3 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$  之间，所允许的水冰层的厚度在  $120 \sim 150 \text{ km}$  之间，水冰层占总质量的  $7\% \sim 8.7\%$ ；对于 CM 和 CV 球粒状陨石成分，幔的平均密度在  $3.55 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$  之间，所允许的水冰层的厚度为  $140 \sim 150 \text{ km}$ ，水冰层占总质量的  $8\% \sim 8.7\%$ ；对于 L 和 LL 球粒状陨石成分，幔的平均密度在  $3.527 \sim 3.634 \text{ g/cm}^3$  之间，水冰层的厚度在  $120 \sim 140 \text{ km}$  之间，水冰层占总质量的  $7\% \sim 8\%$ 。

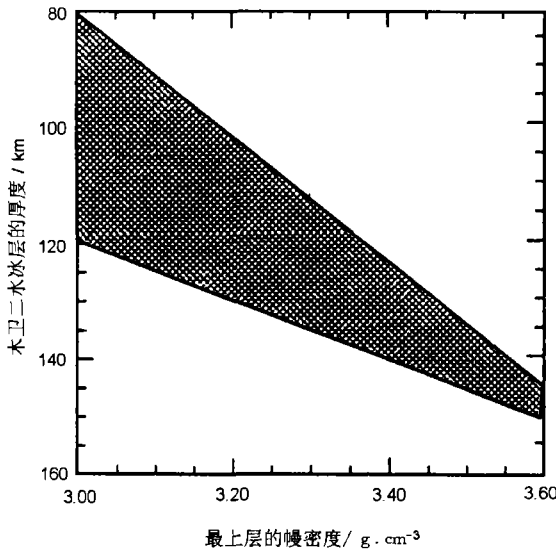


图 1 水冰层的厚度与最上层的幔密度之间的关系<sup>[32]</sup>

核幔分界面的压力连续来确定核的大小，而前两种方法是根据质量守恒来确定核的大小。其基本原理是，假定在伽利略卫星的核与幔中，静力学平衡条件均成立。则从静力学平衡方程出发，分别对核与幔建立 Emden 方程<sup>[33]</sup>。两个方程的基本形式是一致的，可写为

$$\frac{1}{r^2 \rho} \frac{d}{dr} \left( r^2 \rho^{b-2} \frac{d\rho}{dr} \right) + \frac{4\pi G}{K_0} \rho_u^b = 0. \quad (1)$$

式中， $r$  是半径， $\rho$  是密度， $G$  是万有引力常数， $\rho_u$  是无压缩 ( $p = 0$ ) 时的密度， $K_0$  和  $b$  是两个正

图 1 给出了木卫二的水冰层厚度与最上层幔密度之间的关系<sup>[32]</sup>。从图中可见，水冰层的可能厚度为  $80 \sim 150 \text{ km}$ ；且当幔的平均密度为  $3.6 \text{ g/cm}^3$  时，水冰层可取最大厚度。Kuskov 和 Kronrod<sup>[35]</sup>的计算表明，若木卫二的幔为 H、L 和 LL 成分，则 Fe-FeS 核的大小在  $610 \sim 706 \text{ km}$  之间，Fe 核的大小在  $426 \sim 499 \text{ km}$  之间；若它的幔为 CM 和 CV 成分，则 Fe-FeS 核的大小在  $440 \sim 616 \text{ km}$  之间，Fe 核的大小在  $304 \sim 434 \text{ km}$  之间。

我们曾采用 Emden 方程建立了木卫二的内部结构模型。这种方法在上述两个基本约束条件(平均密度和无量纲的平均惯量矩)的基础上，再加上静力学平衡的约束。该方法与其它方法最大的不同是利用

常数(它们确定了核或幔的体积模量和压力之间的关系<sup>[36]</sup>)。图2给出了用 Emden 方程建立内部结构模型的流程。核的方程自内向外求解, 幔的方程自外向内求解, 利用核幔分界面的压力连续来确定核的大小。这种方法同时能给出卫星的压力分布情况。表2给出了我们建立的木卫二的内部结构模型<sup>[33]</sup>。计算结果表明, 当水冰层的厚度取为 90~160 km 时, Fe-FeS 核的大小在 656~663 km 之间, 此时幔的平均密度在 3.29~3.68 g/cm<sup>3</sup> 之间; Fe 核的大小在 596km 左右, 幔的平均密度在 3.13

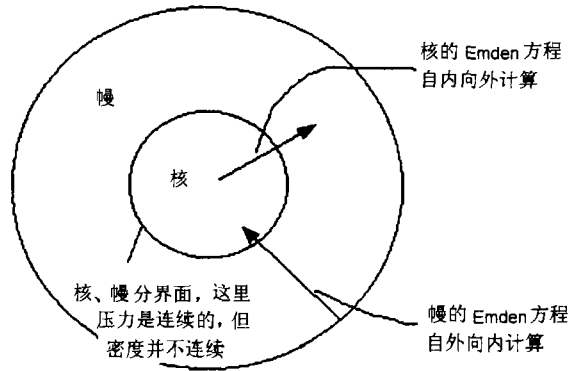


图2 Emden 方程建立内部结构模型的示意图<sup>[36]</sup>

g/cm<sup>3</sup> 左右。对 Fe-FeS 核, 木卫二的中心压力在 48.8~51 kbar 之间; 而对 Fe 核, 其中心压力可达 68kbar。

表 2 木卫二的内部结构模型

分层	参数	木卫二的模型			
		JII-01	JII-02	JII-03	JII-04
核	$\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	5.15	5.15	5.15	8.00
	$p_0/\text{kbar}$	51.0	50.0	48.8	68.0
	$R_c/\text{km}$	662.24	657.37	655.82	596.20
	$R_c/R$	0.427	0.421	0.417	0.382
	$M_c/M$	0.1301	0.1272	0.1263	0.1469
幔	$R_M/\text{km}$	1390.7	1410.7	1460.7	1460.7
	$\rho_M/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.6827	3.5547	3.2922	3.1318
	$M_M/M$	0.7712	0.7828	0.8145	0.7939
水冰层	$d_{s2}/\text{km}$	160.0	140.0	90.0	90.0
	$\rho_{s2}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.026	1.048	1.000	1.000
计算结果	$\bar{\rho}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.0139	3.0142	3.0138	3.0141
	$I/MR^2$	0.3357	0.3413	0.3532	0.3398

综上所述, 木卫二最外层是水冰层, 厚度在 80~160 km 之间较为合适。但重力探测数据并不能确定该层是液态还是固态。最近的研究表明, 木卫二的表面冰层(小于 10 km<sup>[13]</sup>)下极有可能存在海洋层。至于核的大小, 不同的方法得到的数值不尽相同。Anderson 等人建立的模型对应的核最大。一般来说, Fe-FeS 核比 Fe 核大, 但前者的中心压力比后者小。

## 4 木卫二的海洋层

伽利略探测器获得了木卫二的许多探测资料。大量的证据表明, 木卫二的表面冰层下很可能存在海洋层。

### 4.1 木卫二海洋层存在的证据

有关木卫二海洋层存在的证据很多。目前,主要的证据有 3 个方面:

首先是理论上的证据。所有伽利略卫星的近圆轨道都近似处于木星的赤道平面内。木卫二离木星的平均距离大约是木星平均半径的 9.5 倍。由于潮汐的作用,孤立的一颗伽利略卫星最终都会趋向一个近圆、轨旋同步的轨道。然而,3 颗内伽利略卫星(木卫一、木卫二和木卫三)处于拉普拉斯共振状态,它们的轨道周期相互耦合。这使得轨道根数(特别是轨道偏心率)受到共振作用的影响。受到共振影响的偏心率是受迫偏心率(表 1),而没有受到共振作用的偏心率是自由偏心率。对木卫二而言,其自由偏心率很小,只有  $10^{-5}$  [37]。椭圆轨道(即使偏率不大)也会对伽利略卫星产生潜在的影响。木星对伽利略卫星产生的潮汐的幅度和相位会随着卫星的公转而变化。变化的潮汐会在伽利略卫星内部产生相应的潮汐热,其大小取决于其距木星的距离(与  $1/a^3$  成正比)和卫星内部的潮汐耗散的程度(潮汐耗散因子  $Q$ )。放射性元素产生的热量是木卫二的另一个能量来源。但放射性产热很少,根本不能提供维持液体海洋层存在所需的能量。认为木卫二有海洋层的一个主要原因是,理论计算表明目前的潮汐耗散热能够提供维持液体海洋层存在所需的能量 [38~41]。研究表明,木卫二的潮汐耗散热范围是从  $0.7 \times 10^{11} \text{W}$  (完全固体) [42] 到  $1.6 \times 10^{12} \text{W}$  (具有冰层、海洋层和幔的模型) [40]; 而放射性元素所产生的热为  $(2.50 \sim 2.66) \times 10^{11} \text{W}$  [30]。



图 3 伽利略探测器观测到的木卫二的表面图 [43]

存在海洋层的另一方面的重要证据是地学上的 [18,20]。图 3 是伽利略探测器拍摄到的木卫二的表面构造图 [43]。从图上可以看出,木卫二的表面有许多线条状的结构。地学上的证据主要有 9 条: (1) 陨击坑的形态学证据。在木卫二的表层已知有两个大的陨击坑 Pwyll 和 Mannann'an,其直径均约 26km,它们的内圈和外圈几乎在同一水平线上。而陨击坑 Tyre 则具有多层结构。陨击坑的形态学特征表明木卫二外部圈层是弹性的或低粘度的,能够在陨击后迅速达到均衡松弛状态。(2) 透镜状结构。在木卫二表面有大量环形或椭球形的坑、穹窿和暗色斑状结构,它们大小相似(直径 7~15 km),排列有序(相隔 5~20 km),显然有相似的形成过程,应为表层之下粘性物质因浮力上升底辟(diapir,挤入褶曲)产生的。(3) 表面的冰火山,如在地形低凹地常有暗淡、光滑物质构成的影斑区,边缘清晰、与周边地带迥然有别的穹窿状透镜体等。这些特点说明木卫二在不久的过去和现在,其表层下面可能是熔融态。(4) 拉分条带的存在。在木卫二表层,经常可以观测到两条具有相同影像和形态特征的条带被稍迟形成的条带分割、位移现象,这当为新的条带在缝隙生成、地下内生物质上传充填扩张的产物。(5) 混杂区的存在。在木卫二广泛存在的暗色斑点状的混杂区中,通常包含有许多由先前脊状平原构成的多边形碎块,这些碎块相互发生了明显的位移和旋转。其间的基底物质相对于周边平原来说,或高耸或低卧。这些混杂区可能热流相对较大,局部完全发生了熔融。(6) 脊状物构造的存在。脊状构造是木卫二表层最为

常见的构造,通常几公里宽,几万公里长,最大高度可能不超过几百米。这些脊状构造经常错综复杂地交错在一起。脊状构造的成因具有多解性,如可能是由沿着裂隙的爆炸性火山活动所产生的线状角砾堆积而成,或者是由裂隙周期性裂开和闭合所产生的侧向应力导致角砾沿裂隙线性堆积而成,也有可能是原生地表物质受地下物质墙状底辟而成的。不管何种成因,都毫无疑问地显示木卫二圈层构造和地下低粘度物质的存在。(7) 表层霜露的存在。高精度(6~50m/pixel)图像显示了木卫二亮的物质和暗的物质并存。亮的物质(冰或霜)通常在高处,而暗的物质通常在低处。粒子检测仪也发现木卫二表层广泛溅射 H<sub>2</sub>O 分子;木卫二表层的暗色条常常随着时间的推移而变淡并消失。这些都表明木卫二确实存在与水有关的物质。它们可能是通过裂隙等通道由内向外喷射出来的。(8) 地形学特征。现已证明木卫二具有极度和缓的地貌特征,这充分显示其岩石圈既热又软,在地下相对较浅的地方有活动的物质,因而不可能支撑高峻的地形。(9) 全球构造证据。木卫二的全局构造有两大特征,一是非同时旋转,二是应力的昼夜变化。研究表明,木卫二的近表与其内层的旋转是不同步的,也就是说,两层之间是脱耦的。木卫二最新形成的小规模线性构造常常是定向的,并伴有显著的走滑位移,这可能是应力昼夜变化的结果。由此可知地球上的“板块构造”式的圈层结构(刚性表面和下部软流圈)和运动方式(拉分、剪开、上拱等)至少部分适用于木卫二。以上 9 个地学现象是木卫二内部存在液态海洋层最简单、最易理解的解释。但也不能排除表面冰层下存在局部或部分融化的暖且软的冰。

表 3 木卫二海洋层存在的证据<sup>[21]</sup>

研究途径	结论	存在的问题
潮汐形变和潮汐加热的理论研究	海洋层一旦形成,将保持下去	对冰的流变学参数知之甚少,特别是潮汐频率,因此推断是不确定的
表面形变的观测,特别是“混沌”区域、块体漂移、圆形山脊以及可能的低粘滞性表面流	说明冰薄且具有高度的移动性,这与下面有海洋层是不矛盾的	也可以解释为冷的、易碎的冰飘浮在厚的、温的、软的、易形变的冰上
近红外的光谱观测表明表面积聚了大量的盐	盐可能来自于“喷发”的盐水的升华	即使有水,也不必来自于海洋,亦可能是冰融化而成的
电磁感应法测定磁场	需要一个靠近表面的全局导电层,含盐的海洋层是最易接受的解释	是否可能存在其它的导电层
用高精度的测高和测重力场技术来确定潮汐的变化	能明确地确定是否有海洋层以及冰层的厚度	需要木卫二的轨道探测器

Kivelson 等人<sup>[17]</sup>在 1997 年论文中报告了木卫二有磁场存在的迹象,并用外部时变磁场中的理想导体所产生的诱导磁场模型来解释。这个模型的最大特点是没有可调参数。根据这个简单的模型,应该有如下的现象:(1) 木卫二表面的感应磁场几乎抵消垂直于其表面的外部磁场;(2) 外部磁场中影响最大的木星磁场会使得木卫二表面感应磁场以 20° 的振幅和 10h 的周期摆动;(3) 木卫二诱导磁场的强度和方向取决于它在以木星的旋转磁场定义的参考架中的瞬时位置;(4) 木卫二诱导磁场的方向会随着瞬时位置改变 180° 而反向。最近的探测数据<sup>[19]</sup>与该模型的上述推断符合得很好。现象(4)与木卫三固有磁场的行为完全不同,这确认

了木卫二的磁场是感应磁场,而不是像木卫三那样的固有磁场。Kivelson 等人<sup>[19]</sup>认为要存在诱导磁场,木卫二应该有一个靠近表面的全局导电层。最好的解释就是木卫二的表面冰层下存在导电的含盐海洋层<sup>[19]</sup>。

Stevenson<sup>[21]</sup>总结了目前所有有关木卫二海洋层存在的证据,并指出它们各自存在问题。他列了一张表来说明这些问题(见表3)。Stevenson 认为诱导磁场的发现是木卫二存在海洋层的最有力证据。

综上所述,多方面的证据表明木卫二可能有液态的海洋层存在。但要得到肯定的结论,还需要进一步探测。正如 Stevenson 所说的,最好的方法就是发射一颗木卫二的轨道探测器。

#### 4.2 潮汐演化和拉普拉斯共振

在第4.1节中,讨论了木卫二海洋层存在的证据,但海洋层的形成机制却是一个悬而未决的问题。本节将回顾伽利略卫星的潮汐演化和拉普拉斯共振俘获的研究,重点放在伽利略探测以后的研究。

在伽利略卫星的历史上,由于潮汐演化及拉普拉斯共振的俘获,伽利略卫星会有较大的轨道偏心率,从而导致较大的潮汐耗散率,因此能够积累一定的能量。拉普拉斯共振的俘获和潮汐演化已经成功解释了木卫一的内部热源、木卫三和木卫四的表面差异,以及木卫三的磁场<sup>[44]</sup>。这也有可能是木卫二海洋层形成的重要原因。

木星是太阳系中最大的行星,它对伽利略卫星的潮汐影响很大。在一个椭圆轨道上运动的轨旋同步卫星的潮汐耗散率为<sup>[45]</sup>

$$\frac{dE}{dt} = \frac{21 k_s f GM^2 n R^5 e^2}{2 Q_s a^6}. \quad (2)$$

式中,  $M$  是木星的质量,  $Q_s$  是卫星的潮汐耗散因子,  $n$  是卫星的平均轨道运动。当卫星有一个熔融的核时,因子  $f \geq 1$  被用来修正洛夫数  $k_s$ <sup>[9]</sup>。这个公式说明了潮汐耗散和轨道偏心率之间的关系:当  $e = 0$  时,不存在潮汐耗散;偏心率越大,潮汐耗散就越大。潮汐对伽利略卫星轨道半长径和偏心率的影响为<sup>[37]</sup>

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2}{3}c \left( 1 - (7D - \frac{51}{4})e^2 \right), \quad (3)$$

$$\dot{e} = -\frac{1}{3}c \left( 7D - \frac{19}{4}e \right). \quad (4)$$

其中,

$$c = \frac{9 k_J m}{2 Q_J M} \left( \frac{R_J}{a} \right)^5 n, \quad (5)$$

$$D = \frac{Q_J k_s}{Q_s k_J} \left( \frac{R}{R_J} \right)^5 \left( \frac{M}{m} \right)^2. \quad (6)$$

式中,  $k_J$  是木星的二阶洛夫数,  $Q_J$  是木星的潮汐耗散因子,  $R_J$  是木星的平均半径。则潮汐对卫星平均轨道运动的影响为

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} = -c \left( 1 - (7D - \frac{51}{4})e^2 \right). \quad (7)$$



在演化过程中, 若只考虑潮汐作用, 由上面的公式可看出: 木卫一的轨道扩张比木卫二快, 木卫二的轨道扩张比木卫三快。

伽利略卫星系统最引人注目的特点是 3 颗内伽利略卫星处于三体轨道共振状态, 它们的轨道平均运动满足如下的关系 (下标 I、E、G 分别表示木卫一、木卫二、木卫三):

$$\begin{aligned} n_I - 3n_E + 2n_G &= 0, \\ n_I - 2n_E + \tilde{\omega}_I &= 0, \\ n_I - 2n_E + \tilde{\omega}_E &= 0, \\ n_E - 2n_G + \tilde{\omega}_E &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可导出如下的平经度之间的关系:

$$\begin{aligned} \lambda_I - 3\lambda_E + 2\lambda_G &= 180^\circ, \\ \lambda_I - 2\lambda_E + \tilde{\omega}_I &= 0^\circ, \\ \lambda_I - 2\lambda_E + \tilde{\omega}_E &= 180^\circ, \\ \lambda_E - 2\lambda_G + \tilde{\omega}_E &= 0^\circ. \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $\tilde{\omega}_I$ 、 $\tilde{\omega}_E$  分别是木卫一、木卫二的近木点平经度。若定义  $\chi_1 = n_I - 2n_E$ ,  $\chi_2 = n_E - 2n_G$ , 那么拉普拉斯共振可认为是  $\chi_1$  和  $\chi_2$  之间的 1: 1 通约。  $\chi_1$ 、 $\chi_2$  的当前值为  $0.74^\circ/\text{d}$ 。

拉普拉斯共振的俘获与初始条件密切相关。Yoder 和 Peale<sup>[46]</sup> 于 1981 年首次探索了该系统历经  $j/(j+1)$  类拉普拉斯共振的演化情况。结果表明,  $j=1$  是最可能出现的情况。Malhotra<sup>[37]</sup> 采用数值的方法重新探讨了该系统向拉普拉斯共振演化的历程。由于没有作任何分析近似, Malhotra 得到了较可靠的结果。计算结果表明, 1: 2 类拉普拉斯共振仍然是最常出现的, 但在进入拉普拉斯共振前 3 颗内伽利略卫星的轨道偏心率会增大到一个很大的值, 其中木卫三的轨道偏心率最大可达 0.04。Showman 和 Malhotra<sup>[23]</sup> 扩展了初始积分条件, 并将木卫一的潮汐耗散因子视为分成两段的分段函数。他们发现, 在历经 2/1、3/2 的过程中, 3 颗内伽利略卫星会有更大的轨道偏心率。木卫三的轨道偏心率最高可达 0.08, 木卫二的轨道偏心率最大可达 0.04。若木卫二在历史上有高达 0.04 的偏心率, 根据方程 (2), 其潮汐耗散率要比现在高近一个量级 (目前木卫二的轨道偏心率为 0.0101)。这有可能解释木卫二液体海洋层的存在。但他们的研究工作主要是针对木卫三的, 计算结果明显对木卫三有利。木卫三的大偏心率可以持续很长的时间, 最长可达亿年; 而木卫二的高偏心率持续的时间要比木卫三短得多。

作为伽利略卫星重要的能量来源, 潮汐耗散是与其轨道偏心率有关的 (参见方程 (2))。木卫二目前的潮汐耗散仅能维持其液体海洋层的存在, 而不能提供海洋层形成时所需的能量。历史上的大偏心率会使木卫二获得比目前大的潮汐耗散率。如果大偏心率能持续较长的时间, 就有可能积累足够的能量产生海洋层。因此, 潮汐耗散有可能提供海洋层形成所需的能量。

## 5 结 束 语

通过上面的回顾, 可以了解到木卫二内部结构和海洋层的最新研究状况。尤其是海洋层

的存在, 更是激起了科学家们探索地外生命的热情。NASA 在其外太阳系的探测计划中将探测木卫二作为主要的任务之一<sup>[21]</sup>。

内部结构的研究与观测资料密不可分。可以预见, 在不久的将来, 随着空间探测的发展, 可以更深入地了解木卫二的内部结构。目前, 建立木卫二内部结构模型的方法多种多样, 各种方法各有优缺点。由于没有足够的约束条件, 任何一种方法都不可能得到唯一的模型。通过上面的叙述, 若能将各种方法的优点综合, 也许能获得更加符合实际情况的模型。

多种证据表明木卫二存在海洋层。但它是如何形成的, 至今还是个悬而未决的问题。由于 3 颗内伽利略卫星的轨道演化是相互影响的, 在研究其中一颗时必然也会涉及到其它两颗。如在上文提到的, 作为 Malhotra、Showman 等人研究木卫三的副产品, 木卫二的轨道偏心率在其历史上曾高达 0.04, 但持续时间很短(在他们的图上只是一个“脉冲”), 还不足以解释木卫二海洋层的形成。因此, 有必要对木卫二海洋层的形成作比较系统的研究。

### 参 考 文 献

- 1 Morabito L A, Synnott S P, Kupferman P N et al. *Science*, 1979, 204: 972
- 2 Smith B A, Soderblom L A, Ingersoll A P et al. *Science*, 1979, 204: 951
- 3 Smith B A, Soderblom L A, Beebe R et al. *Science*, 1979, 206: 927
- 4 Stone E C, Lane A L. *Science*, 1979, 206: 925
- 5 Gold T. *Science*, 1979, 206: 1071
- 6 Drobyshovski E M. *Nature*, 1979, 282: 811
- 7 Colburn D S. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 7257
- 8 Southwood D J, Kivelson M G, Walker R J et al. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 5959
- 9 Peale S J, Cassen P, Reynolds R T. *Science*, 1979, 203: 892
- 10 Yoder C F. *Nature*, 1979, 279: 767
- 11 John T V. *Space Sci. Rev.*, 1992, 60: 3
- 12 O'Neil W J. Project Galileo, paper presented at the AIAA Space Programs and Technologies Conference, Huntsville, Alabama, September, 25, 1992
- 13 McKinnon W B. *Nature*, 1997, 390: 23
- 14 McEwen A S, Belton M J S, Breneman H H et al. *Science*, 2000, 288: 1193
- 15 Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T et al. *Nature*, 1996, 384: 537
- 16 Kivelson M G, Khurana K K, Walker R J et al. *Science*, 1996, 273: 337
- 17 Kivelson M G, Khurana K K, Joy S et al. *Science*, 1997, 276: 1239
- 18 Carr M H, Belton J S B, Chapman C R et al. *Nature*, 1998, 391: 383
- 19 Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T et al. *Science*, 2000, 289: 1340
- 20 Pappalardo R T, Belton M J S, Breneman H H et al. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 24015
- 21 Stevenson D. *Science*, 2000, 289: 5483
- 22 Schubert G, Zhang K, Kivelson M G et al. *Nature*, 1996, 384: 544
- 23 Showman A P, Malhotra R. *Icarus*, 1997, 127: 93
- 24 Anderson J D, Sjogren W L, Schubert G. *Science*, 1996, 272: 709
- 25 Anderson J D, Lau E L, Sjogren W L et al. *Nature*, 1996, 384: 541
- 26 Anderson J D, Lau E L, Sjogren W L et al. *Science*, 1997, 276: 1236
- 27 Anderson J D, Schubert G, Jacobson R A et al. *Science*, 1998, 280: 1573
- 28 Zhang H, Zhang C Z. *CJAA*, 2001, 1: 275
- 29 Davies M E, Colvin T R, Oberst J et al. *Icarus*, 1998, 135: 372

- 30 Schubert G, Spohn T, Reynolds R T. In: Burns J A, Matthews M S eds. *Satellites*. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1986: 629
- 31 Kuskov O L, Kronrod V A. *Planetary and Space Science*, 2000, 48: 717
- 32 Kuskov O L, Kronrod V A. *Icarus*, 2001, 151: 204
- 33 张承志, 张鸿. *南京大学学报 (自然科学)*, 2001, 37: 38
- 34 Kuskov O L. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1997, 102: 239
- 35 Kuskov O L, Kronrod V A. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, 107: 285
- 36 Zhang C Z. *Earth, Moon, Planets*, 1992, 56: 193
- 37 Malhotra R. *Icarus*, 1991, 94: 399
- 38 Cassen P, Reynolds R T, Peale S J. *Geophys. Res. Lett.*, 1979, 6: 731
- 39 Cassen P, Peale S J, Reynolds R T. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, 7: 987
- 40 Squires S W, Reynolds R T, Cassen P M et al. *Nature*, 1983, 301: 225
- 41 Ojakangas G, Stevenson D. *Icarus*, 1989, 81: 220
- 42 Cassen P, Peale S J, Reynolds R T. In: Morrison D ed. *Satellites of Jupiter*. Tucson: Univ. Of Arizona Press, 1982: 93
- 43 Showman A P, Malhotra R. *Science*, 1999, 286: 77
- 44 Peale S J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1999, 37: 533
- 45 Peale S J, Cassen P. *Icarus*, 1978, 36: 245
- 46 Yoder C F, Peale S J. *Icarus*, 1981, 47: 1

## Internal Structure Models and Subsurface Ocean of Europa ——Recent Researches After the Galileo Mission

Zhang Hong    Zhang Chengzhi

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

### Abstract

NASA's Galileo mission to Jupiter has allowed major advances in the understanding of Jupiter's moon Europa. More precise geodetic data make it possible to study the internal structure models of Europa, which may have a complex internal structure. But a subsurface ocean can not be identified just based on the gravity field of Europa. Fortunately, the presence of the subsurface ocean can be supported by the theoretical, geological arguments and magnetic field evidence. Relevant studies on the internal structure models and the subsurface ocean of Europa are briefly described in this article. It is pointed out that the tidal evolution is the most possible explanation of the formation of the subsurface ocean of Europa.

**Key words** Europa—internal structure model—Laplace resonance—tidal evolution