

我爱科学

物理大世界

量子世界的

神奇之旅



LIANGZI
SHIJI DE
SHENGQIZHILÜ

主编◎韩微微



吉林出版集团



吉林美术出版社 | 全国百佳图书出版单位

我爱科学

物理大世界



量子世界的

神奇之旅

LIANGZI
SHIJI DE
SHENGQIZHILÜ

主编◎韩微微



吉林出版集团



吉林美术出版社 | 全国百佳图书出版单位

量子世界
吉林大影

图书在版编目（C I P）数据

量子世界的神奇之旅 / 韩微微编. — 长春 : 吉林
美术出版社, 2014. 1 (物理大世界)
ISBN 978-7-5386-7549-8

I. ①量… II. ①韩… III. ①量子力学—青年读物②
量子力学—少年读物 IV. ①0413. 1-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第301483号

量子世界
神奇之旅



量子世界的神奇之旅

编 著	韩微微
策 划	宋鑫磊
出 版 人	赵国强
责任编辑	赵 凯
封面设计	赵丽丽
开 本	889mm×1 194mm 1 / 16
字 数	100千字
印 张	12
版 次	2014年1月第1版
印 次	2014年1月第1次印刷
出 版	吉林美术出版社 吉林银声音像出版社
发 行	吉林银声音像出版社发行部
电 话	0431-88028510
印 刷	北京卡乐富印刷有限公司

ISBN 978-7-5386-7549-8

定 价 29.80元

版权所有 侵权必究

吉林银声音像出版社



前言

FOREWORD

在人类生态系统中，一切被生物和人类的生存、繁衍和发展所利用的物质、能量、信息、时间和空间，都可以视为生物和人类的生态资源。

地球上的生态资源包括水资源、土地资源、森林资源、生物资源、气候资源、海洋资源等。

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的重要物质，是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。

土地资源指目前或可预见到的将来，可供农、林、牧业或其他各业利用的土地，是人类生存的基本资料和劳动对象。

森林资源是地球上最重要的资源之一，它享有太多的美称：人类文化的摇篮、大自然的装饰美化师、野生动植物的天堂、绿色宝库、天然氧气制造厂、绿色的银行、天然的调节器、煤炭的鼻祖、天然的储水池、防风的长城、天然的吸尘器、城市的肺脏、自然界的防疫员、天然的隔音墙，等等。

生物资源是指生物圈中对人类具有一定经济价值的动物、植物、微生物有机体以及由它们所组成的生物群落。它包括基因、物种以及生态系统三个层次，对人类具有一定的现实和潜在价值，它们是地球上生物多样性的物质体现。

气候资源是指能为人类经济活动所利用的光能、热量、水分与风能等，是一种可利用的再生资源。它取之不尽又是不可替代的，可以为人类的物质财富生产过程提供原材料和能源。

海洋是生命的摇篮，海洋资源是与海水水体及海底、海面本身有着直接

FOREWORD

关系的物质和能量。包括海水中生存的生物，溶解于海水中的化学元素，海水波浪、潮汐及海流所产生的能量、贮存的热量，滨海、大陆架及深海海底所蕴藏的矿产资源，以及海水所形成的压力差、浓度差等。

人类可利用资源又可分为可再生资源 and 不可再生资源。可再生资源是指被人类开发利用一次后，在一定时间（一年内或数十年内）通过天然或人工活动可以循环地自然生成、生长、繁衍，有的还可不断增加储量的物质资源，它包括地表水、土壤、植物、动物、水生生物、微生物、森林、草原、空气、阳光（太阳能）、气候资源和海洋资源等。但其中的动物、植物、水生生物、微生物的生长和繁衍受人类造成的环境影响的制约。不可再生资源是指被人类开发利用一次后，在相当长的时间（千百万年以内）不可自然形成或产生的物质资源，它包括自然界的各种金属矿物、非金属矿物、岩石、固体燃料（煤炭、石煤、泥炭）、液体燃料（石油）、气体燃料（天然气）等，甚至包括地下的矿泉水，因为它是雨水渗入地下深处，经过几十年，甚至几百年与矿物接触反应后的产物。

地球孕育了人类，人类不断利用和消耗各种资源，随着人口不断增加和工业发展，地球对人类的负载变得越来越沉重。因此增强人们善待地球、保护资源的意识，并要求全人类积极投身于保护资源的行动中刻不容缓。

保护资源就是保护我们自己，破坏浪费资源就是自掘坟墓。保护资源随时随地可行，从节约一滴水、少用一个塑料袋开始……

CONTENTS

目录

宇宙与量子

- 解密恒星发光的能量来源 1
- 太阳缓慢燃烧的秘密 4
- 红巨星和白矮星的形成 11
- 中子星和黑洞的形成 16
- 重现“大爆炸”的图景 20



微观粒子世界

- 朴素的原子观 25
- 卢瑟福的原子核模型 30
- 玻尔的原子结构模型 34
- 原子核内的相互作用 38
- 第一个基本粒子——电子 42
- 不断运动的粒子 46
- 反粒子构成反物质 50
- 中微子确实存在 57
- 找寻物质结构的最小单元 61
- 元素周期表的实质 65





奇妙的量子理论

- 颠覆经典物理学的理论 69
- 连续运动和双缝实验 73
- 量子世界的测不准原理 78
- 量子力学的机会法则 82
- 量子的“隧道效应” 85
- 最基本粒子（夸克）的理论 90

量子物理的实际应用

- 隧道效应与核裂变 97
- 量子属性与生命基因工程 100
- 电子的量子性质与激光器 102
- 不确定性与照相成像 104
- 最新通讯技术——量子通讯 107

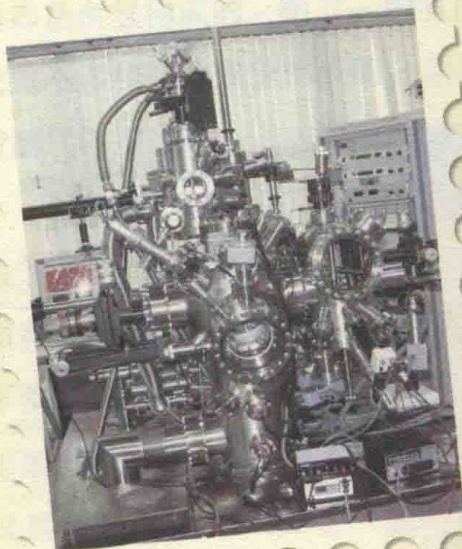
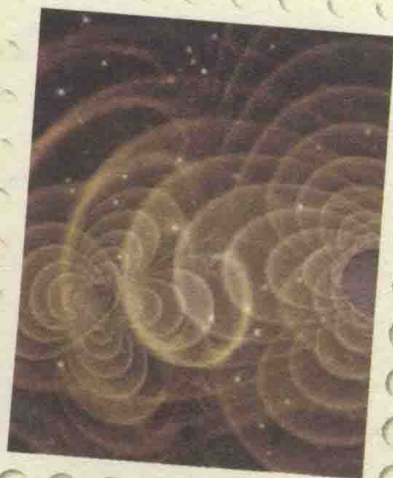
量子化学的研究与应用

- 量子化学的诞生及发展历程 111
- 量子化学的研究范围及内容 114
- 量子化学理论的多领域应用 116



波与粒子

- 黑体辐射公式..... 119
- 光既是粒子，也是波..... 124
- 量子世界的“核心之谜”..... 128
- 一切物体都是波..... 133
- 妙不可言的几率波..... 137
- 激光器和全息摄影..... 142
- 将原子冷却的技术..... 147



电磁与量子

- 泡利不相容原理和电子自旋.... 151
- 量子电动力学的意义..... 156
- 磁单极子的假设..... 159
- 金属，绝缘体与半导体..... 164
- 奇妙的“超导”现象..... 167
- 魔术般的超流动性..... 171
- 高性能量子计算机..... 174
- 远距离传物的量子技术..... 180

宇宙与量子

量子学诞生以后，人类原先许多“成熟”的宇宙观都发生了巨大的变化，一些原先解释不清的宇宙现象也得到了较为圆满的解释。量子物理学家为我们重新描绘了一幅幅宇宙新图像，包括太阳缓慢燃烧的秘密，红巨星、白矮星、中子星的形成原因，甚至还为我们“重现”了宇宙大爆炸的壮观景象。

●解密恒星发光的能量来源

木星是我们太阳系中的行星，远比别的行星大。虽然木星与地球相比，非常巨大，但是与我们的恒星太阳相比，还是要小得多。木星与太阳相比，尽管大小差别悬殊，但在两个很重要的方面，它们是类似的。第一，两者主要都是由氢构成的，第二，两者的平均密度都只比水大一点点。既然它们是由差不多相同的成分构成的，为什么木星不像太阳一样，是一个炽热的燃烧着的气体星球呢？

让我们想象从木星的大气顶部开始往下降。当我们不断朝木星中心下降的时候，大气压会不断升高，因为上面大气层的质量不断增加。大气压变得如此之高，以至于很快气体氢分子



太阳系



木星

就被压缩成了液体氢分子。如果我们进一步潜入这一氢的海洋，就像在地球上的海洋中下潜一样，压力会进一步升高。随着我们越潜越深，液态氢的密度变化并不大，因为氢分子有一定大小，泡利不相容原理不允许两个原子靠得太近。氢分子的强大共价键抵抗着木星氢海洋深处的巨大压力。但是当我们继续往下，压力将增加到比地球上任何地方的压力都大。氢分子的共价键最终破裂了，现在，氢海洋里面存在的全是原子氢。这种原子氢液体里面，氢原子之间的距离已经非常小，能够形成能带结构。因为氢原子在 $1s$ 壳中只有一个电子，所以这种原子氢海洋就是液态金属海洋，类似地球上我们熟悉的液态水银。这一金属海洋可以维持很大的电流，科学家认为这就是木星拥有强大电磁场的原因。

当我们继续向木星中心进发的时候，压力继续上升，但是氢原子非常结实，能够抵抗住木星产生的巨大压力。是什么东西防止了氢原子被压垮？正是我们熟悉的电子和质子之间的电吸引力，抵抗住了像木星这样的巨大行星的重力产生的巨大压力。木星是一个不成功的恒星，为什么这么说呢？恒

星与木星非常相似，只是恒星的质量要大得多——木星的质量只有太阳的0.1%。这意味着恒星中心的压力甚至比木星中心还要大得多。在恒星中，压力如此巨大，以至于原子中的电子和质子会被压得分开。恒星中的引力也非常巨大，能够超过电子和质子之间的电吸引力，最后导致了一锅电子和质子组成的“汤”，物质的这种形态叫做等离子体。

行星是由原子支撑的。在恒星中，原子被撕裂，形成等离子体，引力趋向于引起恒星坍缩。当等离子受到压缩的时候，电子和质子的运动越来越快，等离子体也越来越热。这种电子和质子的热运动产生了一种压力，从而阻止了进一步的引力坍缩。然而，因为恒星会以光子的形式将能量辐射出去，等离子体最终将冷却下来。为了防止恒星进一步坍缩，恒星内部必须有持续的热量供应。当恒星坍缩的时候，恒星中心最终将变得非常致密，温度非常高，从而引发核反应。核能正是恒星发光的能量来源！

知识

共价键

共价键是化学键的一种。两个或多个原子共同使用它们的外层电子，在理想情况下达到电子饱和的状态，由此组成比较稳定的化学结构叫做共价键。共价键与离子键（通过两个或多个原子或化学基团失去或获得电子而成为离子后形成的化学键）之间没有严格的界限，通常认为，两元素电负性差值远大于1.7时，成离子键；远小于1.7时，成共价键。

延伸阅读

恒星的诞生

在星际空间普遍存在着极其稀薄的物质，主要由气体和尘埃构成。它们的温度约 $10\sim 100\text{K}$ ，密度约 $10^{-24}\sim 10^{-23}\text{g/cm}^3$ ，相当于 1cm^3 中有 $1\sim 10$ 个氢原子。星际物质在空间的分布并不是均匀的，通常是成块地出现，形成弥漫的星云。

星云里 $3/4$ 质量的物质是氢，处于电中性或电离态，其余是氦以及极少数比氦更重的元素。在星云的某些区域还存在气态化合物分子，如氢分子、一氧化碳分子等。如果星云里包含的物质足够多，那么它在动力学上就是不稳定的。在外界扰动的影响下，星云会向内收缩并形成较小的团块，经过多次的收缩，逐渐在团块中心形成了致密的核。当核区的温度升高到氢核聚变反应可以进行时，一颗新恒星就诞生了。

● 太阳缓慢燃烧的秘密

几个世纪以来，天文学家和物理学家们都在思索恒星为什么发光。通过简单的计算就可以发现，通常的化学“燃烧”毫无希望，化学反应不可能为恒星数十亿年的生命提供足够的能源。能量只可能来自核反应。因此，著名的英国天文学家，亚瑟·爱丁顿爵士，非常不幸地发现恒星内部的温度太低，质子不能克服它们之间的排斥势垒，相互靠近而发生核反应！尽管如此，爱丁顿还是确信，核能是恒星唯一可能的能量来源，他向怀疑者们挑战说：“我们不会跟批评家



亚瑟·爱丁顿爵士

们争论恒星是不是还不够热，无法发生这种反应过程；但我们会让他们去找一个更热的地方。”结果证明爱丁顿是正确的，只是需要用量子力学来提供解答。利用伽莫夫提出的量子隧道效应，一位英国天文学家罗伯特·阿特金森和一位奥地利物理学家弗里茨·侯特曼斯解决了恒星的能量产生问题。他们在论文开始说道：“最近伽莫夫证明了，即使传统观念认为它们的能量不够，带正电的粒子还是可以穿透势垒进入原子核。”他们提出，轻原子核可

以成为捕获质子的一个“陷阱”，当四个质子被俘获的时候，就会形成一个阿尔法粒子。这个阿尔法粒子再从原子核中放出来，因而释放出四个氢原子核转变成一个氦原子核这一聚变过程的大量原子核结合能。他们的原始论文题目是：《怎么才能在一个势场锅中烹调出氦原子核》，但是这个题目被科学杂志的编辑改成了一个更符合常规的题目了！这篇论文是现代恒星内部热核反应理论的基础，10年后，1939年，汉斯·贝蒂提出了一个所谓的碳循环理论，这一理论中碳起的作用与阿特金森和侯特曼斯说的质子俘获核起的作用类似。

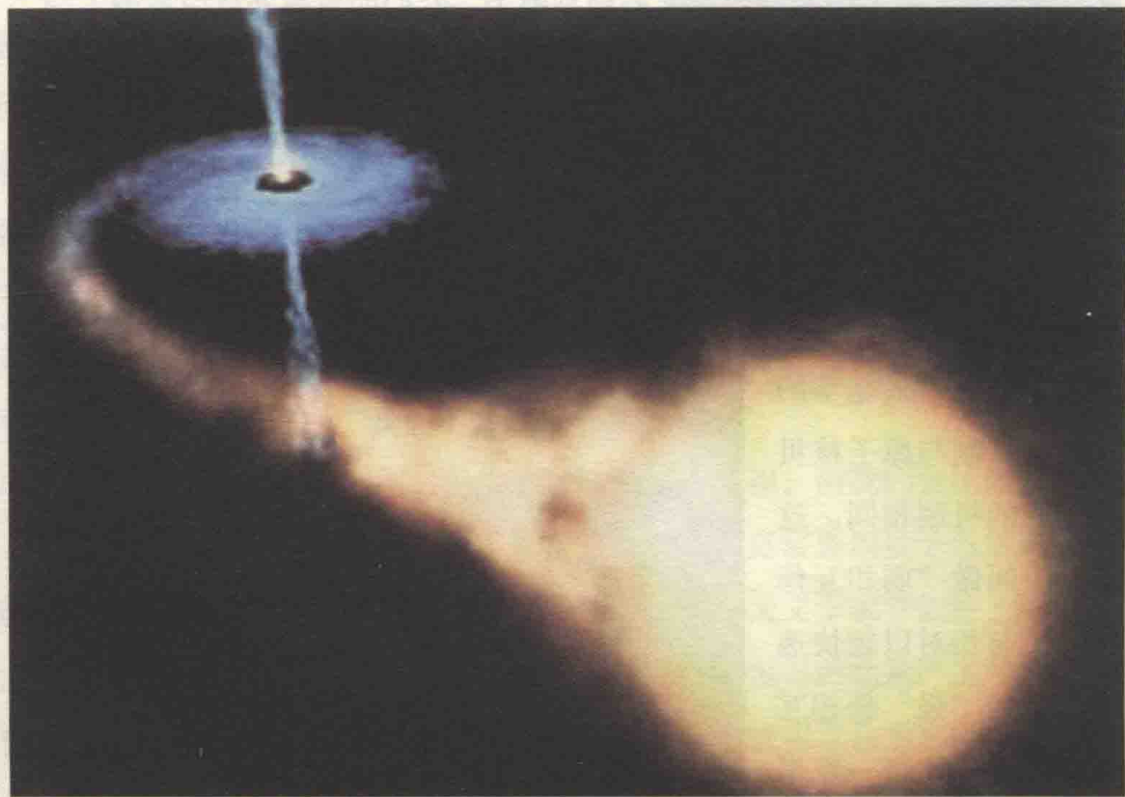
太阳有很多氢，它的能源一定来自于氢通过聚变形成氦和其他重原子核的核反应。氢弹放出的能量同样来自于氢的聚变反应。为什么太阳不像氢弹那样爆炸？情况是这样的，太阳的能量产生速度非常低，太阳中一个人体大小的体积内产生能量的速度，比人体将食物转化为能量的速度还要低得多！氢弹和恒星能量产生速度的巨大差别是因为，它们的氢聚变反应类型不同。恒星中的氢几乎都是普通氢，每个氢原子只有一个质子，而氢弹的核反应需要的氢是氢的两种稀有同位素——氘和氚，这两种同位素除了含有一个质子以外，还分别含有一个和两个中子。氘和氚相对更容易发生核反应。太阳用来产生能量的核反应依靠普通氢，这种反应非常难发生，我们在实验室中从来没有观察到。这是因为太阳这一最基本的核反应机制与原子核贝塔衰变的机制相同。这种反应叫做“弱相互作用”，与相对以较快速率发生的“强”核相互作用——比如氘—氚聚变反应——相比，进行



氢 弹

得非常缓慢。

我们把与贝塔放射性有关的相互作用叫做弱相互作用。最简单的弱相互作用例子是中子的贝塔衰变。中子质量略比质子大，如果单独存在，最后会衰变为一个质子和一个电子。这两个粒子足够保证电荷守恒——中子不带电，转变成两个带相反电荷的粒子——但是实验表明，如果不引入另外一种电中性的粒子，这一反应的能量和动量将不守恒。这一大胆的想法是泡利在1931年提出来的，这可是在查德威克发现世界上第一个中性粒子——中子——的前一年。为了区别“泡利的中子”和查德威克的中子，恩里克·费米把这个假想粒子叫做中微子（意大利语“中性小东西”）。因为这些奇怪的粒子不带电荷，它们不受电磁力的影响。而且由于早期俘获中微子的所有试验尝试都以失败告终，显然它们也不受核力的影响。不管怎样，因为它们是由于弱力产生的，中微子一定也能通过弱相互作用与别的核物质发生相互



中微子



作用。探测中微子的困难在于，根据预言中微子反应的概率很低，一个中微子必须通过很多“光年”厚的物质才有50%的机会发生反应。因为光的速度是每秒30万千米，一光年就是光以这种速度走一年（大约3000万秒）经过的距离，因此，你要么需要在你的探测器中放上巨大量的物质，要么利用一束含有巨大数目中微子的中微子束，才有希望探测到这种中微子反应。因此一点都不奇怪，直到1956年，泡利提出中微子假说的25年之后，也是在物理学家们已经接受了中微子存在这个事实的很长时间以后，两位美国物理学家——弗里德里克·莱因斯和克莱德·寇文才探测到了中微子引起的微弱相互作用。他们是怎么得到足够数量的中微子的？因为每一次核裂变平均产生大约六个贝塔衰变过程，他们最初的想法是利用核爆炸中放出的中微子！幸运的是，他们可以利用核反应堆中产生的中微子。从核反应堆中逸出的数量巨大的中微子中——每平方厘米每秒超过1万亿个中微子，每个小时大约能够观测到三次中微子反应事件。基本的中子贝塔衰变可以写为如下反应式：

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

按照惯例，衰变反应中产生的，用希腊字母 ν 上面加一根横杠（发音为“扭霸”）表示的粒子，叫做反中微子，也就是中微子的反粒子。如果我们把一个参与反应的粒子移到反应式的另一边，为了保证反应式两边电荷和其他量子数守恒，我们必须把它变成相应的反粒子。通过这样一个变化，我们可以看出，一种可能的弱相互作用反应是

$$n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}$$

这里碰到了电子的反粒子，即正电子。实际上，莱因斯和寇文寻找的是这一反应的相反过程，也就是

$$\nu + p \rightarrow n + e^+$$

直到1995年，弗里德里克·莱因斯才因为这一发现被授予诺贝尔物理学奖。现在这个时代，在巨大的粒子加速器实验室里面，我们已经对这些特别的粒子失去好奇心了，因为人工大量制备中微子束和反中微子束已经非常平

常。我们现在能够观察到这样的中微子反应，也可以观察到莱因斯和寇文发现的反中微子反应。

$$\nu + n \rightarrow p + e^-$$

在太阳中有很多质子，但是质子单靠自己不能通过下面的贝塔衰变转变成中子

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

因为中子质量更大。在原子核中情况就不同了。如果某一个质子这样“衰变”产生的新原子核比原来的原子核结合得更紧密，这一过程就可以，而且确实在不断发生。根据不确定性原理，整个系统可以“借到”额外的能量来使这一反应成为现实，因为，在衰变过程的最后，整个系统的总能量将更低。因此，虽然质子单靠自己不能转化为中子，但如果在合适的原子核中，它们就可以！这是理解太阳能量产生机制的关键。考虑太阳上两个质子相互碰撞。因为它们之间有库仑排斥力，它们很难靠得足够近，以进入强大的短程强相互作用范围。但是，偶尔，由于量子隧穿效应，两个质子能够结合在一起，形成一个不稳定的由两个质子组成的原子核。通常，在一个很短的时间内，这两个质子又会分开。但是，由于弱相互作用和不确定性原理，这一不稳定原子核的两个质子中的一个有一个很小的机会通过贝塔衰变转化为中子，从而形成一个氘原子核：

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$$

平均说来，太阳上面的每个质子需要碰撞10亿年，才会发生一次这种反应！这种极其缓慢的第一步核反应正是太阳缓慢燃烧的秘密。一旦氘核形成，生成氦核所需要的别的核反应就容易发生得多了。质子和氘核之间通过强相互作用和电磁相互作用反应形成 ${}^3\text{He}$ ： $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ，然后通过一个纯强相互作用形成 ${}^4\text{He}$ ：

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$$

这一反应序列叫做“质子—质子循环”，大家相信这一循环是太阳中能



量产生的主要过程。然而，在很多别的恒星中，温度很高，能量能够通过贝蒂提出的碳循环产生。贝蒂的碳循环机制不需要在碰撞的那一刻发生弱相互作用，而是将碳核作为“烹调”出氦核的某种催化剂。

从慎重出发，我们必须提到，尽管物理学家们在解释太阳能量来源的时候取得了巨大的成功，还是有一个很恼人的问题一直没有得到解决。

这个问题是这样的：太阳中质子—质子循环过程中的核反应，我们相信已经被搞得很清楚了。我们已经看到，有些核反应过程会产生中微子，因此，预言到达地球的这种“太阳中微子”的数目应该是相当简单的事情。1968年到1986年间，在位于南达科他州的霍姆斯德克金矿矿井中，进行了探测这些太阳中微子的实验。实验在地面以下很深的矿井里进行，目的是为了减少来自外层空间的宇宙射线的影响。宇宙射线会进入实验装置与装置反应，跟太阳中微子反应混在一起，很难区别。可惜的是，即使经过非常仔细的检查之后，他们也只探测到了预计数目1/3的中微子。

在20世纪的80年代和90年代，为了解决这个问题，又用不同的探测装置



金矿矿井