

第1篇
三个世界

作为本书的第一部分,本篇的主要目的和任务是为后续所讲述的课题提供一个宏观的问题视角、理论框架和讨论平台。同时,也将所涉及的内容规范和限制在一个比较容易描述和理解的范围之内。这里所要介绍的理论框架是一个关于物理、生物和数字“三个世界”的模型。这是一个为了简化问题所提出的近似模型,对于我们所要研究讨论的问题具有较普遍的适用性和较强大的解释性。为了使所介绍的核心知识点更容易理解,我们将沿着历史时间演进的主线,讲述物理、生物和数字世界的起源、演化、进化与发展过程。正如德国哲学家恩斯特·特勒尔奇(Ernst Troeltsch, 1865—1923)所说的,“从起源中理解事物,就是从本质上理解事物”。不过关于世界构成的本源与本质问题属于哲学的范畴,深究起来恐怕会引起歧义和争议。在这里我们仅试图从“纯科学”的角度出发,尽量采用经过观察与实验验证的证据与主流的理论模型来说明与支持所阐述的论点。即便如此,所涉及的有些问题仍属于科学领域中博大精深、悬而未决的前沿课题。好在关于宇宙、地球、生物以及人类起源等方面的优秀科普书、专业教科书以及参考文献很多,读者可以根据个人兴趣志向进一步深入地系统学习和研究。本书希望通过极其简化概括的介绍,建立一个关于“物理-生物-数字”的理论框架,并以此作为我们的世界观和范式。需要提醒的是,这些关于世界的观点与范式均出自以人类为中心的动机与前提。这种动机和前提在一个更大的宇宙视角下也许是自私和局限的,但在没有发现其他智能物种之前,这也许是一种自然和合理的选择和视角。

1.1 物理世界

物理世界是指由物质与能量所组成的世界。这个世界的范围极大,可以包括整个可观测的宇宙。根据实际经验和科学常识,我们所处的世界是由各种实实在在的物质所构成的,而推动物质运动和变化的动力则是形形色色的能量。

1.1.1 物质的概念

物质是构成客观世界一切物体的材料,具有一定的结构和质量。物质的宏观形态根据构成物质微观粒子(如分子等)之间的距离,可以分为固体(如金属等)、液体(如水等)和气体(如氧气和氢气等),如图 1-1(a)所示,产生物质不同宏观形态的主要条件是所处的温度。温度越高,微观粒子之间的相对平均距离则越大,但不同的物质所对应的相变(从一种状态(如固体)到另一种状态(如液体)的变化)的温度不同。根据经典物理学,物体的质量是物体中所含物质多少的衡量,基本度量为“克”。根据牛顿的力学理论,一个物体的质量可以通过其受力和加速度之间的关系定义和测量。在同样加速度条件下,所需要的力越大,物体所包含的物质质量就越大。用此种方法定义的质量称为惯性质量。在经典物理学中,物质的质量在相对静止的条件下是一个相对稳定的常数,比如在物质转化(如化学反应)过程中,物质的总质量保持守恒(不变)。

物质的微观结构按从高到低层次是由分子、原子、电子以及原子核等构成的

[图 1-1(b)]。分子作为构成物质最高层次的粒子,一般呈电中性,是使物质保持其化学性质而单独存在的最小单元。原子在化学反应(分子结构发生变化)过程中保持不变(不可再分),是保持物质(分子)化学性质的最小微观粒子。分子是由多个原子通过化学键(如共用电子的共价键等)连接一起而形成的。它可以由相同的化学元素构成,如由两个氧原子组成的氧气分子;也可以由不同的元素构成,如由两个氢原子和一个氧原子构成的水分子。目前人类所发现的 3000 多万种分子均是由自然界中 100 多种元素的原子以不同的结合方式和空间结构组成的。原子则由原子核和围绕在它周围的电子构成。原子核还可以再分为更小的带正电的质子和不带电的中子。而中子和质子又可能是由更基本的粒子夸克组成的。分子和原子的尺寸为 $10^{-10} \sim 10^{-8}$ 米(m),而原子核的尺寸在 10^{-14} m 以下。人类对物质的认识从古希腊的原子论的猜想到近代的量子力学的发现和实验,再到现代物理学的各种大胆假说与模型,经历了由浅到深、由分立到统一的过程。这种将物质复杂的宏观现象划分为简单的微观机制的分析方法是物理学最基本也是最成功的科学方法,称为“还原法”(reductionist method)^①。

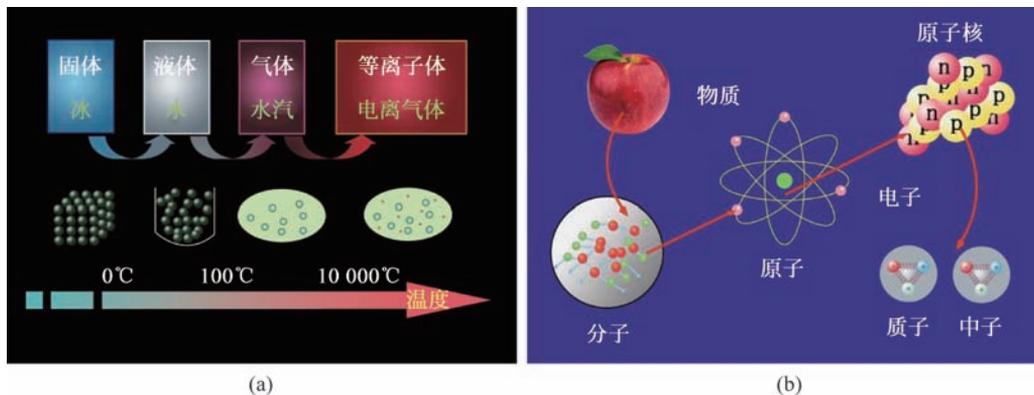


图 1-1 物质的宏观和微观结构

对于信息科学与技术来说,最重要的物质是固体材料中普遍存在的电子(electron)。电子是英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆逊(Joseph John Thomson, 1856—1940)于 1897 年在剑桥大学卡文迪什实验室发现的,是组成原子的基本粒子之一。电子具有一定的质量和电荷,其静止质量为 $9.109\ 383\ 56 \times 10^{-31}$ 千克(kg),所携带的电荷为负,电量为 1.6×10^{-19} 库仑(C)。在电场的作用下,电子可以在真空或物质材料中运动,形成电流。电子作为一种微观的基本粒子,本身所具有的物质质量和携带电量均是极其微小的,但大量电子所形成的电流却是可以观测的宏观现象,如暴雨天气中观察到的闪电和实验室中测量的电流等。数据在许多情况下都表现为电子的宏观状态如电流、电压等,或微观状态如速度、能级、自旋等。关于电子在不同材料中和条件下运动的规律和特性,读者可以在相关教材和参考书中学习和了解。正是电子在不同固体材料(如半导体与金属)中

^① 英国科学史作家吉姆·巴戈特(Jim Baggott, 1957—)的《物质是什么》(英文原名: *Mass*; 中信出版社, 2020 年)一书对此做了深入浅出、系统全面的描述和讨论,有兴趣的读者可以阅读。

由于电磁场或其他物理作用下产生的不同运动方式与特性,使它成为数据传感、显示、存储和计算的载体。

1.1.2 能量的概念

关于能量,物理学的通常定义是指物体运动转换和系统做功的度量。做功的定义是一个物体在受力的情况下运动一定距离与受力的乘积,或更确切地讲是物体受力沿运动轨迹积分的结果。所以能量是导致物质运动和变化的驱动因素。自然界中能量的形式很多,根据其性质可以分为势能、动能两大类。势能的主要特征是与位置相关,典型的势能有重力势能、弹性势能、化学势能和原子核能等。动能的主要特征是与运动相关,典型的动能有机械能、声波能、热能等。与电磁相关的能量既有电磁波所携带的动能,又有存储在电场和磁场中的势能。能量的度量单位是焦耳(J)。能量在转换过程中可以有不同形式,但总量保持不变,此现象称为能量守恒定律。

对于信息科学与技术来说,最重要的能量是电子所具有的势能和动能以及与其密切相关的电磁场与电磁波。固体物质中的电子作为一种带电荷粒子本身具有一定的势能,电子在电磁场(力)的作用下发生运动获得动能从而产生电流。我们将一个电子经过 1V 电位差(电压)加速后所获得的动能定义为电子伏特(eV),并将此作为衡量微观现象中能量的一个基本衡量单位。1eV 的能量等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$,是一个极小的能量衡量单位。

电磁波是一种承载能量的波动电磁场。电磁场是电磁力与能量的空间分布,虽然看不见摸不着,却是实实在在的客观存在。人类对电磁场的认识在很早就开始了,法国物理学家库仑(Charles-Augustin de Coulomb, 1736—1806)、法国物理学家、数学家安培(André-Marie Ampère, 1775—1836)、英国物理学家法拉第(Michael Faraday, 1791—1867)以及德国数学家、物理学家和天文学家高斯(Johann Karl Friedrich Gauss, 1777—1855)等均对电磁场理论的建立做出了开创性的贡献。但真正发现和建立电磁场理论框架并首次预见电磁波存在的却是英国数学物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)。与普通的波(如声波等)相同,电磁波具有一定的波长(或频率)和传播速度。电磁波波长范围极大,目前所知的可以从 10^{-18}m (γ 射线)到 100km(长波无线电),对应的频率范围为 $3 \times 10^{26} \text{Hz}$ (赫兹)到 $3 \times 10^3 \text{Hz}$ (图 1-2)。与我们所知的任何其他波(如声波)不同的是,电磁波(如光波)传播的速度极高,在真空中为 299 792 458m/s(约 $3 \times 10^5 \text{km/s}$)。更加有趣甚至怪异的是,这个数值只与电磁波传播的介质有关,与观察者的参照系无关! 1887 年,波兰裔美国物理学家迈克尔孙(Albert Michelson, 1852—1931)著名的干涉实验证实光速在不同惯性系和不同方向上都是相同的,是一个与参照系无关的常数。这无疑是一个违反直觉和常识的结论,却成为近代物理学的基本理论基石之一。正是基于这个实验观测,犹太裔物理学家阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein, 1878—1955)在 1905 年建立狭义相对论时认为光速是绝对的,光速至今仍被认为是宇宙间物质与能量运动和传输的最高速度。根据狭义相对论,时间与空间均是参照系的相对速度相关的物理量,不再是绝对不变的,这引发了一个非常有意思的物理现象,即“同

时性的相对性”，如一位乘坐接近光速宇宙飞船的宇航员父亲在执行完任务回到地球后却比一直待在地球上的儿子更年轻。关于电磁波在不同材料和环境中运动的规律和特性，读者可以在相关的教科书和参考书中学习和了解。在这里要强调的是，电磁波作为一种能量的载体，可以在介质（如空气和固体材料等）中以极高但有限的固定速度传播。正是电磁场的不同特性（如波长、强度、极化和角动量）和状态，使其成为数据（信息）传输、传感等的最佳载体。

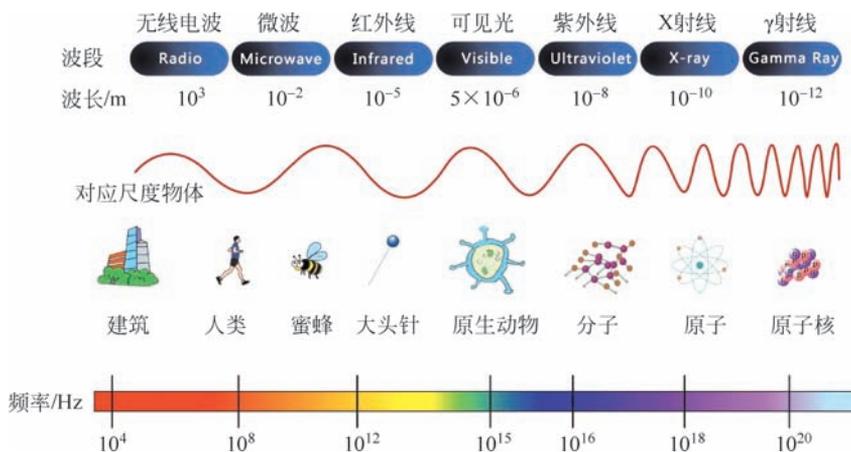


图 1-2 电磁波的波谱

作为物质形式的电子、电流和能量形式的波动电磁场之间存在着密切的联系。运动的电子（电流）是产生电磁场的发射源，而电磁场是导致电子运动的驱动力。电子与电磁波作为数据存在和运动的载体，构成了现代信息科学与技术的物理基础，也是数据、信息器件和系统设计、运行所遵循的自然规律。从这个意义上讲，信息科学与技术基础的本质是电子学和电磁学。对此，从事信息领域的学生和专业人员均需要有充分的认识和重视。

在不同能量的类型中，与我们日常生活经验密切相关却又相当诡秘的是热能。热能是一种存在于物体内部的能量，与物体中微观粒子（分子、原子、电子）的运动状态相关。产生热能的微观物理机制源于构成物体的微观粒子处于永恒的热运动状态。虽然单个粒子的运动是无序的，但大量粒子的运动遵循物理学统计规律，导致所构成的系统（物体）的宏观特性（如体积、压力、温度）在宏观状态下具有有序性和稳定性。其中温度是衡量微观粒子存储热能密度的物理参数，与粒子动能或速度的系统平均值相关。温度越高，粒子存储热能的密度越高，对应的平均速率越高。换一个角度，“温度”也是物体中决定粒子在不同能级分布的物理参数。温度越高，处于高能级状态的粒子则越多。近代物理对产生热能的微观物理机制不断有新的认识，发现产生和决定热能的是围绕原子核电子的运动方式和行为。既然如此，一定会存在一个最低的绝对极限温度，在此绝对零度（摄氏温度 -273°C ）下，微观粒子趋于“静止”状态或处于最低的能级。“热量”则是描述物体中热能流动或传递的物理量，本质上是由于物体内部不同系统（区域）温度差而导致的

能量转化过程中所做的功或传递的热能,即热量等于流动的热能。

热能与热量除了遵守能量守恒定律(也称为热力学第一定律)之外,还遵守另外一个普遍的物理定律,即热力学第二定律(图 1-3)。这个定律是建立在热量总是从温度高的系统向温度低的系统单向流动这一普遍观察基础上的。从微观的视角,系统的微观状态是无序的。温度越高,不仅粒子的平均速度越高,并且不同粒子速度的统计分布范围也越宽,这意味着微观状态的不确定性越高。有趣的是,如果我们对系统的微观状态做统计分析,就会发现最无序的状态却是出现概率(可能性)最大的状态!这听起来有些不可思议,为什么物理系统总是趋向于更加无序的状态呢?

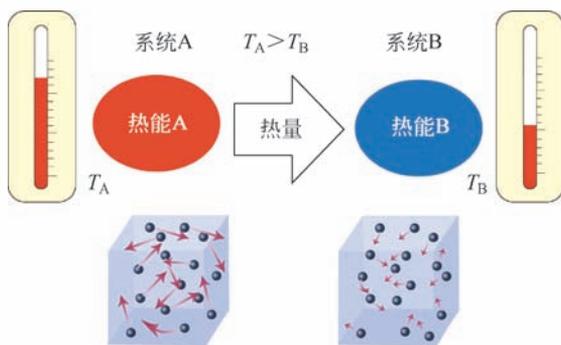


图 1-3 热能、热量与温度的关系

虽然能量从一种形式(如势能)到另一种形式(如动能)转化的过程中其总量不变,但在能量转化过程中总会有一部分能量转化为不可利用的“损耗”即热能,在物理上定义为“熵”(entropy)。物质与能量的运动与变化所遵循的热力学第二定律可以表述为:一个封闭系统的熵随着时间总是增加的。这意味着能量转换过程是不可逆的,每次转换总会伴随一定的能量变为不可利用的熵。能量转化越多、越快,所产生的熵则越大。熵所代表的能量的主要特征是所对应物质的微观状态数即“混乱度”。熵越高,物质的状态数或无序性便越高。这好像与我们通常的主观愿望相悖,却是宇宙中普遍适用和不可违抗的客观规律。理论上讲,物质宏观状态总是倾向于从有序到无序的规律与时间的单向性指向是一致的,也可以作为时间单向性的一种注释。在实际中,转为热能的能量不仅降低了能量的利用效率,也会引起物质温度升高,从而影响相关系统的性能。对于数据(信息)系统来讲,能量效率和热量管理是工程设计和科学研究的重要领域,也是最终限制技术和系统性能的物理极限。对此,我们将在第 2 篇“数据法则”中做进一步探讨。

1.1.3 波粒二象性

根据经典电磁波理论,电磁场(包括光)是一种波动,传统的麦克斯韦方程可以成功解释电磁波的传播、辐射、衍射、散射等波动现象。1887年,德国物理学家赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)发现了一种奇特的光电效应。他将光投射到金属表面,观察

到由光波导致产生的电流。测量电流的结果却发现电流与光的频率相关。只有频率高于某个阈值时,电流才产生。这个现象无法用经典的波动理论解释。1905年,年轻的爱因斯坦发表了《关于光的产生和转化的一个试探性观点》的论文,认为光束不是连续的波动,而是一群离散的光子。爱因斯坦认为,只有光子的频率大于某个阈值才能拥有足够能量使得电子逃逸,造成光电效应,于是解释了为什么光电子的产生条件只与照明光的频率有关,而与强度无关的实验现象。这种新的理论在当时受到主流学术界的强烈反对。直到14年后,他才因为“对理论物理学的成就,特别是光电效应定律的发现”而荣获1921年诺贝尔物理学奖。

经典的电磁理论强调其波动性,其运动规律遵循麦克斯韦方程。量子理论则认为电磁波是一种能量不连续的“粒子”(光子),其(静止)质量为零,所携带的最小能量与其波长有关,为 $E=hc/\lambda$ 。其中, c 为光速, λ 为波长, h 为普朗克常数(等于 $6.63\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$)。普朗克常数是物理学中极其重要的标志性参数,是区分经典与量子物理现象与模型的衡量尺度因子。单个电磁“粒子”的能量与其波长呈反比,波长越短,能量越高;相反,波长越长,能量越低。从本质上讲,电磁波应该是一种具有波动性的“粒子”,只是这种粒子特性在人类所接触和熟悉的电磁波的波段和能量范围内被淹没了,从而只显现出波动的特性。所以,电磁波本质上更像一种“粒子”,但在实际应用中,对这种粒子的测量却常常只看到它“波动”特性的一面。如图1-4所示,如果我们用能量(纵轴)和空间(横轴)尺度这两个维度来观察电磁场,就会发现在给定波长前提下,当电磁场的能量低于一定阈值(一般是相当于几个光子的能量)时,它的粒子性将会显现,其运动行为才满足量子化的麦克斯韦方程,即光的量子理论。高于此阈值,电磁场呈现波动性,满足经典麦克斯韦方程,即光的经典理论。所以,电磁波的粒子性和波动性的呈现条件与它携带的总能量相关,即单光子能量乘以总光子数。人类视觉感官能够接收的电磁波(可见光)光子的能量为 $1.62\sim 3.11\text{eV}$,所以电磁波的粒子性对于所观察和体验的宏观电磁现象来讲可以忽略不计。

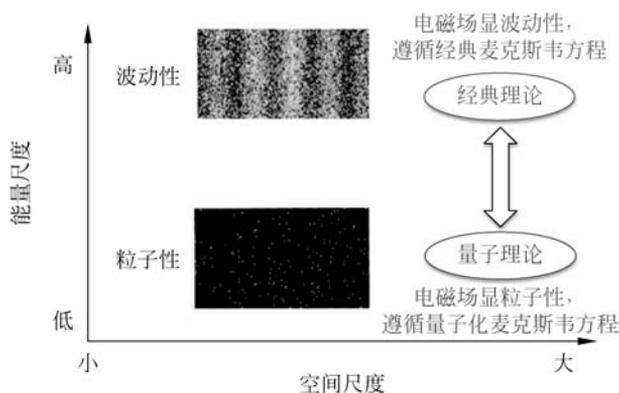


图 1-4 电磁场的波动性和粒子性

根据经典理论,电子是一种粒子,传统的牛顿方程可以成功解释电子在电磁场作用下的运动现象。1923年,法国物理学家路易·德布罗意(Louis de Broglie,1892—1987)

在他的博士论文中提出了物质波的概念,认为基本粒子(如电子)也具有波动的特性,并建立了波动和粒子的关系,即著名的“波粒二象性”公式。与爱因斯坦发现并提出光量子的“从实验现象到理论模型”的过程相反,德布罗意的物质波发现和理论却是“从理论模型到实验验证”的过程。他的导师、著名物理学家保罗·朗之万(Paul Langevin,1872—1946)对此研究结果半信半疑,向爱因斯坦请教,得到了认可。四年后,德布罗意的物质波假说通过电子衍射实验得到了证实,他因此于1929年获得诺贝尔物理学奖。1926年,奥地利物理学家埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger,1887—1961)又提出了电子波所遵循的波动方程,即著名的薛定谔方程,从而奠定了量子理论的基础,并于1933年获得诺贝尔物理学奖。根据量子理论,电子的行为本质上是一种随机存在和运动的物质波,其波长为 $\lambda=h/mv$,其中 h 为普朗克常数, m 为电子的质量, v 为电子的速度。电子的运动规律遵循薛定谔波动方程,可以用一种概率波的方式描述,只能给出电子在空间不同位置出现的概率分布。但在实际应用中,对这种波动的测量却常常只看到它“粒子”特性的一面。电子的波长很短,在金属中约为 $0.1\text{nm}(10^{-10}\text{m})$ 。电子能够不因散射而丧失相干性所能运动的平均距离称为电子自由程,在金属中约为 1nm ,在自由程之内的电子可以保持其波动性。但超出了这个范围,电子在固体中因不断经历散射而“失相”,丧失了波动所具有的相位信息(相干性)而显现出经典的粒子性。如图1-5所示,如果我们用能量(纵轴)和空间(横轴)尺度这两个维度来观察电子,则会发现在电子所处的空间的尺寸小于一定阈值即电子自由程时,其波动性才会显现。若高于此阈值,电子将丧失其波动性而呈现粒子性,运动规律满足经典的牛顿方程。对于典型的固体材料来讲,这个空间阈值在纳米量级。所以,电子的粒子性和波动性仅与所受限的空间大小相关,而与所拥有的能量高低无关。

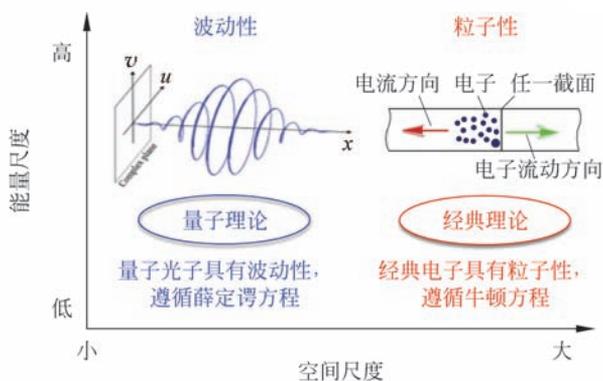


图 1-5 电子的粒子性和波动性

电子和电磁场这些微观的“量子”效应一方面可能是所对应的纳米电子器件和量子光电器件的工作“极限”,也可能被用来发明新的技术,如纳米晶体管、量子计算、量子通信等。对电子和电磁场量子效应的研究和应用是目前信息技术发展的前沿和最具潜力的领域和方向之一。

1.1.4 物质与能量的关系

物质与能量可以当作物理世界的两类“独立”元素来对待。根据经典牛顿力学的理论,物体的质量和能量是两个相互独立的物理量。后来,爱因斯坦建立了更加普遍的狭义相对论,发现质量与能量是可以相互转换的,如图 1-6 中的式(1)所示,其中 m 代表物体运动时的质量, m_0 为物体静止时的质量, v 为物体运动的速率, c 为光的速率。这个公式说明随着速度 v 增加,物体的动能开始转化为质量,从而导致物体的质量增加。若速度接近光速($v \rightarrow c$),则任何物体的质量均趋向于无穷大($m \rightarrow \infty$)。这也说明光速是物体运动速度不可超过的极限。另外,根据爱因斯坦著名的质能公式,能量等于质量乘以光速的平方($E=mc^2$),如图 1-6 中式(2)所示。质能公式如此简单,却包含了极其深奥的科学内涵和普遍的应用范畴。它说明即使处于静止状态的物质也含有巨大的能量,并建立了质量与能量的等价关系,表明质量也可以转化为能量。如热核聚变就是在高温与高压条件下将物质中的部分质量转化为巨大能量的典型例子。反过来根据同一公式,能量也可以转化为质量。如波长极短、能量极高的光子(电磁波)也可以转化为物质(如氢原子核等)。虽然这些遵循爱因斯坦狭义相对论的物理现象是千真万确的,但在人类生活环境的实际情况中却极难、极少发生。这是因为光速远远大于人类所创造和体验的任何物体的运动速度。即便美国研制的宇宙飞船“旅行者”(Voyager)的速度也才达到 17.2km/s,仅为光速的 0.0057%。所以对大多数实际应用的场景,由于实际速度远小于光速,所以式(1)所得出的结果为物体运动质量与静止质量基本相同($m \approx m_0$),爱因斯坦与伽利略-牛顿力学所得出的结论是一致的。另外,人们日常遇到的光子波长(如太阳光)一般比较长(可见光或红外电磁波等),所对应的能量极小,也无法通过核聚变产生新的物质。所以,物质与能量两者的相互关系在我们大多数讨论的情况下完全可以忽略不计,物质与能量作为独立变量的假设是成立的。



图 1-6 物质与能量的概念与关系

物质与能量的存在、运动与变化均是在一个“四维”时空(一维时间、三维空间)中发生的。空间决定并衡量物质和能量占据的领域及位置,而时间决定并衡量物质与能量的变化及顺序。牛顿的经典力学认为空间和时间是绝对的和独立的,相互无关且不依赖于任何物质与能量。后来,爱因斯坦的狭义相对论则证明在光速不变的基本假设之下,时间与空间是相对的,取决于观察者所处的参照系,并且是相互关联的。广义相对论进一步揭示了当物体质量足够大时,时空在引力的作用下将发生弯曲。所以,物体的质量和所产生的引力(即能量)与时空是相关的。当引力趋向于无穷大时,空间将坍缩为一个奇

异点(黑洞),时间则被凝固。另外,经典的理论认为空间和时间均是连续的,我们可以确定和描述在任意小的空间和时间范围内的物质和能量。而量子力学却发现空间与时间是不连续的,我们无法完全确定和描述小于 10^{-37} m(普朗克距离)的空间和 10^{-43} s(普朗克时间)的时间范围内所发生的事情。最后,我们所了解的物理模型中,时间是双向和可逆的。但在现实中,时间却是单向和不可逆的。时间的单向不可逆性是长期以来令人困惑和引人思考的重大基础课题,可以通过热力学第二定律加以解释和理解。

1.1.5 宇宙的起源

那么我们所熟悉和赖以生存的物质与能量又是如何而来的呢?近代物理学所产生的最令人惊讶的理论之一是宇宙的“大爆炸”模型(big bang theory),如图 1-7 所示。

1929 年美国天文学家哈勃(Edwin Powell Hubble, 1889—1953)发现离我们越远的星系正在以越快的速度远离我们,这说明整个宇宙空间在膨胀。通过广义相对论将宇宙的膨胀进行时间反演,则可以推测出我们所熟悉的四维物理世界(宇宙)在距今约 138 亿年[(137.98±0.37)亿年]前起源于一个密度和温度无限高的“奇点”。对奇点所包含“无穷大”的真正含义以及在宇宙起始时刻(即 10^{-43} s 或普朗克时间内)所发生的事情,我们也许永远不能完全确定。我们不能将宇宙起源于奇点简单理解为一个从无到有的过程。这

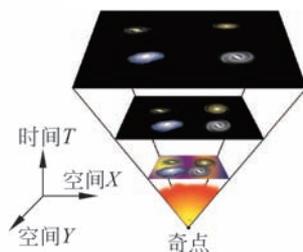


图 1-7 宇宙演化示意图
(图片来源: Wikipedia)

里的“无”严格意义上是反映了我们主观世界对此客观世界问题认识的空白和缺乏,而不是客观世界本身的虚无。目前可以确定的是,宇宙空间在 10^{-36} s 内暴胀了 10^{56} 倍(1 后面 56 个 0)! 宇宙形成的初期,极高密度的能量以极短波长的光子(电磁辐射)形式存在,并由此产生了最原始的电子(带有一个负电荷)、质子(带有一个正电荷)、中子(不带电)和最简单的原子核(氢元素)。直到大爆炸后约 30 万年,电子才开始凝聚在原子核周围形成了中性的原子氢(约占 75%)、氦(约占 25%)和锂(不足 1%)。随着宇宙不断膨胀和降温,在引力的作用下,星云、恒星和星系等天体结构逐渐形成。在恒星形成过程中,以氢为燃料的核聚变所产生的巨大能量和压力在恒星内部又产生了更复杂的原子核和更重的元素,如碳、氧、镁、硅、铁。以高度稳定的铁原子核为核心的超级恒星无法继续进行核聚变,于是在不断增大的引力作用下发生坍缩。这种超新星在爆炸过程中产生的巨大力量将原有的原子核打碎并重组形成比铁更重的 90 多种元素,如铜、锌、金、铂、铀、钍等,并将这些物质洒向宇宙空间,形成了新的星云并产生了打造新恒星和行星的材料。所以,构成物理世界的基本元素是在宇宙大爆炸后由奇点中所包含的能量在约 90 亿年波澜壮阔的热核聚变过程中锤炼出来的。有趣的是,这个基于近代物理学模型的描述与两千多年前中国哲学家老子在《道德经》所讲的“无名,天地之始;有名,万物之母”竟然不谋而合。

1.1.6 地球的形成

对于人类来讲,宇宙演化过程中最重要的事件是太阳系星球,特别是恒星太阳、行星地球以及卫星月亮的形成(图 1-8 左图)。约 46 亿年前,在具有数千亿恒星的银河系中一个微不足道的角落,可能是由一次超新星爆发所产生的冲击波引起的星云引力坍缩,产生了太阳系。太阳本身获得了星云中 99.8% 的质量,其中 71% 是氢,27% 是氦。早期太阳系中其余的物质围绕太阳形成了一个圆盘,在引力的作用下相互碰撞并黏附聚集形成了太阳系行星。距太阳较远的吸收了剩余的氢和氦形成气态巨行星,即木星、土星、天王星、海王星,而距离太阳较近的太阳风将气体吹散留下仅占初始星云质量 0.6% 的重元素组成较小的固体岩石行星,即水星、金星、地球和火星。

在太阳的核心极高的温度(约 1500 万 $^{\circ}\text{C}$)和压力(约 3000 亿大气压)下,持续发生氢变为氦的核聚变(图 1-8 右图)。图 1-8 右图为太阳动力学观测台于 2012 年 7 月 12 日东部夏季时间 00 点 45 分在 30.4nm 波长段拍摄到的图片,成色为红色,显示温度为 50 000K。太阳每秒将 6.2 亿 t 氢转化为氦,其中 0.7% 的质量转化为 3.828×10^{26} J 能量。这相当于 910 亿颗 100 万 t TNT 当量级的氢弹爆炸或 1.3 亿亿 t 煤燃烧所产生的能量! 这些在 70 万 km 深处的太阳核心产生的高能光子(γ 射线和 X 射线)需要经过数千亿年才最终转化为低能量的可见光达到太阳表面。虽然太阳拥有大量的氢,但也是有限的。太阳的寿命在 100 亿年左右,目前已经度过一半的岁月。当太阳消耗所拥有的氢之后,产生能量的核聚变将很难发生。燃料耗尽的太阳会坍缩为一颗白矮星,白矮星会在漫长的宇宙岁月中逐渐冷却,最终成为一颗黑矮星。

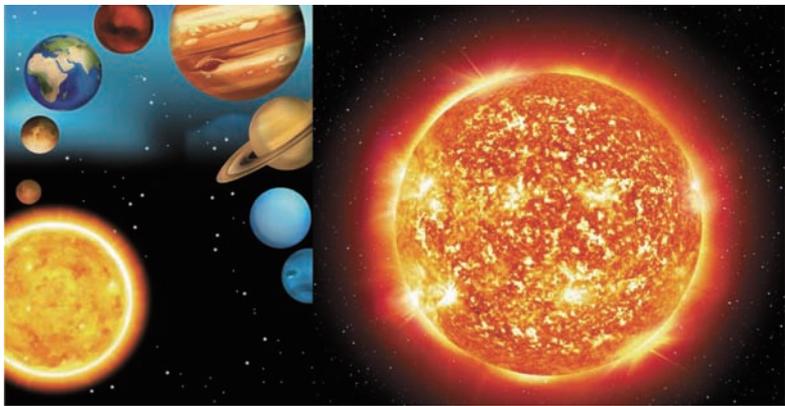


图 1-8 太阳系的形成与太阳

与太阳不同,地球约 90% 的物质是氧、硅、铝和铁。在形成之初,地球是一个炽热的岩浆球,物质以液体形式不断流动,铁、镍等较重的元素下沉到地球中心形成地核。地核创造了笼罩整个地球的磁场,使其免受太阳风的伤害。而氧、硅、镁、铝等较轻的元素则上浮到外层构成了地幔和地壳。随着地球温度下降,地壳的外层冷却凝固形成了坚硬的

岩石。地幔灼热的岩石则继续缓缓流动,推动地壳不断分离合并形成了山脉和峡谷。岩浆溶解产生的气体释放出氮气、二氧化碳和水等组成了大气层。随着温度降低,大气中的水迅速凝结以暴雨的形式落回到地面。暴雨持续了数百万年之久,直到液态水覆盖了70%以上的地表形成了海洋(图1-9)。正是太阳所提供的能量资源与地球所具备的物质环境的结合,为在这个美丽星球上最终孕育出神奇的生命提供了独特的环境和条件。

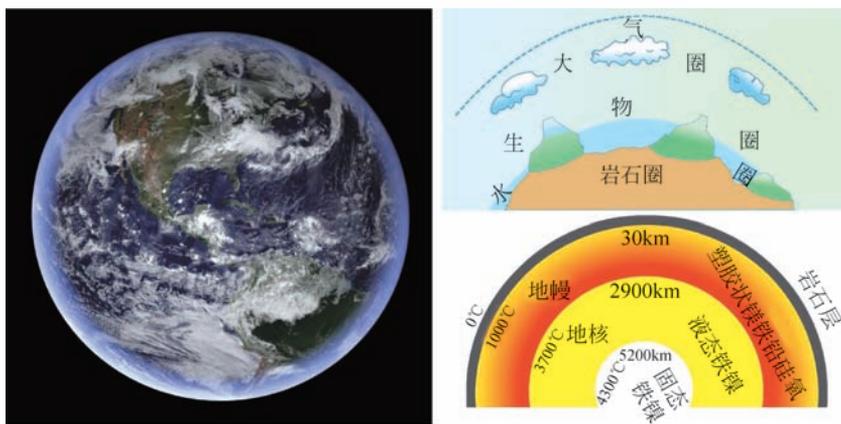


图 1-9 地球的外貌与内部结构

1.1.7 宇宙的熵增

宇宙进化的过程从“无”到“有”、从“简单”到“复杂”,能量与物质不断运动和变化。能量在空间流动,不仅通过核聚变产生不同的物质,也在不同的形式之间转化。宇宙物质与能量运动与变化遵循热力学第二定律,所以宇宙的熵随着时间总是增加的[图1-10(a)]。这意味着能量转换过程是不可逆的,每次转换总会伴随一定的能量变为不可利用的熵。能量转化越多、越快,所产生的熵越大。熵所代表的能量的主要特征是对应物质的微观状态数或者混乱度。能量转换会让系统的混乱度增加,熵就是系统的混乱度。熵越高,物质的状态数或无序性便越高。物质宏观状态总是倾向于由有序到无序的规律与时间的单向性指向是一致的,也可以作为时间单向性的一种注释。宇宙自大爆炸以来的熵估计已经增加了约 10^{12} 倍!

需要指出的是,关于宇宙熵的本质与构成问题,目前学术界仍有许多不同的观点。对充满宇宙的微波辐射的分析表明宇宙的熵似乎变化很少,无法解释宇宙整体熵增的趋势。研究表明,宇宙熵增的主要原因竟是由于演化过程中黑洞的出现。黑洞所吞噬的物质质量巨大,所对应的熵也巨大。如处于银河系中心的黑洞 Sagittarius A* 具有太阳400万倍的质量,对应的熵则是宇宙大爆炸时熵的1000倍!根据现代物理学模型的预测,宇宙演化过程中黑洞不断增加,最终将会被黑洞吞噬。那时(10^{100} 年后)宇宙中黑洞的熵将比今天增加 10^{20} 倍,之后将不再增加。那时的宇宙将变得无比寂静和黑暗

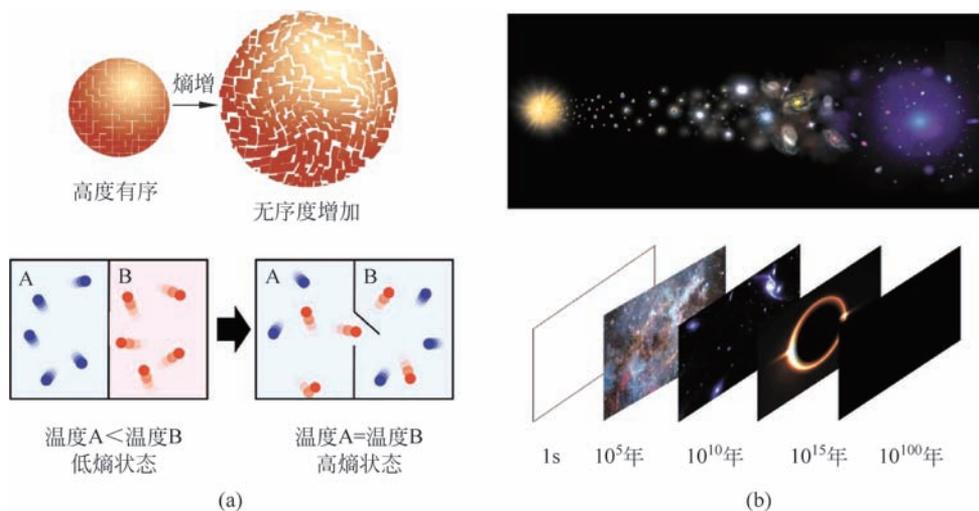


图 1-10 宇宙演化过程中熵的增加

[图 1-10(b)]. 关于宇宙起源于奇点(黑洞?)而最终消失于黑洞(奇点?)的理论和预言似乎描述了一个从无到有、从有到无的循环过程。对于这个过程中的观察者(人类)来讲,这又好像是一个从无知到有知,最终又回到无知的大循环。

1.2 生物世界

1.2.1 生命的概念

在宇宙进化过程中,在一个极其渺小的星球上发生了一件看起来概率极小的事件,那就是太阳系中地球上约 45 亿年前生命的诞生与进化。在整体持续熵增的宇宙中,在一定的条件下,在局部区域和有限时间内,有可能发生物质系统熵减的现象,即系统在由简单到复杂的过程中实现了从无序到有序的进化。这种现象最典型的例子就是生命。在宇宙整体永恒熵增的大趋势下,是什么神奇的力量赋予了生命这种局部暂时的熵减现象,目前还没有很好的解释。虽然现实中我们很容易区分和描述生命和非生命现象,但要给出一个关于生命的全面而严格的定义却是一件很难的事情。物理学家埃尔温·薛定谔认为生命是一个具有抗拒自然趋向无序的自组织物理系统。化学家杰拉德·乔伊斯(Gerald Joyce, 1963—)则认为生命是一个在达尔文进化过程中能够自我持续的化学系统。生物信息学家伯纳德·科热尼奥夫斯基(Bernard Korzeniewski, 1964—)认为生命是由一个具有反馈机制的信息网络构成的。根据维基百科(Wikipedia)的解释,生命泛指一类具有稳定的物质和能量代谢现象并且能回应刺激、能进行自我复制(繁殖)的半开放物质系统。生命个体经历出生、成长、衰老和死亡,生命种群在个体一代代更替中经过自然选择发生进化以适应环境。

1.2.2 生物圈

由具有生命的物体所组成的系统被称为生物世界或生物圈。生物世界中生物种类与形态繁多,包括各种不同的动物、植物和微生物,其中微生物又可以包括细菌、真菌、原生生物、微藻和病毒等,如图 1-11(a)、(b)所示。根据加拿大生物学家 2011 年所发表的研究结果,地球上存在约 870 万个物种(正负误差约为 130 万),包括约 777 万种动物、30 万种植物、61 万种真菌、3.64 万种原生生物和 2.75 万种微藻^①。关于地球“生物量”(即某一时刻单位面积内对应生物有机物质的重量,包括生物体内所存食物的重量)的相对比例,以色列科学家 2018 年发表的最新研究表明地球上所有生命的组成中,植物占 82%、细菌占 13%,其余 5% 为其他全部生物。相比之下,人类仅占地球生物量的 0.01%!这些生物的 86% 生活在陆地,13% 是地表下的细菌,1% 存在于海洋之中^②。

无论从哪个角度和层次来衡量,生物世界及生物体均是极其复杂的动态半开放系统。采取“还原法”可以将生物世界的结构从宏观到微观划分为若干的层次。一种常用的分层模型为[图 1-11(c)]:生物圈(biosphere)、生态(ecosystem)、部落(community)、种群(population)、个体(organism)、系统(organ system)、器官(organ)、组织(tissue)、细胞(cell)、细胞器(organelle)、分子(molecule)、原子(atom)。这样一个分层模型将生物世界的复杂问题划分和简化分为不同学科所关注和聚焦的问题。生态学只关注个体以上的层次,即种群、部落和生态体系;生理学通常只研究细胞以上的结构,如组织、器官等;细胞学研究各种生物分子,将之视为细胞的结构和功能材料;生物化学聚焦生物分子的结构与功能等。在不同的层次,组成生命载体的物质元素的尺寸越小,涉及的范围越小,则运动的速度越快,动态的程度也越高。

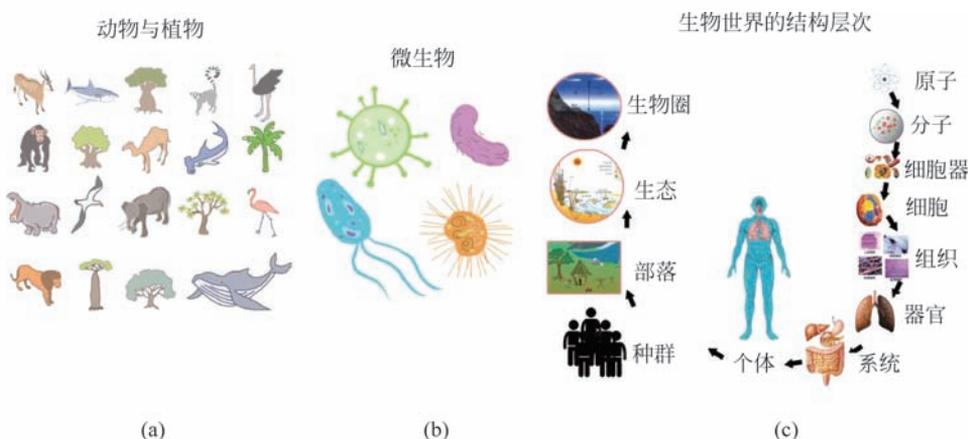


图 1-11 生物世界的生物种类

① Mora C, et al. How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? [J]. PLoS Biology, 2011, 9(8).

② Baron Y M, et al. The Biomass Distribution on Earth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115 (25): 6506-6511.

在宏观层次,生物圈是地球上所有的生物以及生存环境的总和,是宇宙中目前已知最大和唯一的生物生态体系。它处于地球的一个外层圈,范围为海平面上下垂直约10km[图 1-12(a)]。地球生物圈是一个能量开放但物质封闭的系统,能量的来源主要是太阳的电磁辐射。接收到太阳辐射的植物通过光合作用将二氧化碳和水转化为葡萄糖和氧气。植物作为生态系统中食物(承载能量的有机物)生产者,供生物圈中其他的成员(如动物)消费。这些食草动物又可能成为食肉动物的食物,将所存储的能量传递给食肉动物,而根据在食物链中所处的地位不同,这些食肉动物有可能成为更高层食肉动物的能量来源。同时,植物和动物的尸体腐烂降解之后又成为植物和细菌的养分。能量在生物圈中的生物体之间以有机物的形式转化过程中,部分能量转变为热能损失掉了[图 1-12(b)]。所以,地球生物圈的能量流动是单向的且效率逐级递减,维持生命复杂系统的有序性需要大量能量源源不断地供应,同时也在生物圈中以热的形式产生了大量的熵。维持生命所需要的物质(如水、氧气、二氧化碳、磷、硫等)则在太阳能量的驱动下,在封闭的生态体系中反复循环。正是能量和物质的流动转化、相互依赖与作用,为地球上的生命提供了生存和发展的动力和源泉。

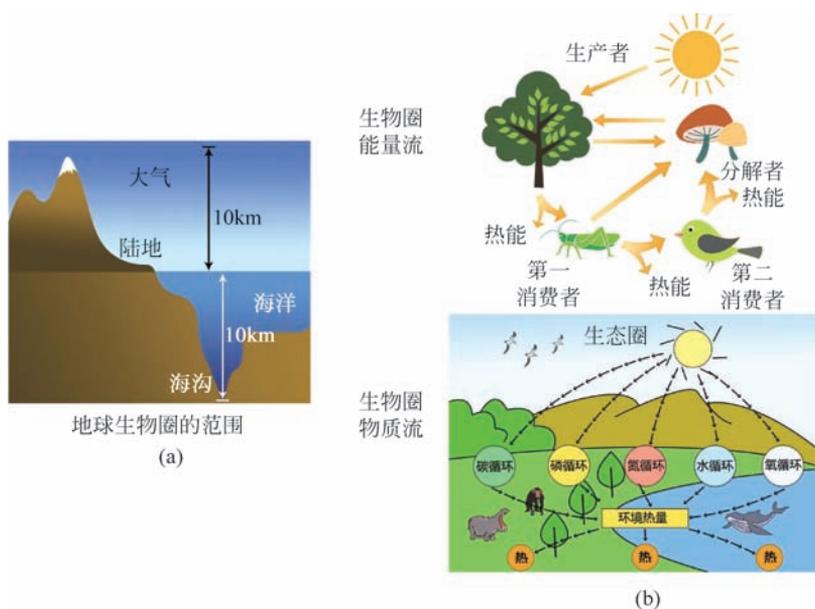


图 1-12 生物世界的生物圈

1.2.3 细胞

在微观层次,细胞是所有生物体形态结构和生命活动的基本单位。细胞在生物体内相对独立却又相互协同配合,组建成高度复杂且有序的组织器官有机体。细胞通过增殖、分化、运动、变异、衰老、死亡等实现其基本生命活动。细胞因功能不同,具有不同的尺寸和形状。如在血液中输送氧气的红细胞平均直径为 $7\mu\text{m}$ (微米),呈圆盘状,很容易

在血液中运动[图 1-13(a)上图];肌细胞呈长条纤维状,其长度从数毫米到十厘米不等,宽度则为 $10\sim 100\mu\text{m}$,具有收缩功能[图 1-13(a)上图]。神经细胞由细胞体和神经突两部分构成,神经突与其他神经元连接,通过接收、整合、传导和输出信息实现信息交换[图 1-13(a)下图]。人体内有 200 多种不同类型的细胞,分别负责不同的组织结构和生理功能。根据最新的研究,人体有总共 30 万亿~40 万亿(37.2 万亿 ± 0.81 万亿)个细胞;同时还有同样或更多数量(38 万亿或更多)的单细胞微生物(包括细菌、真菌、病毒等)寄生在人体内,负责免疫、营养等功能。所以人体就是一个由自身和共生微生物细胞组成的巨大生态体系。

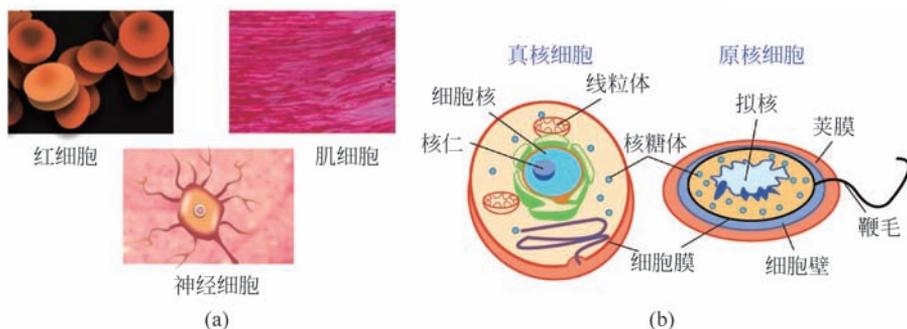


图 1-13 生物细胞的种类和结构

生物界的生物一般由两种细胞构成:原核细胞与真核细胞[图 1-13(b)]。前者对应的特征生物是细菌和古菌,后者是组成植物和动物的基本元素。原核细胞相对体积较小,没有细胞器和细胞核。它具有简单环状的染色体,所含基因数量较少。真核细胞相对体积大,具有细胞器和细胞核,具有复杂线状染色体,所包含的基因数量较多。所有的细胞均具有细胞膜。细胞膜具有双重功能,一方面将细胞内部与外部环境隔离,对内部起到保护作用,确保细胞内的各种化学反应不受外部环境的影响;另一方面又可以实现细胞内外物质的输送和信息交流。

1.2.4 蛋白质

蛋白质是由不同氨基酸通过肽键相连形成的大分子含氮化合物,它是构成细胞的基本有机物和生命活动的主要承担者。蛋白质的一级结构由 20 多种氨基酸按不同比例和顺序组合而成(图 1-14)。由于不同的氨基酸各具特殊的侧链,具有不同的理化性质和空间排布,当按照不同的序列关系组合时,蛋白质分子一维的长链可形成多种多样的空间结构,可以进一步分为更高的层次,如二级结构的 α -螺旋(α -Helix)、三级结构的多肽链和四级结构的复合体。这些空间结构具有不同的生物学活性,可以用于构建生命不同组织与器官,作为生物催化剂(即酶和激素),协助和加速生命活动所需的各种化学反应。同时,它也是生物的免疫作用所必需的物资。人类所需要的蛋白质众多,估计有几万到十几万种。蛋白质占人体重量的 $16\%\sim 20\%$,仅次于水的比重(70%)。生命通过具有电极

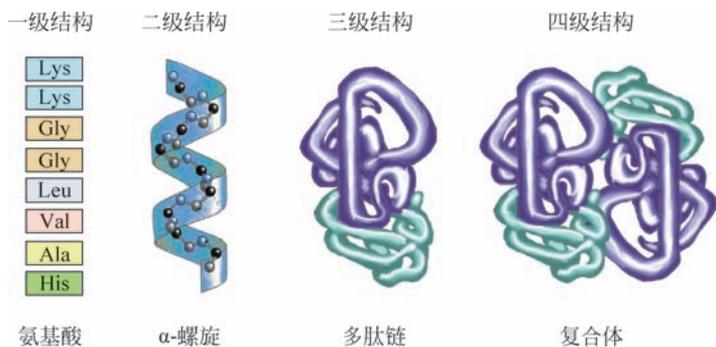


图 1-14 生物蛋白质的结构

性的一维分子长链构成结构和功能如此复杂多样系统的奥秘一直是科学研究探索的重大问题之一。

1.2.5 DNA

细胞内的染色体中存在一类高度规则的“双螺旋”链状结构的核酸大分子,即脱氧核糖核酸(DNA)。DNA是由四种不同的氨基酸(dAMP、dCMP、dGMP、dTMP,或简单表述为A、C、G、T)按照一定的排列顺序,通过磷酸二酯键连接形成的多核苷酸。DNA的宽度为2.2~2.4nm,单位长度约为0.34nm,而螺旋一圈的周期约为3.4nm[图1-13(a)]。一个DNA分子可能含有数百万个相连的单元。例如人类细胞中最大的一号染色体含有约2.2亿个碱基对。人体细胞中23对染色体所包含的DNA碱基对数目全部加起来约为 3×10^9 个。如果将人类一个细胞中所有染色体中DNA首尾连接在一起,其长度可达2m! DNA的功能主要是存储生物生命的遗传数据,其中指导生物产生所需要的各种蛋白质的部分称为基因或编码的DNA。在人类DNA中对应产生蛋白质的基因仅占整个DNA链条的1.5%;其余98.5%曾被认为是“垃圾”,但近些年来对这些非编码蛋白质部分DNA的结构特征和生命功能不断有新的发现与认识,它们在基因表达产生蛋白质过程中具有极其重要的作用。

DNA作为生物遗传数据的物理载体,其双螺旋结构是英国科学家詹姆斯·沃森(James Watson,1928—)和弗兰西斯·克里克(Francis Crick,1916—2004)于1953年发现的(图1-15(b)上图)。当时,人们已经意识到隐藏在细胞染色体中的DNA是生命遗传的秘密所在,但对其结构和功能却不清楚。当时这两位英国剑桥大学的研究员综合利用物理学和化学的规律,基于前人的实验数据和失败教训提出了DNA的双螺旋结构模型。他们在*Nature*发表的论文不足1000字,却开拓了分子生物学和基因工程的新纪元。因此,他们也在1962年获得了诺贝尔生理学或医学奖。同时获奖的还有英国物理学和分子生物学家莫里斯·威尔金斯(Maurice Wilkins,1916—2004),他在利用X射线观测研究DNA方面做出了重要贡献。但需要指出的是,在DNA故事后还有一位关键人物,那就是美国科学家罗莎琳德·富兰克林(Rosalind Franklin,1920—1958)。她在研究中所

取得的衍射图,清晰地揭示了 DNA 的双螺旋结构,据说对沃森和克里克产生过重要的启发(图 1-15(b)下图)。可惜她于 1958 年因癌症去世,年仅 38 岁,未能获得应得的殊荣。

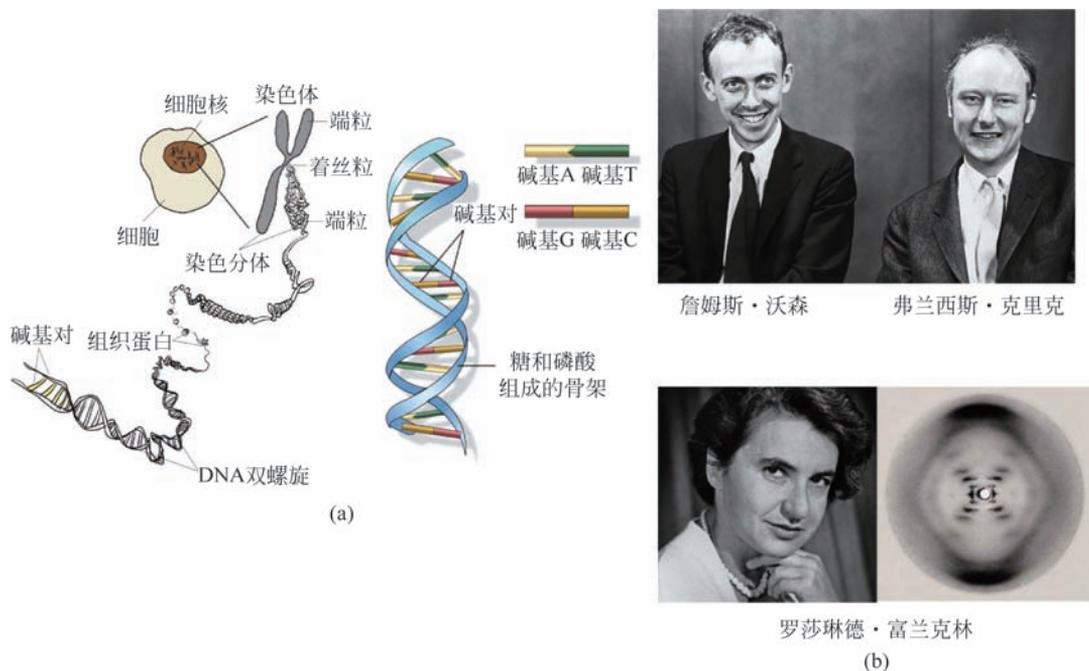


图 1-15 生物 DNA 结构及其发现者

1.2.6 生命的起源

关于地球上生命起源的问题目前仍存在许多疑惑和争论。这个问题包含三个方面,即生命是何时、何地和如何产生的?关于原核生物的化石记录大约可以追溯到 42.7 亿年前。由于当时地球大气中缺氧且太阳紫外线极强,所以推测早期的原核生物出现在海洋深处火山爆发所形成的岩石附近。在早期的海洋里,首先出现的是单细胞的原核生物。这种微小简单的生物不仅能够通过存储和复制自身结构中的数据进行“自我繁殖”,也能够吸取周围环境中的能量进行“新陈代谢”。大约 35 亿年前,功能更加强大的真核生物诞生了。这种生物虽然仍是单细胞,但体积更大,细胞内已经包含功能不同的细胞器,自我复制能力更强,并能够通过“有性繁殖”产生更大的多样性。大约 10 亿年前,多细胞的生物开始出现,这标志着地球生命进化进入了更高级的发展时期。与单细胞的原核生物不同,作为高级生物的动物和植物在生命进化过程中最显著的特征是通过不同专门化器官产生了高度的专业化分工与协作,同时生物组织复杂性大幅增加。多核生物出现后,5 亿年前引发了相关物种组织多样性的爆炸式增长(寒武纪大爆炸)。最终生物进化从同一源泉分化为三个主要分支,即古菌、细菌和真核生物。

关于生命是如何产生的问题,到目前为止仍有许多令人不解的谜团和疑问,这也是

重大悬而未决的科学难题之一。生命起源的理论更多是根据科学模型和有限事实进行猜测和分析生命从非生命物质产生的不同可能性。从物质(化学)的角度,产生生命的基本逻辑如下:首先,将地球早期存在的无机小分子(二氧化碳、氢气和水)通过化学反应变为生命所需要的有机小分子,如氨基酸、核苷酸等;然后,将这些有机小分子组合生成有机大分子,如 RNA、蛋白质、DNA(图 1-16);最后,也是最关键的一步,这些“无生命”的有机大分子最终形成具有自我维持稳定发展的多分子体系,并在此基础上演变为具有代谢和遗传体系的简单生命。这种逻辑看起来似乎很有道理,但深究起来其实仍有许多问题和矛盾。特别是如何从无生命的无机物质“涌现”为有生命的有机系统的现象,到目前为止还没有在实验室中实现,所以各种不同的理论都是“公说公有理,婆说婆有理”的猜测和争论。

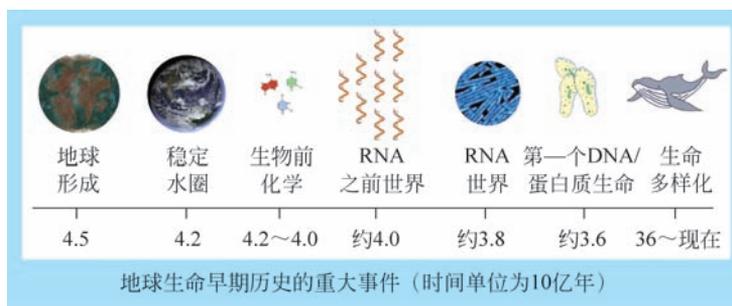


图 1-16 生命的起源

生命诞生仍然是一个谜,地球生物结构由简到繁、种类由少到多,所遵循的进化规律和产生机制是由英国科学家查尔斯·达尔文(Charles Robert Darwin,1809—1882)首先发现的(图 1-17)。达尔文早期学医,但对自然史发生兴趣。他在为期 5 年的航行中,对所

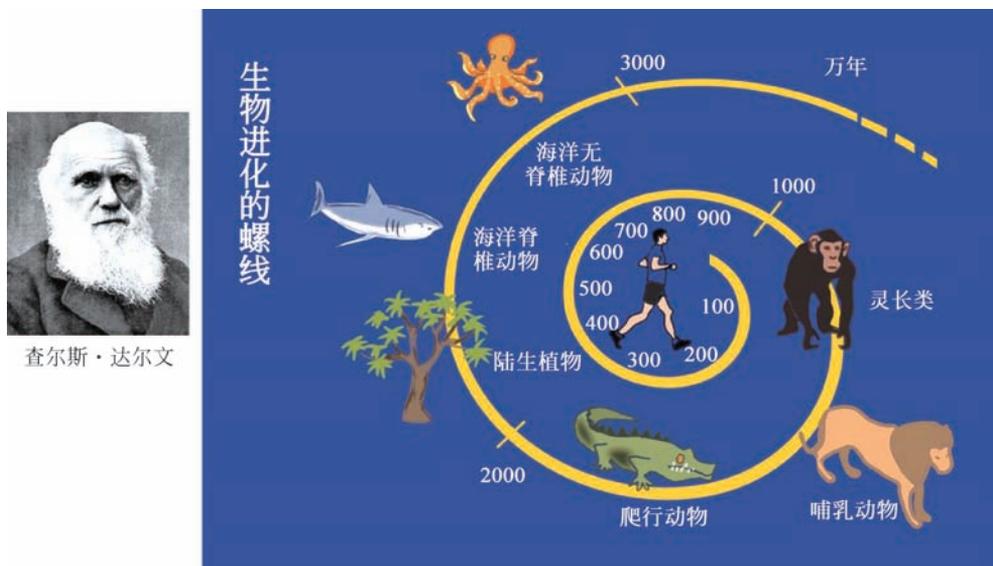


图 1-17 达尔文的生物进化论

见生物与化石的地理分布感到困惑,开始对物种转变进行研究,并且在1838年提出了自然选择理论。因为担心与当时主流思想不符,他没有公开发表自己的发现,而是继续坚持研究。直到20年后一位年轻的科学家华莱士(Alfred Russel Wallace,1823—1913)寄给他一篇描述相似理论的论文,才促使他决定与其共同发表进化论。1859年,达尔文出版了划时代的著作《物种起源》,全面系统地介绍了进化理论。根据进化论模型,生物物种具有通过复制产生大量后代而繁衍的趋势;任何物种的变异,均是在繁衍复制过程中因出错造成的。物种因变异所带来的生物结构、功能和能力的差异通过对所处自然环境的适应程度(或在变化环境中获取生存资源的能力)而得到选择。能够适应环境的物种得以生存和发展,不能适应环境的物种遭到淘汰而灭绝。地球上物种演变的推动力和选择性决定了生命进化的进程和结果。

1.2.7 人类的进化

根据最新的考古发现和研究成果,人类进化始于灵长类动物物种中的森林古猿,与黑猩猩、大猩猩、长臂猿以及旧、新世界猴子等具有共同的祖先。现代基因分析表明,黑猩猩和大猩猩的基因与人类的基因有98%和96%是相同的[图1-18(a)],与现代猴子也有84%的共同基因。人类进化经历了南方古猿、能人、直立人和智人四个进化阶段。大约6500万年前,也许是一个偶然的事件,一颗巨大的行星撞击地球导致生态环境发生急剧变化,给占统治地位的大型动物(如恐龙等)带来了灭顶之灾,却使劫后余生的灵长类生物获得了更大的生存资源与空间。地球上最早的人类是生活在距今420万—150万年前的南方古猿。这些原始人平均身高只有约1.2m,脑容量为440~530mL,仅为现代人的35%。他们能够使用天然的工具(如石头和树枝等)狩猎,但不会制造工具。距今200万—150万年前的能人平均身高增加到1.4m,脑容量增大到680mL,能够制造简单的工具(如石器)。距今200万—20万年前的直立人脑容积较大(800~1300mL),达到现代人的

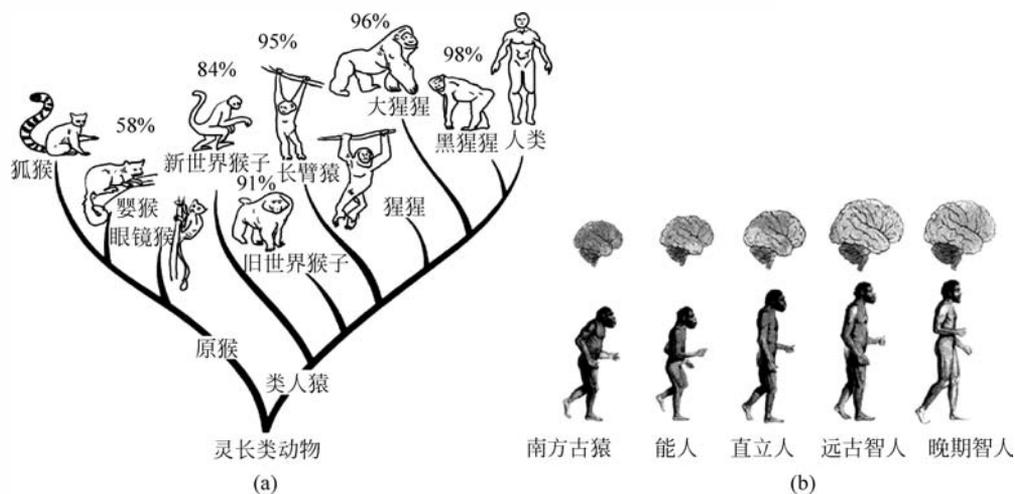


图 1-18 人类的诞生与进化