

欢姆社学习漫画

爱淘书
www.itaobooks.com

漫画量子力学

(日) 川端 洁 / 监修
(日) 石川宪二 / 著
(日) 柊ゆたか / 漫画绘制
(日) ウエルテ / 漫画制作
李 梅 / 译



科学出版社

www.sciencep.com

A decorative border featuring stylized black and white floral motifs, including leaves and flowers, arranged in a repeating pattern around the central text.

KindleX 出版署

前言

坦白地说，从小学到进入高中之前，我一直都想成为一名物理学家。而且是希望可以在分析分子、原子结构，探索物质及能量构成的量子力学领域有所作为。

然而，在高中生活的过程中，我却完全放弃了这个梦想，开始慢慢步入现在的工作，原因有两个。

其中之一，是对写文章、写书产生了更加浓厚的兴趣，这样一个所谓积极的理由；而另外一个，觉得物理的学习，特别是使用方程式的数学计算是一件超级麻烦的事情，这样一个消极的理由。

人生就是这样，是“想做”与“不想做”的长期斗争的过程，所以对于现在的选择我并不后悔，而且我觉得自己非常适合现在的工作，也从来没有考虑过中途转职做科学家什么的。只是，心中仍然有这样的遗憾，“如果当初能够更加认真地学习一下量子力学就好了”，一种类似于憧憬的心情。

正是因为这样的理由，在商讨这次关于欧姆社学习漫画系列丛书出版的新计划时，我不假思索地就选择了量子力学。很幸运，我得到了大家的赞同，我记得当决定出版的时候，就像长期以来的烦恼有了解决的办法一样，我的心情豁然开朗。

可是……

在写脚本的过程中，我开始后悔了。

“太……太难了……”

面对很久都没有接触过的量子力学，果然对于我来说是一个非常大的挑战。所有前进的道路都被各种各样的公式挡住，让我无法前行一步，让我觉得我的大脑似乎从高中时代开始就没有再进化过一样。一想到接下来如此困难的工作，我一下子就傻眼了。

而且，由于我已经扬言“一定会写出即使是没怎么学过物理的人也能够理解的通俗易懂的内容”，所以现在也没有办法打退堂鼓了。我凝视资料仔细阅读着，并且不时地因为不理解而纠缠着川端老师，终于有了进展。而且我得到了漫画绘制柊先生以及担任制作和编辑工作的新井先生和川崎先生等很多人的协助，才最终完成了这部作品。在这里我向所有的人表示感谢。

当然，仅仅凭借这一本书并不能理解量子力学的全部。但是在跟随故事前进的过程中，至少可以明白“这本书要说明的是量子力学”。所以读了这本书而对量子力学产生兴趣的读者们，希望你们可以挑战关于量子力学的更加专业的书。那里一定是我们所无法想象的有趣的知识世界。

让人觉得奇怪的是，量子力学的研究有很大进展的1910~1940年出现的人物，性格都非常地刚烈。其中，特别是被称为“量子力学之父”的波尔老师，他常年与爱因斯坦进行着激烈的科学争论，并且最终战胜了他。不仅如此，他还向在量子力学领域中建立了极其重要的方程式的薛定



谔进行挑衅。对于比自己大两岁的前辈波尔，一直耐心应对的薛定谔由于彻夜不眠地进行争论，最后终因劳累过度而被抬进了医院。被抬进医院的薛定谔想：终于可以解放了。然而随同而来的波尔根本没有表现出要回去的意思，于是在病床的旁边又重新开始了讨论。讨论一直持续到薛定谔昏厥过去而无法开口说话为止。

其次，认为“世界并不是必然的，而是由偶然形成的，所以只能用几率来表示”，并且把这一量子力学领域的最大发现总结成不确定性原理的海森堡也是这样。每天都进行很长时间的辩论。而且，非常喜欢行走的他每天都要步行 30 千米左右，行走的过程当中，他并不观看周围的风景，而是不停地自己和自己说着话。从他旁边来看他也不失为一处奇妙的风景。

这个时期，之所以大多数的科学研究可以被讨论，正是因为科学家们都集中生活在欧洲这个狭小的范围内。那么，为什么会发生这种如此偶然的事情呢？

他们并不是一生下来就是天才，在特定的时期，特定的区域内优秀的人物同时诞生从概率上来说也是几乎不可能的事情。

可以想象一下，当时的欧洲正在掀起一股探索物质、能量的起源的热潮。简单地说，当时的欧洲具有探索科学真理的氛围。爱因斯坦也好，波尔也好，薛定谔也好，海森堡也好，他们都只是在享受“时代的冲浪”而已。

这股潮流实际上一直延续至今。现在，量子力学的研究不仅限于物质及能量，而且成为探索宇宙构成的伟大的科学体系，其内容也越发地有趣。

虽然并不是所有的人都能成为物理学家，但是我希望让更多的人知道，有量子力学这样一个领域，正在进行着探索我们生存的“世界”之谜的划时代的科学研究。

虽然我不能肯定这本书可以起到怎样的作用，哪怕只是可以增加为数不多的量子力学的拥护者、支持者，对于我来说也是一件非常幸福的事情。

石川宪二



编者按

继由石川先生和柊先生合作完成《漫画宇宙》之后，虽然有些不自量力，我仍然大胆地接受了担当本书主编的工作。我这个人，虽然没有画画的天赋，但作为漫画的爱好者我绝不落于人后。而且通过上一次的工作，我完全了解了这两个人的实力，于是我对故事将如何进行产生了浓厚的兴趣，甚至想比任何人都先读到这本书。本着书本内容的正确性的原则，我将尽可能精确地检查其内容，对于需要修改的部分直言不讳。

为了论述分子、原子、基本粒子、光子等所属的微观世界里所发生的各种各样的物理现象而建立的“量子力学”与爱因斯坦的相对论作为现代物理学的两大支柱，在物理学领域发挥了巨大的作用。今天，对于物理学、化学、生物学，甚至是工学领域的学生来说，量子力学是必修的基础知识。但是，由于它所涉及的概念、思维方式与我们日常所接触的东西差别很大，而且必须以复数为基础进行数学演算，这些都导致了初学者们对于量子力学产生了强烈的心理障碍，认为量子力学是很难应付的非常难于理解的内容。先不考虑数学方面的原因，例如要想理解微观世界的居民们所表现出来的粒子性与波动性的“双重性格”，估计无论对于谁来说都是一件摸不着头脑的非同寻常的事情。

克服心理障碍的有效手段之一就是了解历史背景。本书的特色之一就是详细地描写了很多与量子力学的建立有关的历史背景及意义深刻的奇闻轶事，并且运用漫画这种具有很强表现能力的手法，让读者可以更加容易地掌握被说明的对象及物理过程。所谓“千里之堤溃于蚁穴”，墙壁上一旦有了个小洞，不管它有多小，从那里开始都有前进的可能性。虽然这本书并不是教科书，但是作为量子力学的入门书或者课外书，我相信它可以完成穿过蚁穴前进的任务。我所教的物理学科的大多数学生都不知道获得诺贝尔物理学奖的第一个日本人的名字，对于这样的事实我非常惊讶。我衷心地期待这本书可以改变这种状况。

川端 洁



序 一寸法师和拇指姑娘	1
○○○一寸法师的故事 ○○○	10
○○○拇指姑娘的故事 ○○○	11
♣所谓的量子力学，到底是什么♣	16
第 1 章 一半的一半的一半的……	21
🌸 1.1 永远都不会结束的悖论	22
· 专栏 阿基里斯和乌龟赛跑	24
🌸 1.2 分子与原子是否真的存在	28
🌸 1.3 探索用肉眼无法看见的原子	36
· 专栏 挑战“观察微小世界的技术”之一 显微镜发展的历史	47
♣如果没有“元素”和“原子”♣	50
· 专栏 古代希腊以外的元素论、原子论	55
第 2 章 当原子不再是“不可分割”的	57
🌸 2.1 原子的组合构成物质	58
●●●元素周期表 ●●●	62
🌸 2.2 天才化学家拉瓦锡的功绩	66
●●●元素周期表 应用篇 ●●●	74
♣又回到起点的原子之旅♣	80
· 专栏 挑战“观察微小世界的技术”之二	
出现了可以观察原子的显微镜	85



第 3 章 如何探索原子的内部 87

- 3.1 电的孩子“电子”的发现 88
- 3.2 汤姆逊和长冈半太郎的原子模型 96
 - 专栏 日本物理学的始祖 长冈半太郎的伟大功绩 97
- 3.3 卢瑟福探明了原子核的真相 102

✦从电子到质子、中子及夸克的世界✦ 112

第 4 章 没有量子力学就没有原子 117

- 4.1 原子的构造并不同于天体的构造 118
- 4.2 电子并不像球体一样会自由下落 125
- 4.3 波尔的原子模型 131

✦波尔为什么被称为“量子力学之父”✦ 136

第 5 章 在探索物质的过程中发现：其真面目并不可爱 141

- 5.1 德布罗意的奇妙构想 142
- 5.2 薛定谔 vs 海森堡 162
 - 薛定谔方程式入门的高中数学复习 169
 - 薛定谔方程式入门的高中物理复习 172
 - 特别讲义 谁都觉得（可能）理解了一点儿的薛定谔方程式 176
- 5.3 “电子存在于哪里”——波的原形 184
- 5.4 无法同时弄清楚“在哪里”与“如何运动” 200

尾 声 量子力学也涉足“其他世界” 205

- 专栏 超弦理论的超简单说明 211
- ✦从哥本哈根解释到多世界解释✦ 214
 - 专栏 量子力学与我们生活的联系之一 223
 - 没有穿隧效应的发现就没有家用电器的发明 223
 - 专栏 量子力学与我们生活的联系之二

附 录 试解薛定谔方程式

229

量子论·量子力学系谱

236

参考文献

240

人 物 简 介



小 蕉

光辉高中2年级学生。擅长体育运动，戏剧部成员，憧憬浪漫的舞台。是“先行动后思考”的运动型少女。



格洛里亚

光辉高中2年级学生。从美国来的交换留学生，也是非常喜欢日本动画片和漫画的宅女。性格纯朴。



山 根

光辉高中2年级学生。思维缜密，是把小蕉和格洛里亚带入戏剧部的干部。偶尔说话自相矛盾。



贯 太

小蕉的哥哥。日本综合科学大学理工学部物理学科3年级学生。虽然个子比妹妹还要矮，且其貌不扬，却从小就对天文十分感兴趣，具有丰富的天文知识。

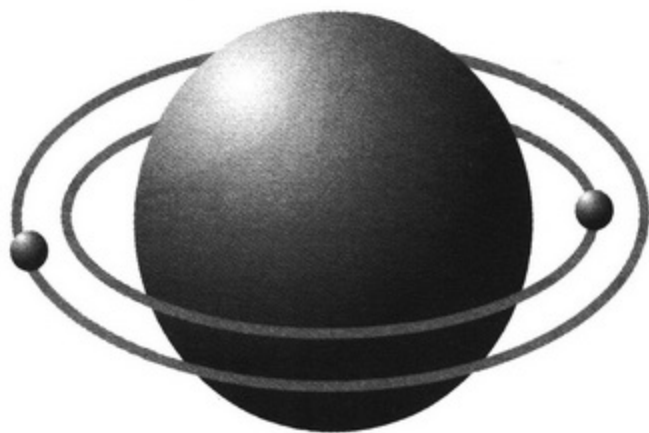


讚岐教授

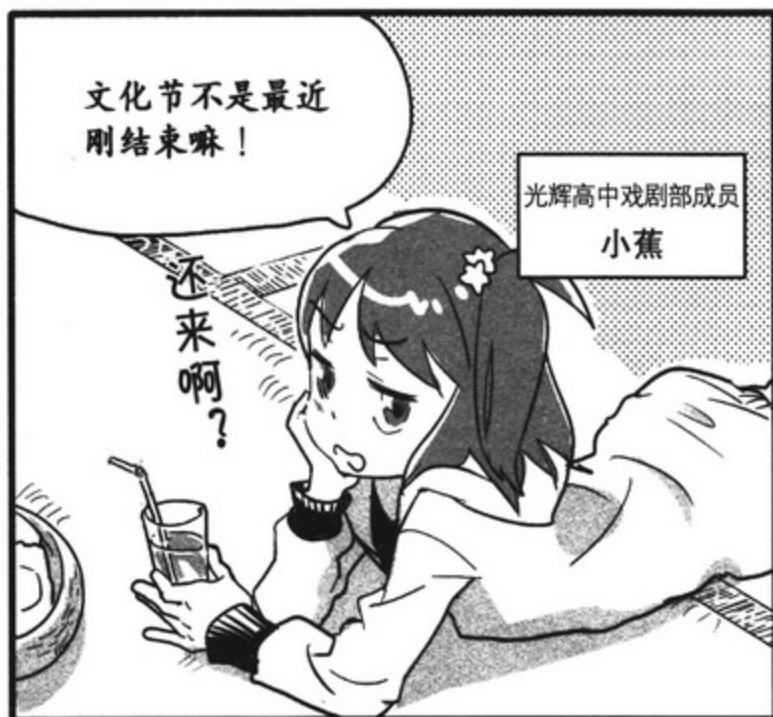
贯太所在大学的教授。是天文学和物理学方面的著名学者。由于学生时代属于戏剧部而非常喜欢夸张的表演。

序

一寸法师和拇指姑娘

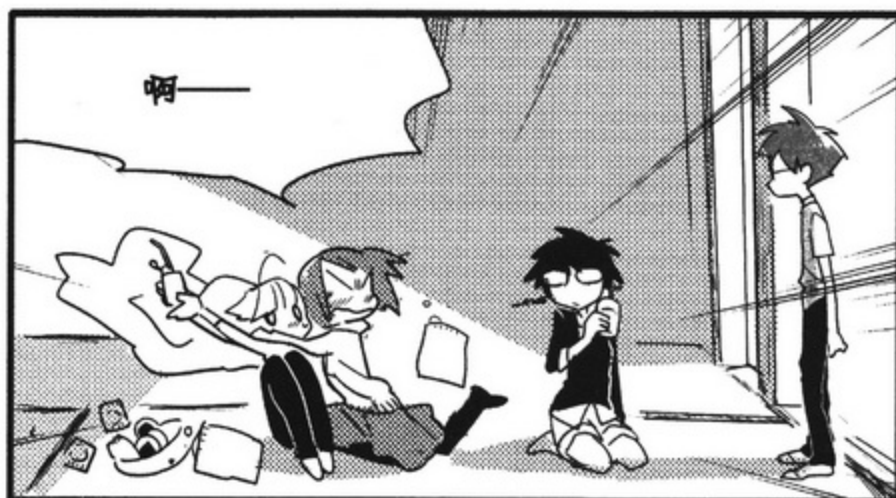












那天的中午
贯太在大学里

贯太，
你选了量子力学的课对吧。

贯太的老师 大学教授
讚岐教授

啊，是啊！

觉得可能对宇宙
形成期的研究有
用就选了。

虽然也没什么
太大的关系

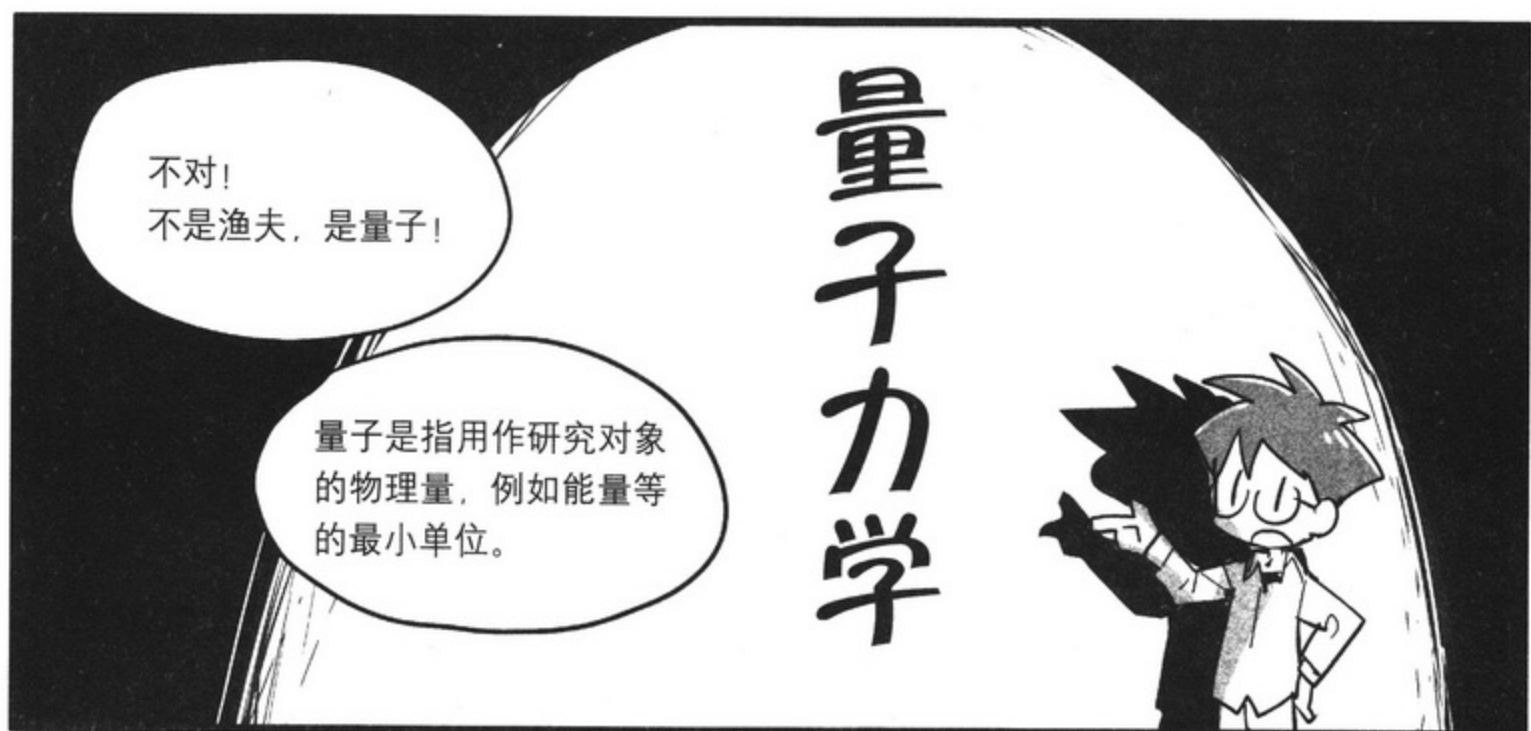
负责的老师说你的成绩
太差，直叹气呢！

没想到和宇宙不一样，
学习微观的东西还挺难
的……

不好意思

对了，她还说——

以这样的成绩，量子力学
的单位都搞不清楚……



古典物理学并不适用于原子、基本粒子等存在的极小（微观）世界。

微观世界……
极小……

好像和一寸法师及拇指姑娘有点相似啊。

啊？

咻！

不管怎么样！

由老师决定的事情
先放放。

还是帮我们排练戏剧吧！

不要闹啦！

教授，
救命啊！

讚岐教授也来帮忙吧！

阿

一寸法师的故事



在这里我们重温一下一寸法师和拇指姑娘的故事。一寸法师是日本古老传说集《御伽草子》里的故事。年迈的夫妇去神社祈愿的时候，得到了一个身高只有一寸的孩子。经过了很长很长时间，这个孩子还是那么丁点儿大，他就是一寸法师。故事就从这里开始了。



一寸的意思是？

一寸大约是3厘米长。



有一天，一寸法师觉得自己应该到京城里去当一名武士，于是就以碗当船，用筷子作桨，在腰里别上一根针当作刀，意气风发地开始了自己的旅程。

一寸法师来到京城，成为一户人家的家臣。这家的千金小姐也非常喜欢他，经常和他在一起。可是，有一天，两个人一起去神社参拜的路上遇见了妖怪要抢走小姐。为

了保护小姐，一寸法师扑向妖怪，妖怪一口就把他吞了下去。

即使这样，一寸法师并没有泄气，他用针不停地刺着妖怪的胃，妖怪疼痛难忍只好投降，把一寸法师吐了出来，逃向大山里。

妖怪逃走之后落下了一根小槌子，据说它可以帮助人们实现各种愿望。小姐摇了摇小槌子，一瞬间，一寸法师变成了身长六尺（182厘米）的魁梧武士。这之后，两个人结了婚，借助着小槌子变出的食物和金银财宝过着幸福的生活。



因为胃被针刺的太疼了吧！

不用讲解格斗的技巧啦！

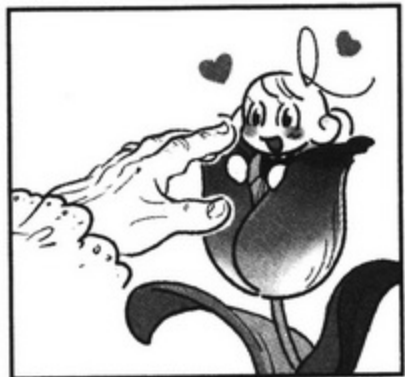


拇指姑娘的故事



拇指姑娘是丹麦童话作家安徒生的代表作。

在很久很久以前，有一个女人对一个女巫说：“我很想要一个孩子，小一点也没有关系，只是希望是一个女孩。”于是女巫给了她一粒种子。她把种子撒在了地里，不久便开出了郁金香的花儿，并生出了一个拇指大小的小女孩。拇指姑娘长不大，她坐在用叶子做成的船上，每天在盛有水的盘子里划着小船，唱着歌，过着快乐的生活。



小船跟一寸法师的有点儿相似啊！

蟾蜍妈妈觉得拇指姑娘正好可以做她儿子的妻子，于是在一天夜里把拇指姑娘抢走了。虽然在鱼和蝴蝶的帮助下拇指姑娘逃了出来，却又被金龟子拐到了森林的深处。

颤颤巍巍的拇指姑娘得到了田鼠的帮助，和它一起生活在地下的家里。可是不久，有钱的鼹鼠又跑过来向她求婚，拇指姑娘不知如何是好。正好在这个时候，拇指姑娘救了一只病倒的小燕子，她细心地照顾着这只小燕子，终于把它救活了。康复了的小燕子对拇指姑娘说：“你是一个多么善良的小姑娘啊，为了感谢你我带你去南方吧，那是一个非常快活的好地方。”



拇指姑娘不忍心丢下田鼠，拒绝了小燕子的邀请。可是鼹鼠逼着结婚，拇指姑娘什么办法都没有，每天只知道哭。这时候小燕子再次飞了回来把拇指姑娘救了出来。在南方的

“花园国度”里拇指姑娘遇见了和她差不多大小的王子，并和他结了婚。他们收到了作为结婚礼物的翅膀，过着幸福的生活。



做鼹鼠的妻子不好吧。

每天只能生活在黑暗的地下，连花儿都没有。



贯太所在的日本综合科学大学

山根，讚岐教授所说的重要的事情是指公演的事情吗？

应该是吧。

在哪儿公演呢，好期待啊！

啊！

哈！

一定是在可以容纳 1000 人，有两层座位，音响效果超级棒的……

哇！

太妙了！

没有吧？

啊，有了！
教授的研究室！

研究室

讚岐

咚！

咚！

请进！

你好！

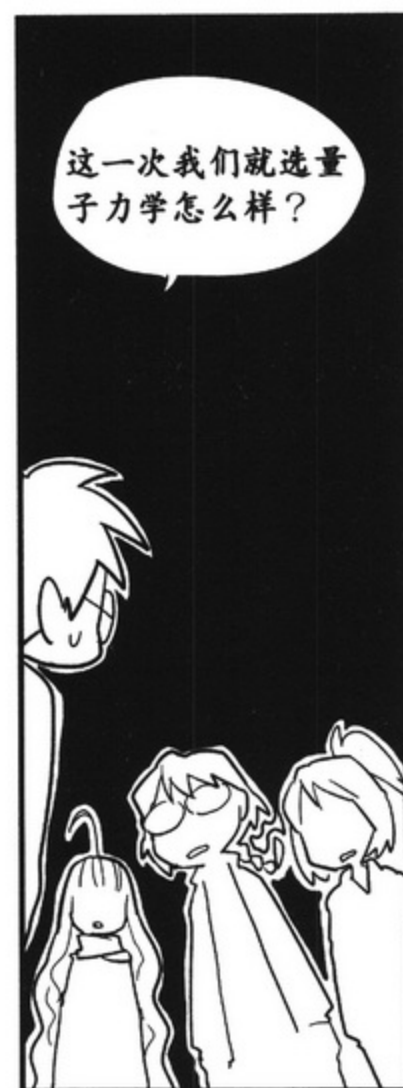
哇！

打扰了！



经讨论决定，下一次，你们大家将和我们大学共同演出。地点是市民会馆的大厅。当我跟周围的人们提出这个想法的时候，他们不仅非常赞同支持我的提议，而且还要带亲朋好友前来观看。





♣ 所谓的量子力学，到底是什么 ♣

♣ 研究量的最小单位量子的科学 ♣

得到了让人不解的小槌子，小蕉、格洛里亚、山根三个小姑娘开始了探索物质真正面目的旅程。在这之前，我要先跟大家简单地说明一下，作为这本书主题的量子力学是一门怎样的科学。可能会跟接下来的漫画、文章有重复的地方，可以先像浏览目录一样，轻松地阅读一下。

所谓的量子力学，就像贯太所说的，是探索极小（微观）世界的科学，对于它的研究是从分子及原子的发现开始的。到19世纪末的研究成果表明，存在这样一些作为所有物质的最小构成单位的“零件”，它们的不同组合构成了世间万物。

可是在这里问题产生了。

随着对原子的研究的深入，人们发现最初对原子的定义——无法继续分割的最小的粒子——是错误的，原子似乎还可以继续分解。

按照正常的思维方式，得到这样的结论是显而易见的。

如果原子是像鬼怪一样模糊不清的东西，那么当被告知“无法继续分割”时，也就老老实实的认可了，但是如果实际上存在像粒子一样的“东西”人们自然就会想：“那么，把它分解开的话会怎么样呢？”于是进入20世纪之后，探索原子内部结构的真正的研究就开始了。这一研究与探索世间所有现象，不仅仅指物质，还包括能量、时间等的量子论有着直接的联系。

笼统地说，到那时为止是关于量子力学故事的第一幕。

♣ 用相对论无法解释量子 ♣

原子是由原子核和电子构成的这一发现是进入20世纪10年之后的事情。这也是下一个疑问的新的出发点。用那之前的物理学的常识来思考的话，拥有这样的构造的原子的存在是不可能的。

在很长一段时间，人们都坚信由牛顿于18世纪总结出来的牛顿力学理论可以完美地说明世间的所有现象。正因如此，19世纪时，人们甚至认为已经没有必要再继续研究物理学了。

可是，进入20世纪后，爱因斯坦提出了相对论（1905年提出了狭义相对论，1915~1916

年提出了广义相对论)。相对论的提出表明，要用宏观的观点来观察自然界，需要超越牛顿力学的新的理论。可是，用相对论并不能解释微观世界的原子内部。

例如，以下这些情况。

- 按照古典物理学理论，围绕原子核高速旋转的电子会因能量的迅速流失而脱落。可是电子并没有掉落下来。
- 当被原子核束缚住的电子降到更低的能量级时，想要连续地改变这一过程所产生的能量的大小是不可能的。
- 无法确定电子应该存在的具体位置。
- 电子同时存在于好几个不同的地方。
- 在什么都没有的真空中电子会突然出现。

一直以来的物理学的常识认为，所有的“物质”，只要知道它现在的位置及如何运动，就可以明确地判断出经过一定时间后它所在的位置。所以在利用时刻表的铁道侦探故事中，不在现场的证据和寻找它的过程就成了故事的中心。像电子这么小的东西，“1小时之前坐上了东海道新干线，现在却出现在了冲绳”之类的事情是很平常的（虽然这是极其夸张的表现手法）。

也就是说人们对微小的世界还不太了解，它们是按照与以往完全不同的全新的物理法则形成的。那么，到底是怎么一回事呢？由这一疑问开始，产生了量子力学这一门科学，进入19世纪20年代，这一门科学的研究产生了飞跃性的进展。

这可以说是知识的革命。而且现在诺贝尔物理学奖的获得者基本上都是与量子力学有关的领域的研究者。顺便说一下，日本获得者汤川秀树、朝永振一郎、江琦玲于奈、小柴昌俊、小林诚、益川敏英全部都是这个领域的研究者。

虽然量子力学与相对论被并列为20世纪的物理学代表理论，而实际上爱因斯坦的相对论是属于“古典物理学”的，今后重大的物理学发现还得依靠量子力学。21世纪，将会形成新的融合量子力学及相对论的量子重力理论，进而发展成超大统一理论。扩展到整个宇宙，关于如何产生像“负重力”一样在宇宙中发挥作用，却仍然是谜团的暗能量、宏观模式等特异现象的强烈的重力场，用爱因斯坦的理论是无法解释的。正因为如此，根据量子力学的内容来对相对论进行修改的话，毫无疑问，一定能够成为人类文明史上至高无上的文化之一。

◆ 即使无法理解理论知识也希望可以享受其中的乐趣 ◆

终于要开始对这个神秘而充满魅力的量子力学世界进行探索了。由于关于原子内部构造的内容直到高中《物理Ⅱ》才开始学到，可能大多数读者对于其详细内容还不太了解。因此，漫画将会从非常初级的内容开始说明，对于故事当中出现的重要的基础名词也进行了总结。现阶段不用勉强地去阅读，在这之后的内容当中，如果还有不明白的地方，可以返回来再读，用作参考。

● 分子 (molecule)

关于分子，有这样的解释：

决定这种物质的化学性质，可以独立存在的最小的微粒。

就是这样，例如水的分子是由氢原子和氧原子构成的，决定水的性质（沸点、熔点、黏性等）的最终还是水的构造，水与氢原子和氧原子是完全不同的物质。而且，氢原子和氧原子在地球上并不可能单独存在，两者都分别由两个原子成对而构成氢分子和氧分子。

顺带说一下，如果氧以原子状态存在的话，反应会极其强烈，比剧毒还要危险。

● 元素 (element) 和原子 (atom)

对于元素的解释是：

构成存在于宇宙空间的物质，化学上无法分解的成分。作为自然物而存在的元素有 92 种。

对于原子的解释是：

在不丧失元素特性的范围内的最微小的微粒。分子由原子构成。

也就是说，元素是构成物质的最小单位的种类，它的成分被称为原子。

● 基本粒子 (subatomic particle、elementary particle)

所谓的基本粒子，正如其名，是构成所有物质的“基本”的粒子，很早以前原子被认为是这个“基本粒子”。然而，当人们发现原子也是由微小的粒子构成的之后，原子就失去了基本粒子的称号。

之后，随着量子力学研究的发展，发现了几个可以作为基本粒子的候补粒子。

不是其他物质的混合物，是构成物质·电磁场的基本的微粒，如质子、中子、介子等。

至于质子和中子是否属于基本粒子，学者们的意见也有分歧。由于很难定义，这本书中将尽可能地不使用“基本粒子”这个术语。

● 量子 (quantum)

是物质、能量等所含有的物理量的最小单位量。为了明确它到底是怎样一种东西而开始的学科最初被称为量子论 (quantum theory)，现在，为了将它与量子世界里的古典力学进行区分，而一般被称为量子力学 (quantum mechanics)。本书也因此统称为量子力学。

Q. 基本粒子和量子，有何不同？

A.

基本粒子是物理上存在的最小单位的微粒。与此相比，量子原本只是概念上的存在，“大脑中想象出来的假定的单位量”是它的开始。草率一点儿说的话，也就是基本粒子是现实中的最小单位，而量子是假想的基本单位。随着研究的发展，基本粒子的名称由原子变成了更加小的微粒，量子的实际存在也得到了确定。

◆ 连续与非连续，或者说“离散” ◆

在学习量子力学的过程中尤其重要的是“离散”。通常情况下，被测定的数据是连续地发生变化的。例如汽车在发动以后，其速度是从0开始，到时速1千米，2千米，3千米这样渐渐地加速的。当然，这当中还有1.1千米、1.2345678千米……等的速度。也就是说，我们可以看出加速前进的自行车的速度是连续发生变化的。

然而在量子的世界里，这样的常识是行不通的，1千米之后是2千米，然后是3千米，像这样很多时候只能得到非连续的数据。也就是像上台阶一样一个阶段一个阶段的上升。由于得到的数值是不连续的，于是便把这种情况称为“离散”或者“分散”等。

● 物理学与化学

物理是：

关于物质的性质、构造，物体的运动、相互作用和能量的性质的法则。

而探索其法则并形成理论的物理学被定义为是：

研究物质的性质和构造，运动、热量、光、声音、电、磁等的状态和作用的科学。

与此相对，化学是：

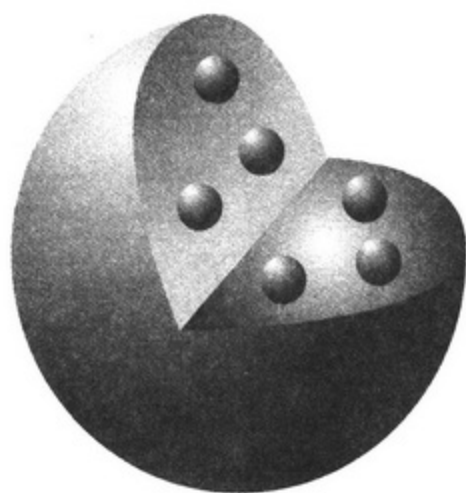
自然科学的一类，是研究物质的构造、性质及物质间变化的科学。

现在，虽然量子力学被认为是物理学的一个领域，在发展时期，物理学和化学交织在一起，反复进行着“假说—实证—建立理论”的过程。

接下来，就让我们一起打开量子力学的大门吧！

第 1 章

一半的一半的一半的……





1.1 永远都不会结束的悖论





阿基里斯
古代希腊诗人荷马的叙事诗
《伊利亚特》中的主人公。



阿基里斯腱来源于古代希腊神话中出现的人物——阿基里斯。在他小的时候，他的母亲将他的身体浸泡在具有魔力的河水里而让他拥有了不死的身躯。可是，脚踝的部分由于被手攥着而没有能够浸泡到，结果那里就成了最脆弱的地方。



阿基里斯在希腊是有名的飞毛腿。有一天，乌龟把挑战书重重地扔在了他的面前，说：

“无论你跑得有多快，你都追不上先出发的我。”

被行动迟缓的乌龟这么一说，阿基里斯反驳道：“不可能。”于是乌龟画了下面的图，然后解释起来。阿基里斯听了乌龟的解释抱着头说：“我追不上乌龟。”

假设阿基里斯的位置是A，乌龟的起点是B。



当阿基里斯到达B的时候，乌龟移动到了B'。



当阿基里斯到达B'时，乌龟移动到B''的位置。



当阿基里斯到达B''时，乌龟将移动到B'''的位置。



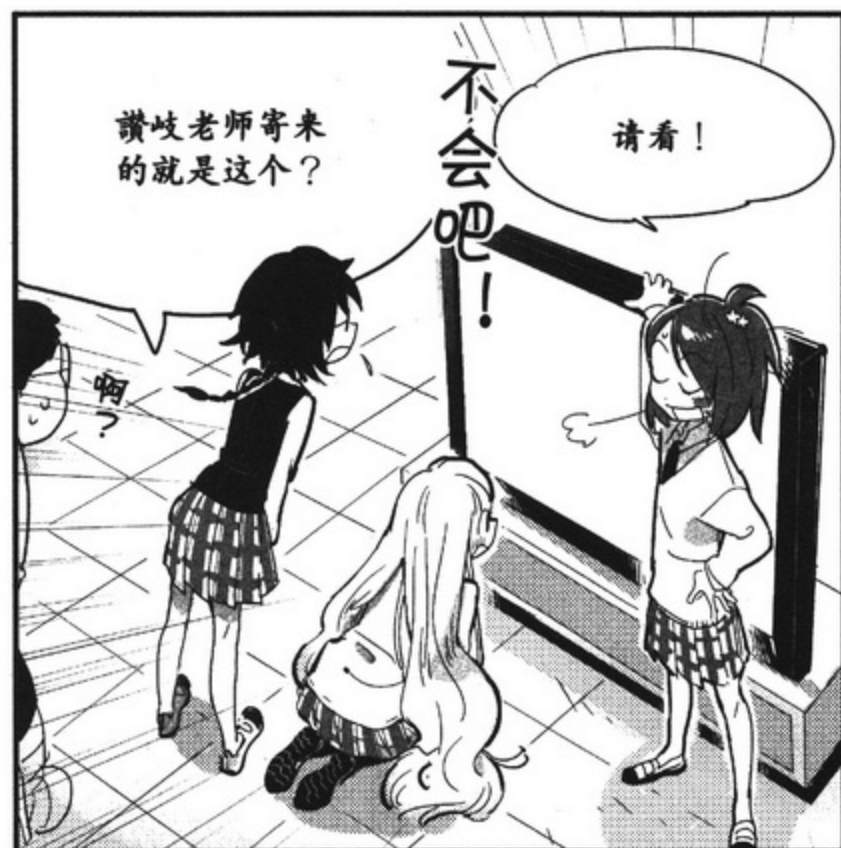
读者们理解了阿基里斯的心情了吗？是不是认为应该马上就可以追上呢？

为什么阿基里斯会认为他追不上乌龟呢？

从计算上来解释，在10秒后阿基里斯追上乌龟的情况下，5秒之后两个人（一个人和一只乌龟）之间的距离是最初的一半。7.5秒（ $=5+2.5$ ）秒后两者之间的距离又变成一半的一半，8.625（ $=5+2.5+1.25$ ）秒后又变成一半一半的一半的……虽然距离在缩短，可是按照这种思维方式，阿基里斯永远都追不上乌龟。

只要时间可以无限分割，距离这种“物质的长度”就可以无限的减半，这种计算方法就能够成立。

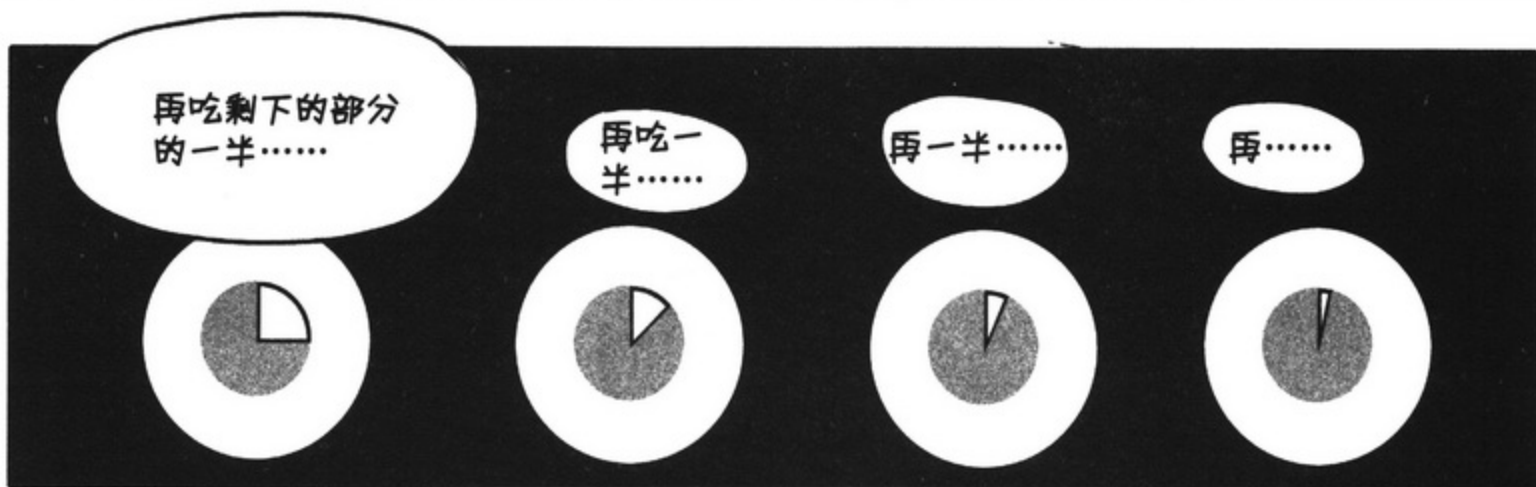
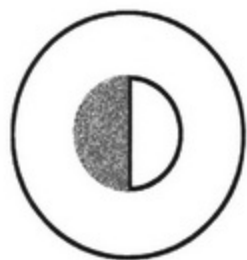












最后就变成原子或者分子了吧……



是啊，学校里学过，物质是由分子和原子构成的。



可是真的是那样吗？



按照日常的感觉，即使把布丁分成两半，布丁也还是布丁啊。



即使变小了，布丁的味道也没有变啊。



即便是像你们说的那样，像这样不就能简单的理解物质是由原子和分子构成的事实吗？

对吧，格洛里亚！



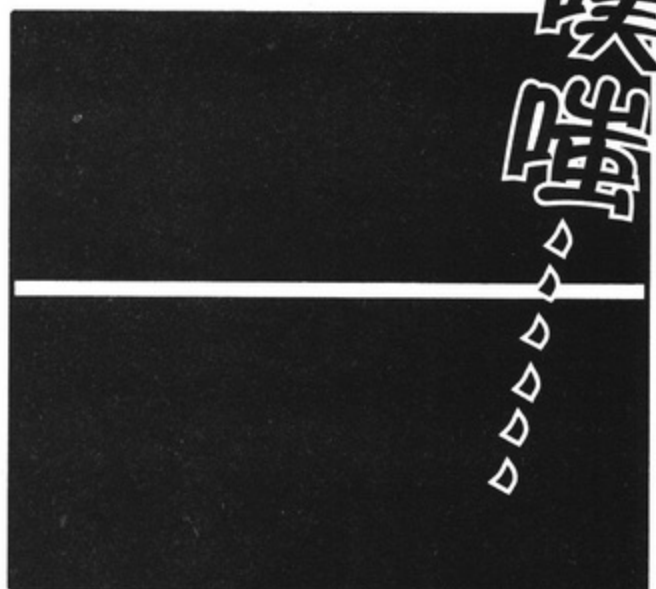
那么我说的是对的啊！

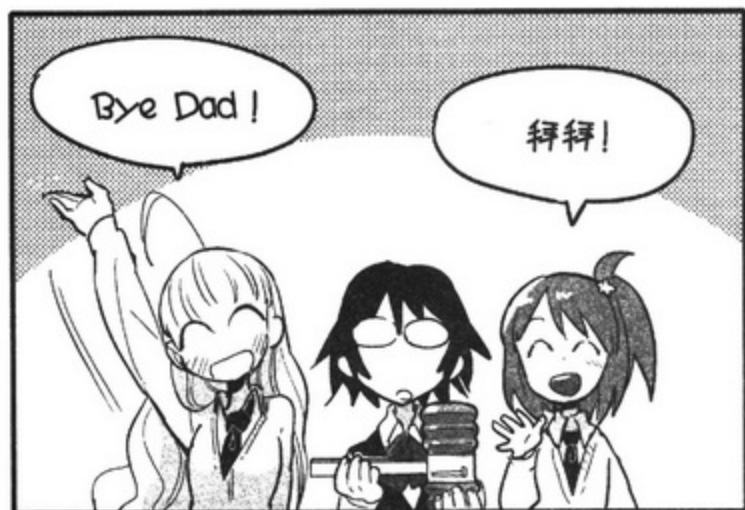


老师，到底谁是对的啊？

嗯……
接下来是山根！







虽然布丁从数学上来说可以无限分割下去……

实际上的物质是不可以的吧。



决定物质性质的是分子。

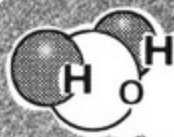


如果把分子对半分开的话，就变成别的物质了。

布丁是由什么分子组成的？

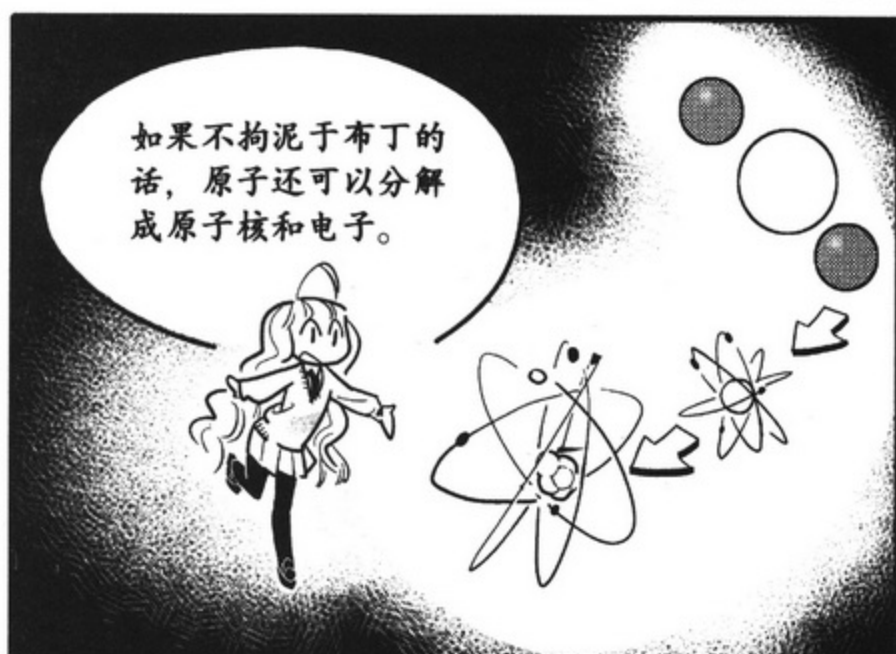
嗯……
材料是牛奶、鸡蛋和砂糖……所以是蛋白质、糖和水……

虽然不知道蛋白质和糖由什么分子组成，我们知道水是由氢原子和氧原子构成的。



分解到原子为止，布丁的悖论就结束了？

如果不拘泥于布丁的话，原子还可以分解成原子核和电子。



那么把原子核也分割成两半的话？

像这样一直分割下去……

那就知道了。

那个谜将用这个音乐小槌来解释……

是吧！

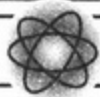
音乐

音乐？

山根——

晕厥

怎么了？
怎么了？



1.3 探索用肉眼无法看见的原子







啊，山根！

太晚了吧！



身体变小了布丁就可以有多少吃多少了啊！

真跟做梦一样，
做梦的话一定会……

啪

啪

啪



吃饱喝足了



只剩下这么一丁点了。

像这样吃下去的话
很快就会没有了。

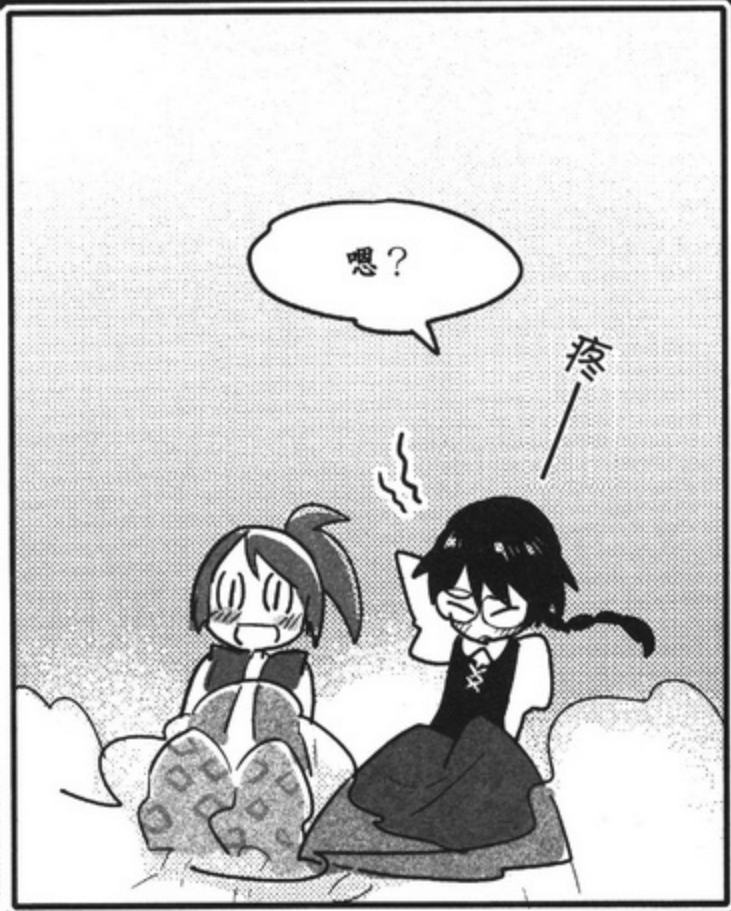
我们可真没有
计划性……

没关系，
没关系！



该是小槌子出场的时候啦！

拿出小槌子！！





已经不可能再变小了吧！



小燕！

快停下来，小燕！被挤扁啦！



被挤扁了



山根，现在正好是机会啊！



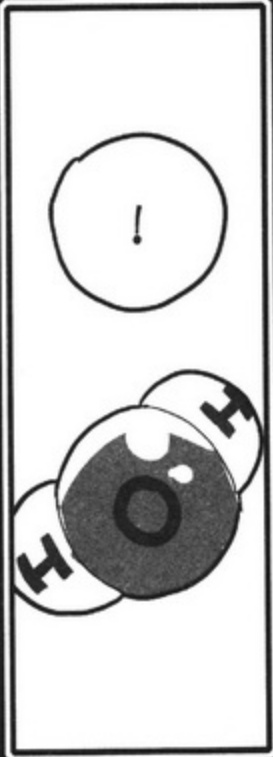
啊？

走好！



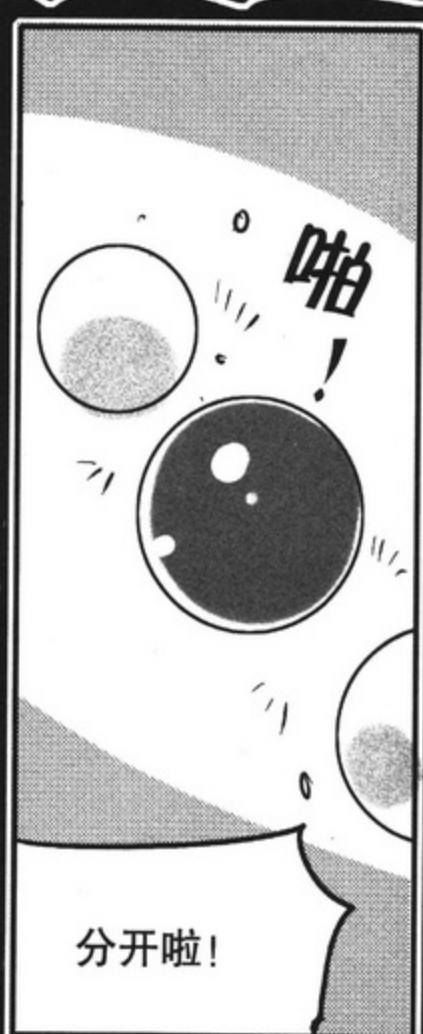
唉！

这……这是……



把这个分开的话……





砰

砰砰

砰!

怎么回事?

被分解开的原子变成了
像云一样的东西!

砰

砰

抓住它们仔细看看!

好的!

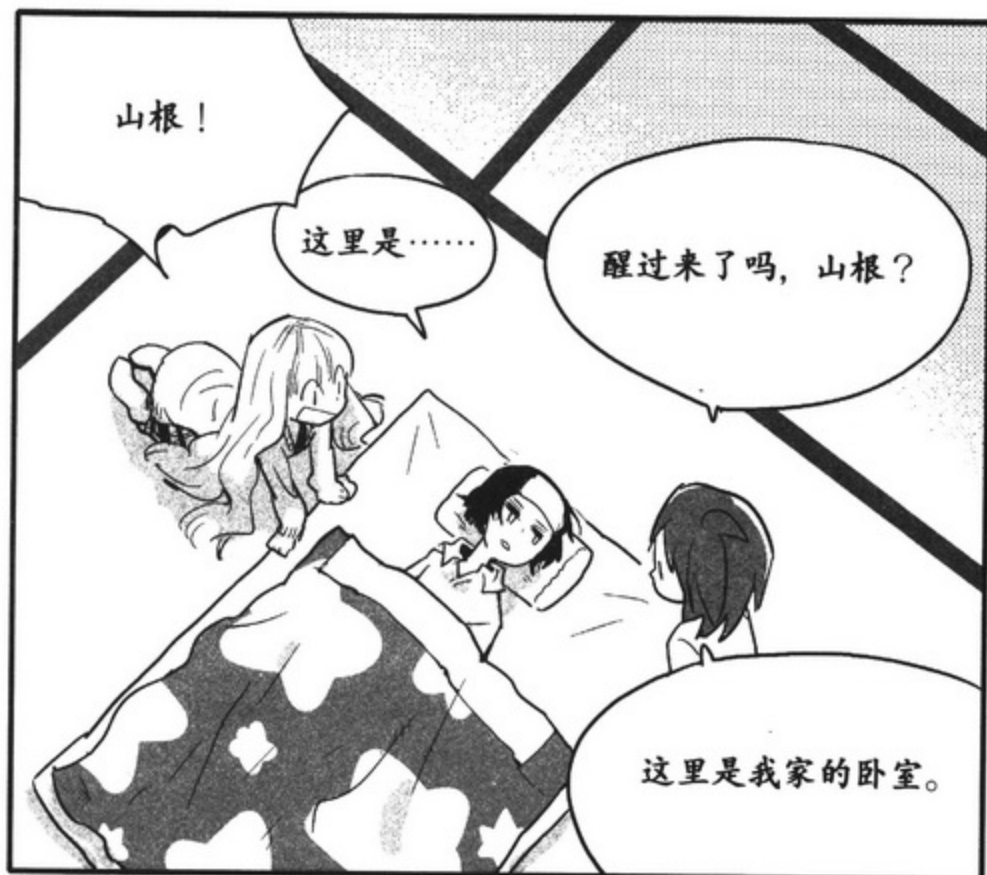
嗖

这是什么呀，
这么快!

等等!

等等!

让我看看里面!







● 可以任意扩大缩小的著名电影

在理科的课程中，大家有没有看过一部叫《Powers of ten》的科学教育电影呢？电影的长度大约 10 分钟，最初的画面是一对男女在公园里进行野餐的场景。不久画面被切割成边长一米的正方形。在电影的前半部分，每隔 10 秒摄像机向后退 10 倍的距离，就像是在向我们展示整个地球，太阳系，然后是整个宇宙。也就是说所谓的 Powers of ten，并不是指“10 的威力”，而是指“10 的乘方（ 10^n ）”的威力。

电影的后半部分，摄像机突然变成从高处向下拍，1 米、0.1 米、0.01 米……开始挑战微观的世界。最后，虽然让我们看到了原子核的内部，可是由于这个作品是在 1977 年录制的，关于微观世界还有很多没有探明的地方，电影最终的结局也不是很明朗。即便是这样，在还没有出现 CG 的时期，能够创作出如此优秀作品的制作者查尔斯 & 雷·伊姆斯夫妇还是很了不起的。

在向他们表示敬意的同时，接下来，我们会教给大家观察微观世界的方法。

● 人的肉眼可以观察到的范围

大约从 1 毫米（ $0.001 \text{ 米} = 10^{-3} \text{ 米}$ ）开始，人们就会觉得“小”了。如果文字变成这么小的话，恐怕是看不清了。

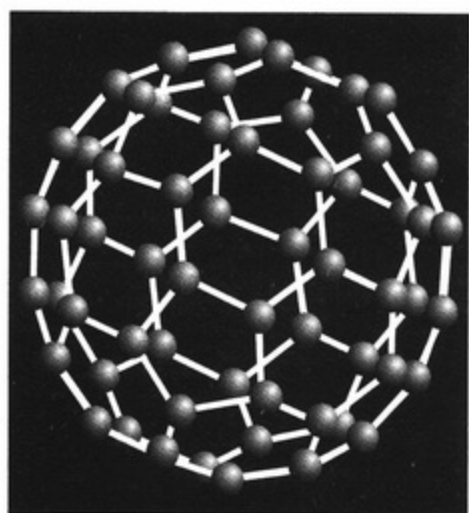
即便如此，由于人的肉眼性能卓越，可以分辨更小的世界。尺子的刻度通常是到 1 毫米为止的，人的肉眼却可以看到它的十分之一。也就是说可以观察到 0.1 毫米的大小。实际上，人眼的分辨率（辨别两个分开的点的析像能力）大约是 0.1 毫米（ $0.0001 = 10^{-4} \text{ 米}$ ）。虱子等的大小就是这个级别的。

可是，这些还不能表明人眼的卓越之处。随着显微镜（光学式）的进步，可视光线的平均波长达到了 500 纳米（ $0.0000005 \text{ 米} = 5 \times 10^{-7} \text{ 米}$ ）。也就是可以观察到病原体

大小的细菌。毫无疑问，高性能显微镜的开发对之后的医学、药理学、物理学的发展起了极大的作用。

● 电子显微镜的进步与局限

那么，与原子论、量子力学相关的分子、原子的长度（大小）单位是多少呢？



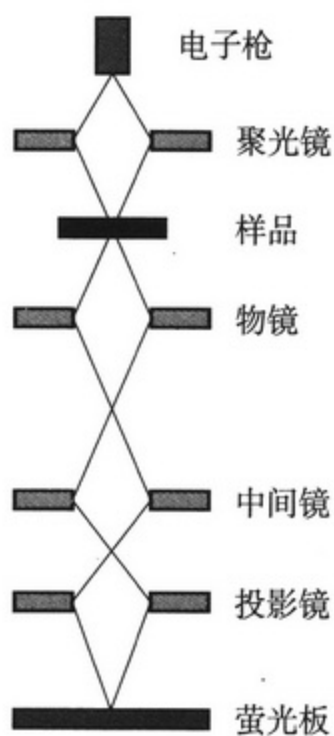
C₆₀ fullerene的模型

自然界里的分子相对来说比较大，以构成蛋白质的碳和氮为主要元素的有机物，例如蛋清的主要成分清蛋白的分子的直径大约是 3×8 纳米。在含有碳元素的分子当中，由60个碳原子联结而成的成球体状的 fullerene 的直径大约是1 纳米。光学显微镜的分辨能力如果还可以提升两位的话就可以直接看见分子，可是这是不可能的。因为可见光线的波长是380~750 纳米，所以从理论上来说这是不可能的。

于是出现了电子显微镜，它被科学家们简称为“电显”，是一种在他们看来极其平常的工具。可是一般的人并不是很了解它的结构与用途。

正如其名，电子显微镜是用来观察电子的。由于它利用电子线（阴极线）在磁场中弯曲的原理来进行扩大，因而被认为具有比光学式显微镜更高的分辨率。它现在的记录是50 微纳米。因为1 纳米=1000 微纳米，所以似乎很快就可以看见原子的世界了，可是结果并不是这样。

原子的直径当中，最小的氢也有50 微纳米。仅从这个数字来看，电子显微镜也只是刚刚能看见。可是，很遗憾，由于原子的内部空荡荡的，位于正中的原子核的直径只有原子直径的十万分之一。因此，即使是最尖端的电子显微镜，也无法观察到原子。



电子显微镜的结构

大小的比较

大小	名称	数值	相应大小的物体
10^{-35}		$1.6 \times 10^{-35} \text{m}$	普朗克长度
10^{-18}	1am		夸克或电子的半径的上限
10^{-15}	1fm		质子的半径
10^{-11}	10pm	49.8pm 53pm	电子显微镜的分辨度的最高纪录（2000年） 波尔半径
10^{-9}	1nm	2nm	DNA 螺旋体的直径
10^{-8}	10nm	90nm	HIV 病毒
10^{-7}	100nm		染色体的大小
10^{-6}	1 μm	6~8 μm	人体红细胞的直径
10^{-5}	10 μm	80 μm	人体毛发的平均宽度
10^{-3}	1mm	1.5mm	一枚硬币的厚度
10^{-2}	1cm	2cm	一枚硬币的直径
10^0	1m	1m	超短波的最短波长（300MHz）
10^3	1km	8848m	珠穆朗玛峰的海拔
10^5	100km	111km	地球纬度中一度的长度
10^7	10Mm	40075km	地球赤道的长度
10^8	100Mm	299792458km	光 1 秒移动的距离
10^{10}	10Gm	58Gm	地球—火星之间的平均距离
10^{11}	100Gm	$1.49597870 \cdot 10^{11} \text{m}$	1 个天文单位
10^{12}	1Tm	1.4Tm	土星的轨道半径
10^{15}	1Pm	9.46Pm	光一年移动的距离（光年）
10^{19}	10Em	14Em	有太阳的部分的银河系的厚度
10^{20}	100Em	260Em	太阳到银河系的中心的距离
10^{22}	10Zm	22.3Zm	到仙女座银河的距离
10^{26}	100Ym	130Ym（137 亿光年）	用电磁波所能观测到的宇宙的尽头

♣ 如果没有“元素”和“原子” ♣

♣ 如果物质可以无限制地分成两半的话可就麻烦了 ♣



“不停地将布丁分成两半，最后会怎么样呢？”这是我小的时候想过的问题。

以前和现在不一样，当时布丁是非常高级的甜点。所以那个时期的孩子们为了能够更长时间的品尝布丁，紧紧地握着勺子迟迟不肯动手。

现实生活中，当布丁只剩下无法再舀出的一丁点儿的时候，孩子们的梦想就彻底破灭了，可是如果有还可以继续舀出布丁的工具的话会怎么样呢？这个既是科学方面的问题也是哲学方面的问题，让我们忘记课本上的内容重新思考一下吧。

我们可以想到以下两个假设。

假设 1

无论怎么细分布丁，布丁还是布丁。

假设 2

无论哪种物质，都是由共同的成分构成的，最终就无法再继续分割了。

假设 1 比较容易理解，无论怎么分割布丁，布丁还是布丁！是啊，实际上不就是这么回事嘛。

可是在这里会出现这样几个问题。

布丁不是只有一种，不同的店和不同的人所做布丁的味道也不一样。再极端一点说，即使是同一个人做的，每一天制作的味道也是不一样的。要是不小心多放了一点糖，做出的布丁就会比平常的要甜。这些不同用假设 1 如何解释呢？

到头来假设 1 只能说明世间的“物的种类”有无限多种。因为不存在一种共同的成分，所以也就没有办法了。

严谨地说，布丁的上部和下部的味道也是不一样的。多数情况之下，凝固的时候糖分会集中在下部，因此会比其他的部分要甜一点。相反，脂肪都集中在上部。像这样，同一个布丁当中也存在着各种各样的“物质”。听起来好像很复杂啊！

而且，布丁是将牛奶、鸡蛋和砂糖混合在一起，加热之后凝固而成的。凝固之前的液体状态和凝固之后其内部结构的变化用假设 1 是无法解释的。混合可可之后做出来的巧克力布丁呢？将液体状态的布丁直接冷冻的话会怎样呢？……在验证物质的真正面目方面起不了任何作用。

也就是说，“物质可以无限分割”的说法，在考虑物质的构成方面是不合适的。

◆ 似乎存在共同的“成分”和结合的“原则” ◆

仍然继续布丁的话题。

将作为原料的牛奶和鸡蛋、砂糖放在炒锅里加热之后，所有的东西最后都变成漆黑的炭。如果细心地操作的话会变成干爽的粉末，至于哪个是最初的牛奶，哪个是最初的砂糖已经无法分清了。

由上面的操作我们会想，这三种原料当中是不是存在着相似的成分呢？它们当中可能存在“共同的成分”，由于构成方式的差别而形成了不同的形状。这一发现与假设 2 是有紧密联系的。

由于牛奶和鸡蛋的构成过于复杂，接下来我们用盐水（食盐水）作为替代进行思考。

将盐水煮沸之后最后会变成盐，将产生的气体冷却之后可以得到蒸馏水，小学时做的实验也能得到同样的结果。无论在哪里，不管是谁做都能得到同样的结果。

话题再转回来。

将刚刚得到的水进行电分解之后可以得到氢和氧。而且它们的比例（体积比）一定是 2 比 1。无论什么样的水，日本的水也好，欧洲的水也好得到的结果都是一样的。也就是水的再现性让我们明白，水这种物质是由 2 个氢和一个氧构成的。

“哎呀，不要说那么绝对的话，偶尔用 2.1 的氢和 0.9 的氧组成水也没什么吧。”即便有人这样认为，自然界也会固执的将这一比率进行到底。

如果是那样的话，溶解在水里的盐又能够从水里分离出来，盐水里的氢和氧还能够按照同样的比率分离出来是怎么回事呢？我忘了说明了，盐在常温的情况下只有 28%（重量比）可以溶解在水里，这个数值也具有再现性，是绝对的事实。

以上这些事实积累起来我们不难想象，世间的所有的物质都是由几种相同的成分组成的，

而且它们是按照一定的明确的规律组合起来的。从看起来完全不同，味道也完全不同的鸡蛋、牛奶、砂糖最终变成炭的事实我们不难猜想，“构成物质的成分”可能比我们想象的要少。

仔细的观察，研究“物质”，最后就能够发现假设 2 中的“共同的成分 = 元素”的存在。这是即使不通过课本也能够理解的理论之一。

♣ “万物之源”是水、空气还是土？♣

关于万物之源，当我们发现了元素的存在之后，当然接下来就该提出“它们是什么呢？”的疑问了。

寻求这个问题答案的人从古至今不可计数。然而在这个领域出类拔萃的还是古希腊。关于地球和宇宙的研究也是这样。在一定程度上，古希腊的学术研究是自由的，而且在科学和哲学共同有很大发展的公元前 8 世纪 ~ 公元前 2 世纪这段时期，古希腊是一个很发达的国家。

第一个给元素定义的是哲学家泰勒斯（公元前 624 年 ~ 公元前 546 年前后），他认为万物之源是水。这是一种认为所有的物质都是由水构成的并最终还原成水的思想。

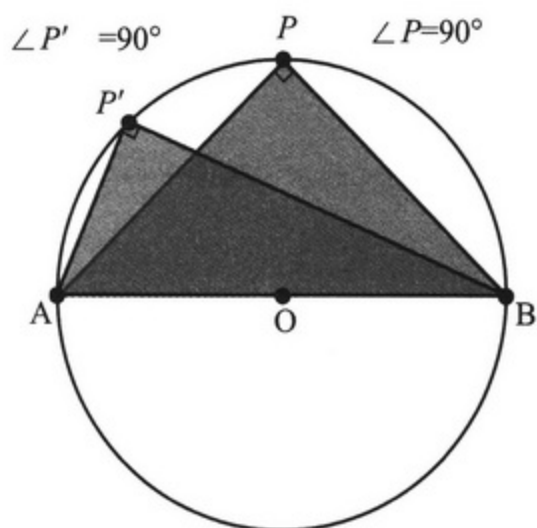
人们可能更加熟悉泰勒斯提出的“直径所对的圆周角是直角”的定理。虽然泰勒斯拥有丰富的科学知识，虽然这么说不太好，可是他的“元素 = 水”的观点真的只是胡猜。其证据是，同一时期的哲学家，有的人认为万物的根源是空气，有的人为是火，还有的认为是土，意见并不统一。简单地说，他们只是对此深信不疑而已。

即便如此，他们这种为了弄清物质的本质的追求真理的态度是值得赞赏的。这之后很长很长一段时间都没有人如此认真地考虑过这个问题。

♣ 在古希腊也没有得到发展的原子论 ♣

当查阅元素论的历史的时候，提到古希腊哲学家、医生、诗人、政治家（总之头衔很多！）恩培多克勒（约公元前 490 年 ~ 公元前 430 年）的思想的内容比较多。他的观点是，物质的根源并不是只有一种，而是火、水、土和空气四种元素。

什么呀，只是把他之前的人们的观点总结了一下而已，作为泰勒斯之后 20 年的人物来说，



泰勒斯定理

做出这样的工作给人一种偷工减料的印象。实际上并不是这样。不管是水、空气还是火，认为“arkhe（元素）的种类只有一种”的观点怎么都让人觉得带有宗教的色彩，其科学性让人怀疑。与此相比，恩培多克勒认为“万物是由火、水、土和空气四种元素反复进行结合和离散的过程”。这是与之后（一直以后）的原子论密切相连的思想。

另一方面，跟恩培多克勒不同，也有这样的人，他们在思考万物根源的时候并不拘泥于“具体是什么”。其中之一是和泰勒斯同一时代的哲学家阿那克西曼德（约公元前610年~公元前546年）。他认为万物的根源是“无限定（不是具有固定性质的东西）”。“无限定”比水要小，且只是概念上的存在，一切有限的物质都是由它而生的。乍一看会觉得这种观点和“物质可以无限分割”的理论很相似，而实际上它是认为将物质无限分解之后最终会得到某种相同的物质，其想法与“物质可以无限分割”的理论是完全相反的。

之后，把以上这些观点进行总结而提出“所有的物质都是由体积非常小，不可能再继续分解的原子（atom）构成的”的原子论的是哲学家德谟克利特（约公元前460年~公元前370年）。

从元素到原子的思想的转换有很大的意义。为什么这么说呢，那是因为认为元素是万物的根源的观点只是一种很模糊的定义，而原子是更加具体的结构上的存在。简单地说，元素的单位是“种类”而原子的单位是“个”，这是很大的差别。

认为“所有的事情都不是偶然发生的（也就是说依据科学理论而产生的）”德谟克利特的思想可以被认为是现代物理学和化学的基础思想。已经到达这样一个级别了，古代希腊的科学应该是很惊人的吧，可是遗憾的是，原子论的研究在那之后就没有了进展。不仅如此，经过了2000多年，这个领域的研究在历史上完全停了下来。直到17世纪中叶，人类才得到了以下的成果。

当然，这当中也有没有办法的理由。

如果是关于宇宙的疑问，只要能够正确地观测到天体的运动，就能够在一定程度上找到证明假说的提示。实际上，按照这种方法古代希腊估算出了太阳的大小。

然而换成原子的话，进行验证的观测根本无法进行。眼睛再好的人也无法看见原子，所以科学家们即使提出了新的学说也只是画饼充饥。在做这个做那个之间，“物质是由什么构成的？”这一研究课题也被忘得一干二净。

◆ 原子应该是更加具体的东西 ◆

时间迅速前进。

在古希腊学者德谟克利特提出原始的原子论（并不是说笑）之后约2100年，舞台换到了

17 世纪至 18 世纪的欧洲。

众所周知，欧洲的人们从大约 12 世纪开始到艾萨克·牛顿活跃的 17 世纪末为止一直热衷于炼金术。现在返回去再想一想，那种热衷的程度是很不正常的。

不管怎么样，“金子会像火焰一样发光，如果把其他的金属用火长时间燃烧的话一定会变成金子”，于是人们便不分昼夜地燃烧着铁、铅等金属。当时的很多科学家都很认真地这么做着。

在伊斯兰国家，东洋国家也有人尝试过这样的炼金术，但是尝试的人很少，也没有持续这么长的时间。经过尝试之后觉得不可行就立刻放弃了。可是西方的人们，从日本的源平合战时期开始到江户时代中期大约 500 年的时间里，虽然没有任何成果，仍然执著地努力炼着金。

但是，只要努力就能有一定的收获，炼金术的历史让我们得到了很多化学方面的知识。合成和分析技术就是其中的代表。对原子论有用的成果也有不少。

例如，“无论怎么燃烧金属都不能得到金子”的严酷的事实，让我们对德谟克利特的火是元素之一的观点产生了怀疑。当然土也是一样，因为不管什么样的金属，都不会因为埋在土里而变成其他的金属，所以土也不是元素之一。

随着这些知识的积累，因玻意耳 = 马略特定律^{*}而被人们所知的英国化学家罗伯特·玻意耳（1627~1691）明确地对从古希腊开始的“火·水·土·空气”四元素说提出了怀疑，他提出，“根据实验，元素应该是指无法再继续分解的物质”。它的成员最初被认为是硫黄、水银、铜、银等为数不多的物质，这之后一下发现了好几种元素，终于原子的存在得到了肯定，炼金术也并非徒劳。

可是，在发现原子的同时，“原子 = 无法再继续分解的物质的最小单位”的最初的假设也开始受到怀疑。从那以后，量子论以及研究量子运动的量子力学开始发展起来。

※ 气体的压力与体积成反比，与绝对温度成正比的定律

关于“世间万物是由什么构成的”这一疑问，在一定程度上创造了高度文明的地区，从很早开始就已经有人思考过了。与古希腊不同，它们因具有现在所谓的个性而非常有趣。

在印度，在由释迦牟尼的说教总结而成的《佛典》里出现的哲学家阿耨多翅舍钦婆罗认为，“构成‘存在’的是地、水、火、风，除此四者之外就没有了”。如果和释迦牟尼是同一时代的话他就是公元前五世纪左右的人物，可能和恩培多克勒的时代相同。这样的话，我们可以发现不同地方的人们也有相似的想法。

可是，这个阿耨多翅舍钦婆罗（真长！）在《佛典》当中被认为是“劣等的思想家”。这之后的印度哲学认为生物（不是万物）的构成要素是“地、水、火、风、苦、乐、灵魂、虚空、得、失、生、死”这12种，可见印度文明是宗教而不是科学优先的。我个人认为，“苦乐”是人类（人也是生物）的构成要素的想法是正确的。

像中国也有三藏法师和孙悟空的故事一样，中国和印度从古代开始就进行着文化的交流，元素论因此也在中国得到了发展。虽然最终“接受模棱两可的东西的印度文化和喜欢干脆清楚的中国文化之间产生了很大的区别，在中国却总结出了万物是由“木、火、水、金、土”五大元素构成的五行思想，至今仍广为流传，当然并不是作为科学，而是反映在哲学和生活习惯当中。“在房子朝南的方向装饰上与火相通的红色的东西会带来好运”的风水之说的根源也在于此。但是由于五行思想过于体系化而并没有发展成原子论。

可以称之为古希腊的“直系”文明的实际上并不是欧洲而是伊斯兰。保留下来的很多书籍也都主要在伊斯兰国家得到有效的应用。可是最终却由于神学力量的强大而偏离了德谟克利特的科学理论。

地 水
火 风
苦 乐

● 五行思想的例子

五行思想是将世界上的事物分成五类，然后分组并把它们联系起来的思想。将东西南北，春夏秋冬这样只能分成四类的类别里添加上第五种要素这点上具有重大的意义，即使在现在也过时。是与扑克当中的大王类似的角色（可能）。

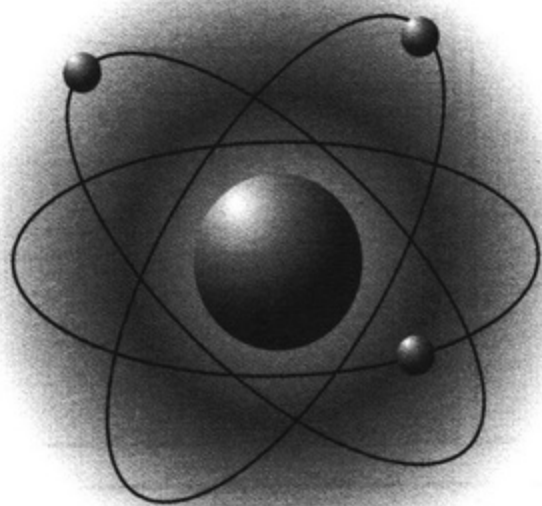
五行	木	火	土	金	水
五色	青	红（朱）	黄	白	黑
五方	东	南	中	西	北
五时	春	夏	土用	秋	冬
五声	呼	言	歌	哭	呻
五情	喜	乐	怨	怒	哀
五尘	色（视觉）	触（触觉）	香（嗅觉）	味（味觉）	声（听觉）
五味	酸	苦	甜	辣	咸
五事	貌	视	思	言	听
五常	仁	礼	信	义	智

五行思想的例子

这一思想是如何运用于日常生活中的呢？基本上来说是重视纵向的排列，“春天吃刚上市的东西时，面朝东方微笑着（高兴地）吃的话，会招来福气”，像这样让它们之间联系起来。只是并不是所有的纵向的排列都可以联系起来，偶尔也可以使用别的列的要素……实际上这些提示就是关键。虽然这与算卦先生的生意有着直接的联系，却渐渐地远离了原子论。这也是没有办法的事情吧。

第2章

当原子不再是“不可分割”的



2.1 原子的组合构成物质

日本综合科学大学

原子这东西果然只靠我们自己
是明白不了的啊！

讚岐教授的出差时间还
被延长了，可怎么办啊！

这里就是讚岐教授说的代替
他给我们讲解原子结构的老师
的实验室了。

研究室

九尾

又不是我的错！

怎么了，赶紧敲门啊！

就是因为这个老师的课
我才要留级的，怎么进
去啊……

阴沉沉的

你好！

啊——

梆的

声

欢迎啊！

听讚岐老师说了，你们
想知道原子的结构吧！

日本综合科学大学
准教授
九尾真理

是个女老师啊！

真漂亮！

贯太!

害怕

是!

你也和他们一起来学习吧!

这样的话就可以补考而不用留级了啊!

啪

真的吗?

如果认为量子力学只要记住结论就可以的话,那就大错特错了。

重要的是要理解得到这个结论的过程。

嘎吱嘎吱

这可以说是任何学科都通用的。

我记得就是在这里……

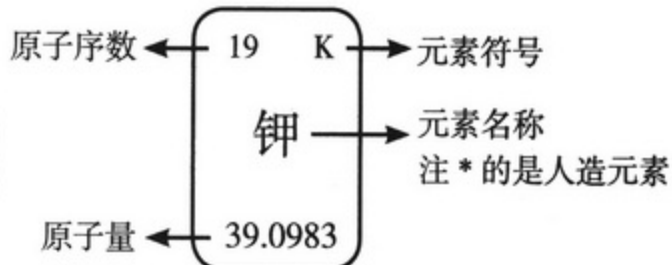
太好了,哥哥!



元素周期表



右边是这个周期表的表示方法。



族 I_A

周期 1

1 H
氢
1.00794 (7)

II_A

2

3 Li
锂
6.941 (2)

4 Be
铍
9.012182 (3)

3

11 Na
钠
22.989770 (2)

12 Mg
镁
24.3050 (6)

4

19 K
钾
39.0983 (1)

20 Ca
钙
40.078 (4)

III_B 21 Sc
钪
44.955910 (8)

IV_B 22 Ti
钛
47.867 (1)

V_B 23 V
钒
50.9415 (1)

VI_B 24 Cr
铬
51.9961 (6)

VII_B 25 Mn
锰
54.938049 (9)

VIII 26 Fe
铁
55.845 (2)

VIII 27 Co
钴
58.933200 (9)

5

37 Rb
铷
85.4678 (3)

38 Sr
锶
87.62 (1)

39 Y
钇
88.90585 (2)

40 Zr
锆
91.224 (2)

41 Nb
铌
92.90638 (2)

42 Mo
钼
95.94 (1)

43 Tc
锝
(97, 99)

44 Ru
钌
101.07 (2)

45 Rh
铑
102.90550 (2)

6

55 Cs
铯
132.90545 (2)

56 Ba
钡
137.327 (7)

57—71
La—Lu
镧系

72 Hf
铪
178.49 (2)

73 Ta
钽
180.9479 (1)

74 W
钨
183.84 (1)

75 Re
铼
186.207 (1)

76 Os
锇
190.23 (3)

77 Ir
铱
192.217 (3)

7

87 Fr
钫
(223)

88 Ra
镭
(226)

89—103
Ac—Lr
锕系

104 Rf
钚*
(261)

105 Db
铼*
(262)

106 Sg
𨭎*
(263)

107 Bh
𨭏*
(264)

108 Hs
𨭐*
(265)

109 Mt
𨭑*
(268)

57 La
镧
138.9055 (2)

58 Ce
铈
140.116 (1)

59 Pr
镨
140.90765 (2)

60 Nd
钕
144.24 (3)

61 Pm
钷*
(147)

62 Sm
钐
150.36 (3)

89 Ac
锕
(227)

90 Th
钍
232.0381 (1)

91 Pa
镤
231.03588 (2)

92 U
铀
238.02891 (3)

93 Np
镎
(237)

94 Pu
钚
(239, 244)



= 常温下是固体

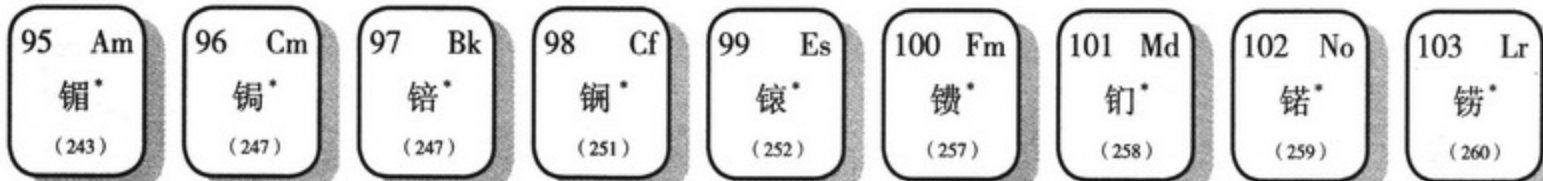
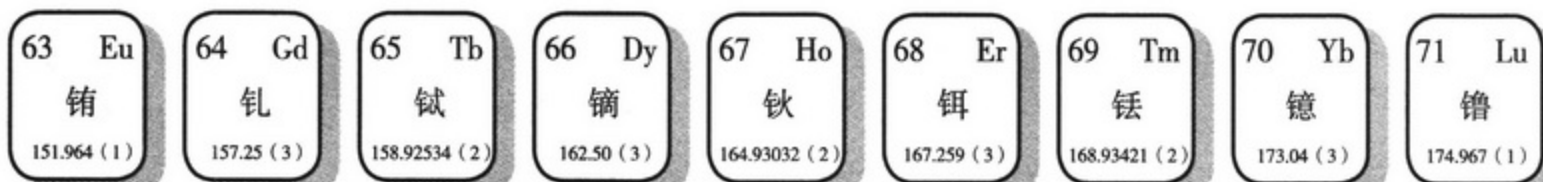
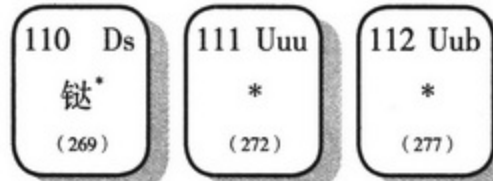
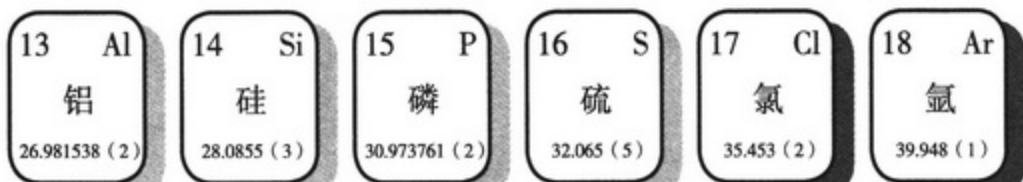
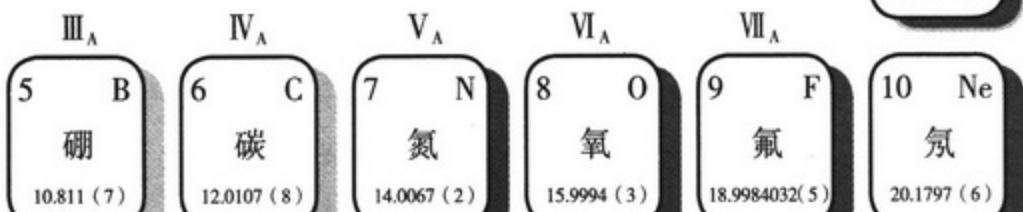
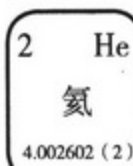


= 常温下是气体



= 常温下是液体

0



注：1. 原子量录自 1999 年国际原子量表，以 ¹²C=12 为基准。原子量的末位数的准确度加注在其后括号内。
2. 括号内数据是天然放射性元素较重要的同位素的质量数或人造元素半衰期最长的同位素的质量数。

虽然从很早以前开始就有人认为：作为万物的构成要素，存在“元素”这样一种东西，可是直到中世纪为止普遍存在的仍然是由火、水、土、空气构成的四元素论。



FIRE

hot

AIR

wet

cold

WATER

另一方面，虽然从古代开始金、银、铜、硫黄、锡、铅、水银、铁等就被人们所熟知，然而学者们却解释不了这些性质完全不同的物质是如何由这四种元素构成的。

确实，只用火、水、土、空气这四种元素的话是造不出来金子的。



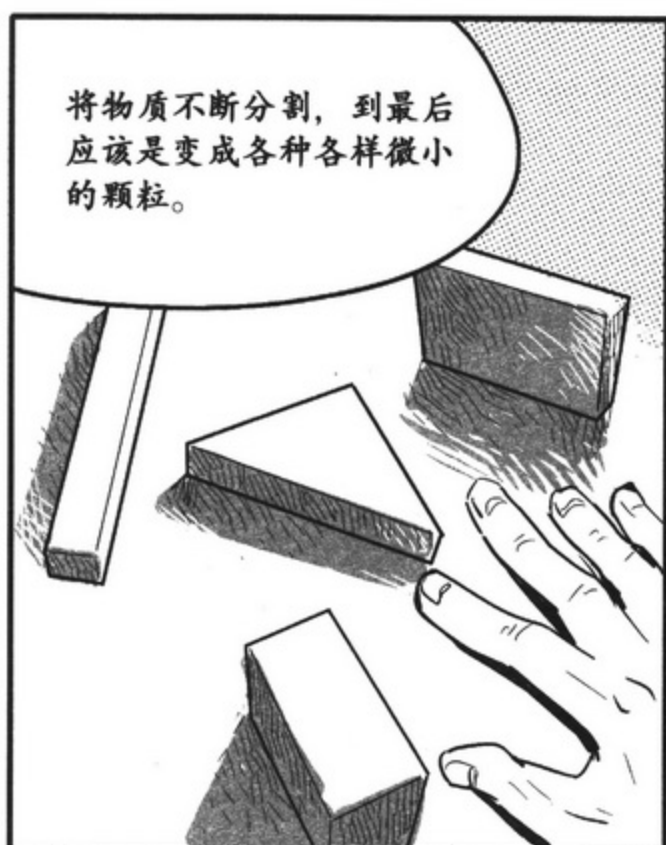
然后直到17世纪，英国化学家玻意耳才终于提出了这样的观点。



物质的构成要素是火或土之类的想法是很奇怪的，一定是某些更加具体的物质。



将物质不断分割，到最后应该是变成各种各样微小的颗粒。



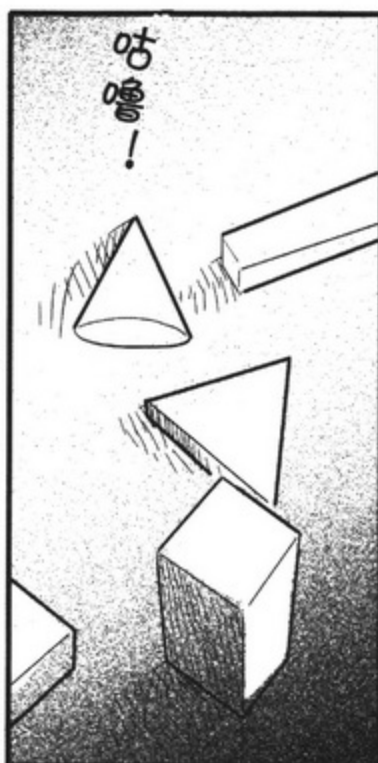
然后将这些微小的颗粒组合起来应该就能构成世间的万物。



而且微小颗粒的运动还可以产生化学反应。



咕噜！




是这样啊！






2.2 天才化学家拉瓦锡的功绩






玻意耳的想法还是值得考虑的。

拉瓦锡 (小蕉)




怎么了呀？

妻子玛丽·波尔兹
(格洛里亚)



如果可以发现元素的话，就可以证明世间万物之间的联系。

也就是说很快就可以找到自然界的秘密了。



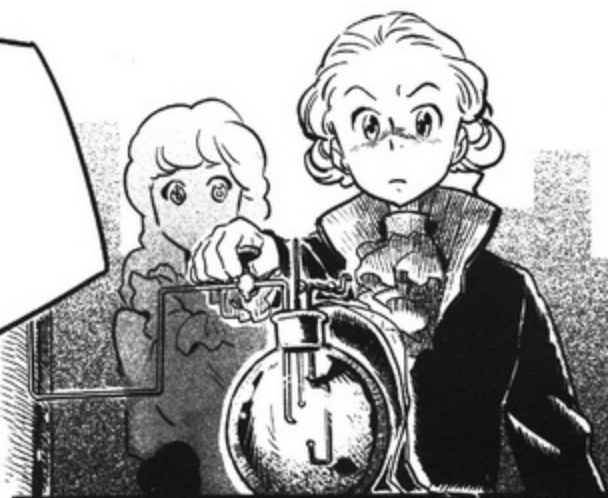
好像挺有趣的啊！我来试着收集与此有关的论文吧。

妻子玛丽·波尔兹是一个非常聪明的女人，不仅帮助丈夫做实验，还翻译最新的科学论文，为后世留下了正确图形的记录，是拉瓦锡研究中不可缺少的得力助手。

那个时候，铁生锈重量就会减轻是常识，可是拉瓦锡却通过实验发现生锈是物质和氧结合氧化的结果，物质生锈之后质量却是增加的。

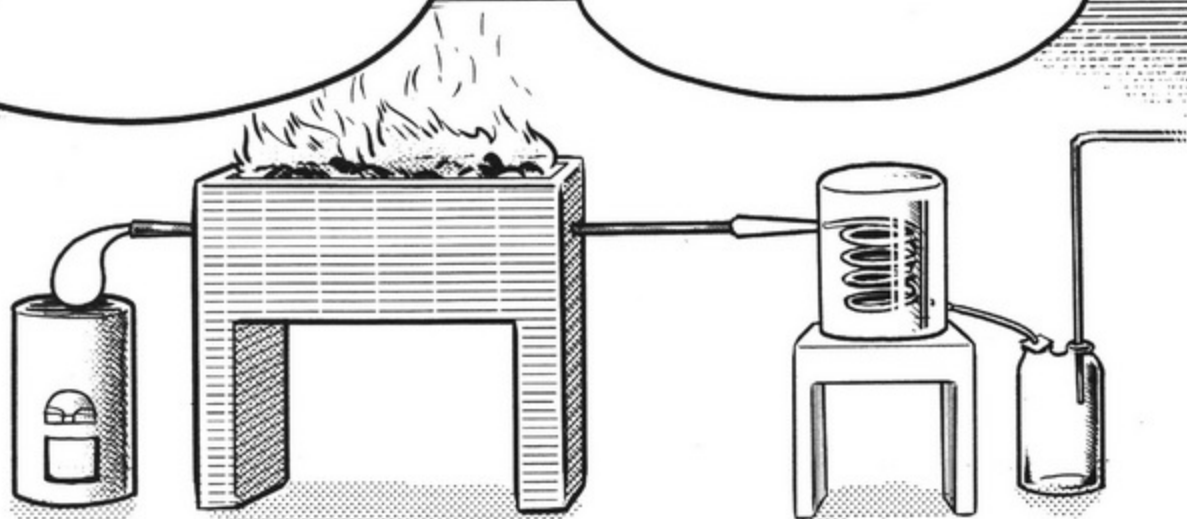


像样了。
确实锈得不



在加热的铁管里注入水蒸气，让它冷却之后得到的水的量减少了。

水到哪里去了呢？

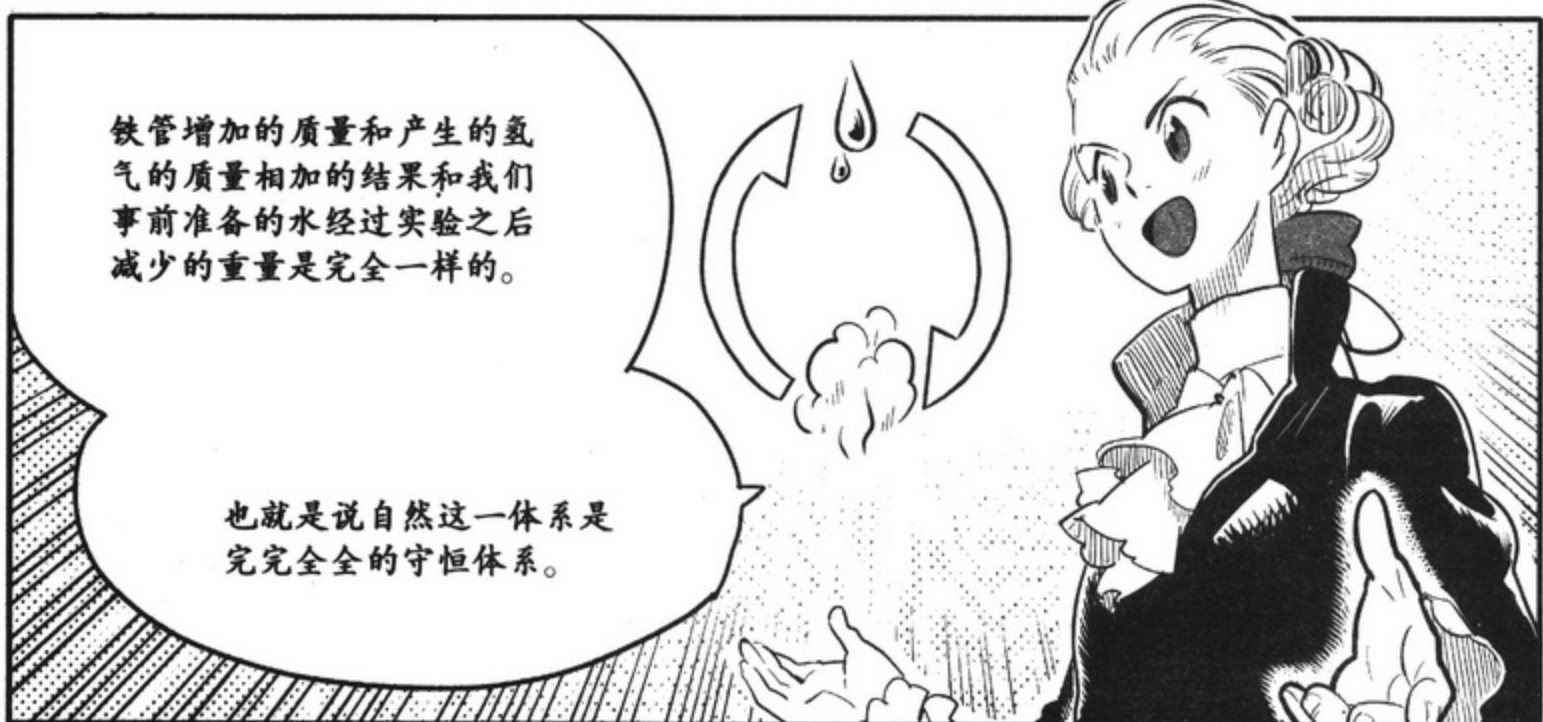


消失了？

不是，实验之后再称铁管的重量，其质量是增加的。

从中我们可以明白，一定是有什么物质和铁结合到一起了。

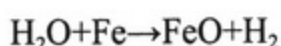




拉瓦锡的元素



拉瓦锡所进行的实验的化学方程式可表示如下



※ 实际上，生锈的铁里也含有 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等。



通过这个实验，证明了作为拉瓦锡的最大发现的质量守恒法则，同时也表明氢、氧比水更适合称之为元素。这之后，他将可以获得的所有物质或加热，或燃烧来进行分解，1789年拉瓦锡将最终发现的33种元素公之于世。

分类	元素
自然界里广泛存在的物质	光、热、氧、氮、氢
非金属物质	硫黄、磷、碳、盐酸基（氯）、氟酸基（氟）、硼酸基
金属物质	铋*、银、铋*、钴*、铜、锡、铁、锰、汞、钨、镍、金、铂、铅、钨、锌
土质	石灰、镁土、钡土、铝土、硅土

拉瓦锡进行分类的元素



真了不起啊！

可是，这个元素表里还含有光和热。



※ 铋、铋、钴属于半金属物质。



热是指现在我们所说的热能。虽然也含有其他的化合物，而拉瓦锡对元素的定义是“利用目前为止所知的方法而无法再继续分解的物质”，所以他可能只是暂时认为它是元素。



相对于火、水、土、空气四元素说来说是很大的进步啊。



利用拉瓦锡的成果，英国化学家，物理学家道尔顿提出了原子学说。

道尔顿的原子学说

1. 同一类原子的各种性质和相对原子质量* 都相同。
2. 化合物是由原子按照一定的比例结合而成的。
3. 化学反应只是原子和原子的结合方式的变化，并不是新的原子的产生或原子的消失。

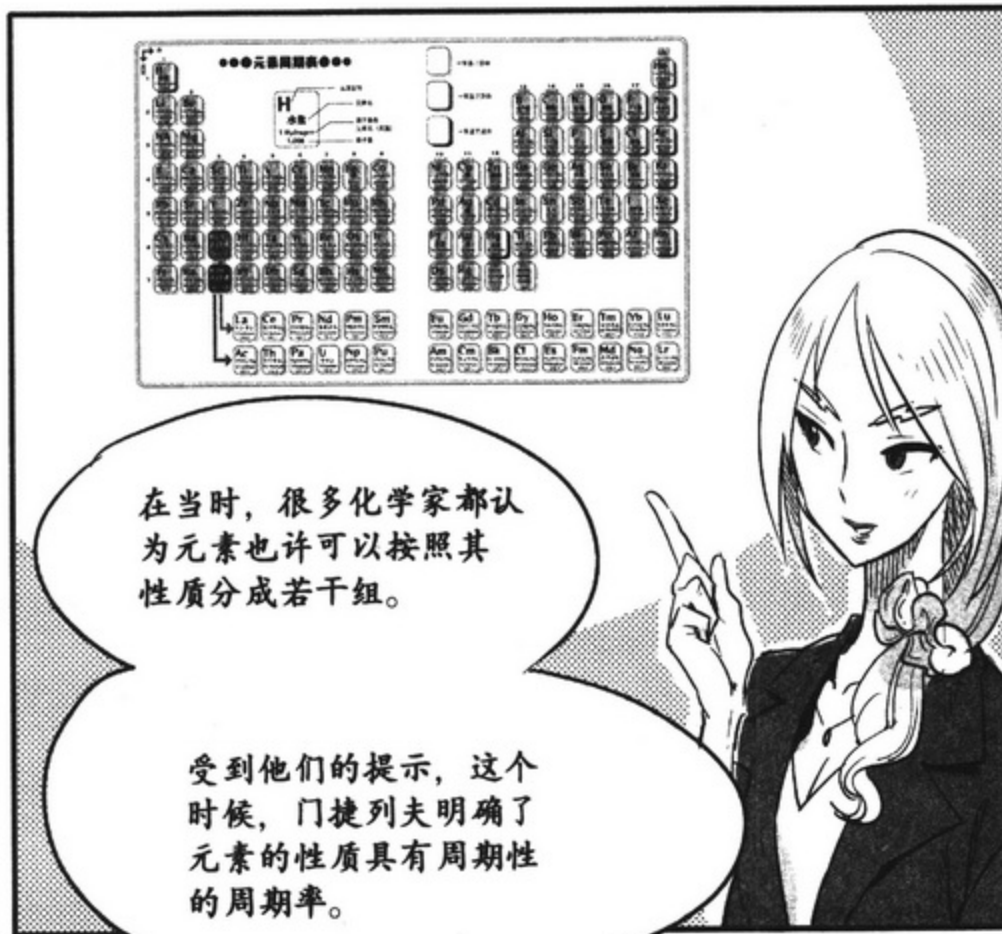
* 相对地表示元素质量的是相对原子质量。



这样就明确了作为概念的元素和作为构成物的原子的定义。



从此便掀起了研究元素的热潮，到 1869 年被发现的元素的数量一下子增加到 64 个。在这里出现的人物的是门捷列夫。



把元素按照原子量的大小顺序排列的话，会发现其性质具有周期性。

I_B
29 Cu
铜
63.546 (3)



47 Ag
银
107.8682
(2)



79 Au
金
196.96655
(2)



具有相似化学特性的元素，元素周期表中纵向排列的元素的原子量几乎是相同的。

按照这个元素周期表，可以预测出目前还没有发现的元素的特性。



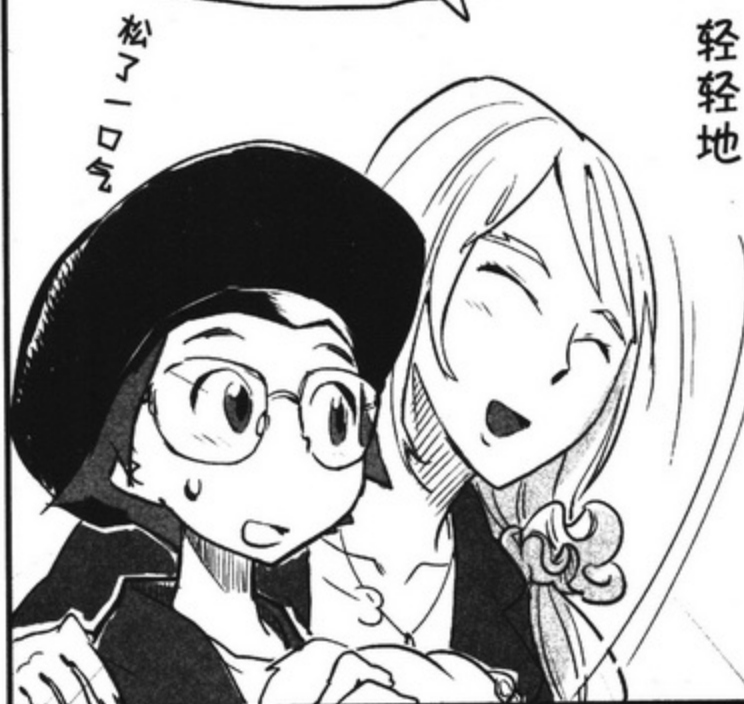
不知道！

请解释的再详细一点！

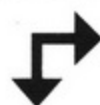
嗯……

我！我！

还是先回到刚刚的周期表吧。
我来教你们如何看元素周期表。



轻轻地



元素周期表 应用篇

门捷列夫的周期表是类似于一览表的表格，而现在的周期表是以他所发现的周期率为基础更加简单易懂地排列出来的。为了更加容易地说明周期性，将纵向的排列从左到右依次分类为 I_A 族元素、II_A 族元素……接下来将简单说明从周期表可以读取的内容。



1	1 H 氢 1.00794 (7)																			
2	3 Li 锂 6.941 (2)	4 Be 铍 9.012182 (3)																		
3	11 Na 钠 22.989770 (2)	12 Mg 镁 24.3050 (6)																		
4	19 K 钾 39.0983 (1)	20 Ca 钙 40.078 (4)	21 Sc 钪 44.955910 (8)	22 Ti 钛 47.867 (1)	23 V 钒 50.9415 (1)	24 Cr 铬 51.9961 (6)	25 Mn 锰 54.938049 (9)	26 Fe 铁 55.845 (2)	27 Co 钴 58.933200 (9)											
5	37 Rb 铷 85.4678 (3)	38 Sr 锶 87.62 (1)	39 Y 钇 88.90585 (2)	40 Zr 锆 91.224 (2)	41 Nb 铌 92.90638 (2)	42 Mo 钼 95.94 (1)	43 Tc 锝 (97, 99)	44 Ru 钌 101.07 (2)	45 Rh 铑 102.90550 (2)											
6	55 Cs 铯 132.90545 (2)	56 Ba 钡 137.327 (7)	57—71 La—Lu 镧系	72 Hf 铪 178.49 (2)	73 Ta 钽 180.9479 (1)	74 W 钨 183.84 (1)	75 Re 铼 186.207 (1)	76 Os 锇 190.23 (3)	77 Ir 铱 192.217 (3)											
7	87 Fr 钫 (223)	88 Ra 镭 (226)	89—103 Ac—Lr 锕系	104 Rf 𨭎* (261)	105 Db 𨭎* (262)	106 Sg 𨭎* (263)	107 Bh 𨭎* (264)	108 Hs 𨭎* (265)	109 Mt 𨭎* (268)											

在 I_A 族元素中，除了氢以外都被称为碱金属，是熔点很低，非常柔软的金属。所有的元素的反应都非常活跃，会和水、空气中的氧气发生激烈的反应。



57 La 镧 138.9055 (2)	58 Ce 铈 140.116 (1)	59 Pr 镨 140.90765 (2)	60 Nd 钕 144.24 (3)	61 Pm 钷* (147)	62 Sm 钐 150.36 (3)
89 Ac 锕 (227)	90 Th 钍 232.0381 (1)	91 Pa 镤 231.03588 (2)	92 U 铀 238.02891 (3)	93 Np 镎 (237)	94 Pu 钷 (239, 244)

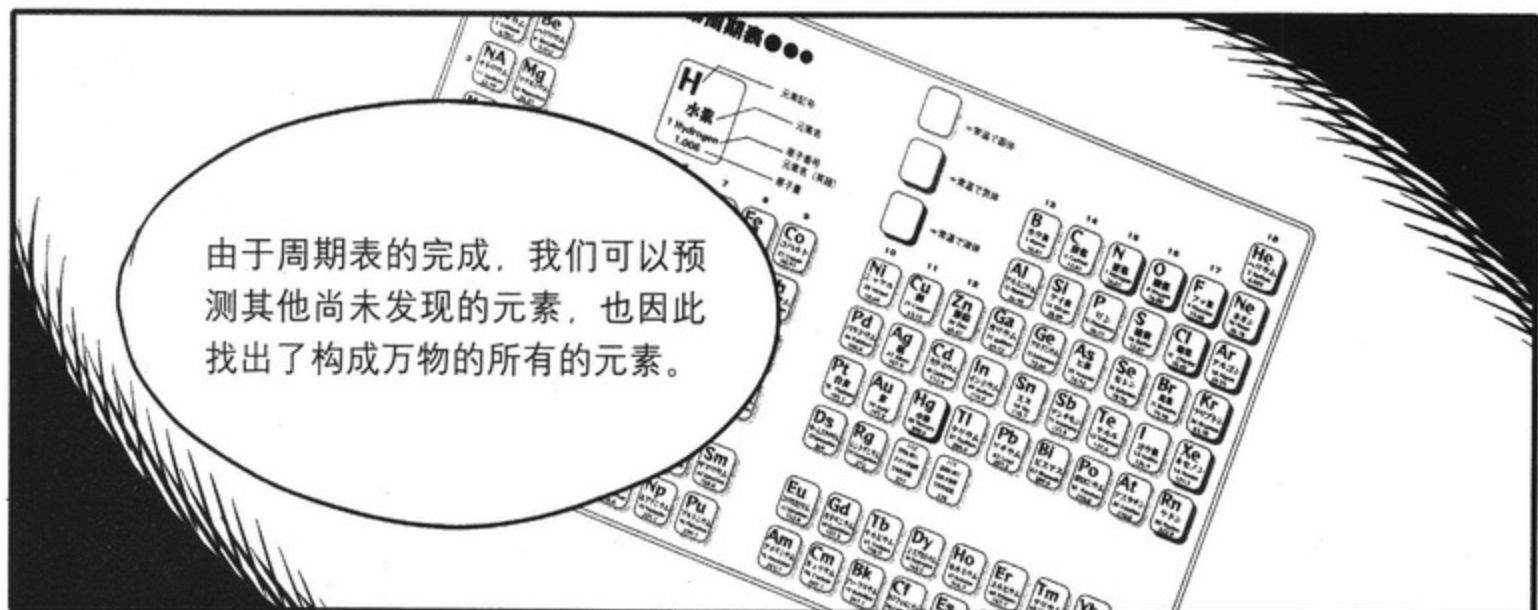
门捷列夫将化学特性相似的元素纵向排列。例如，用作奥林匹克运动会奖牌的金、银、铜都是纵向排列的第 I_B 族元素。

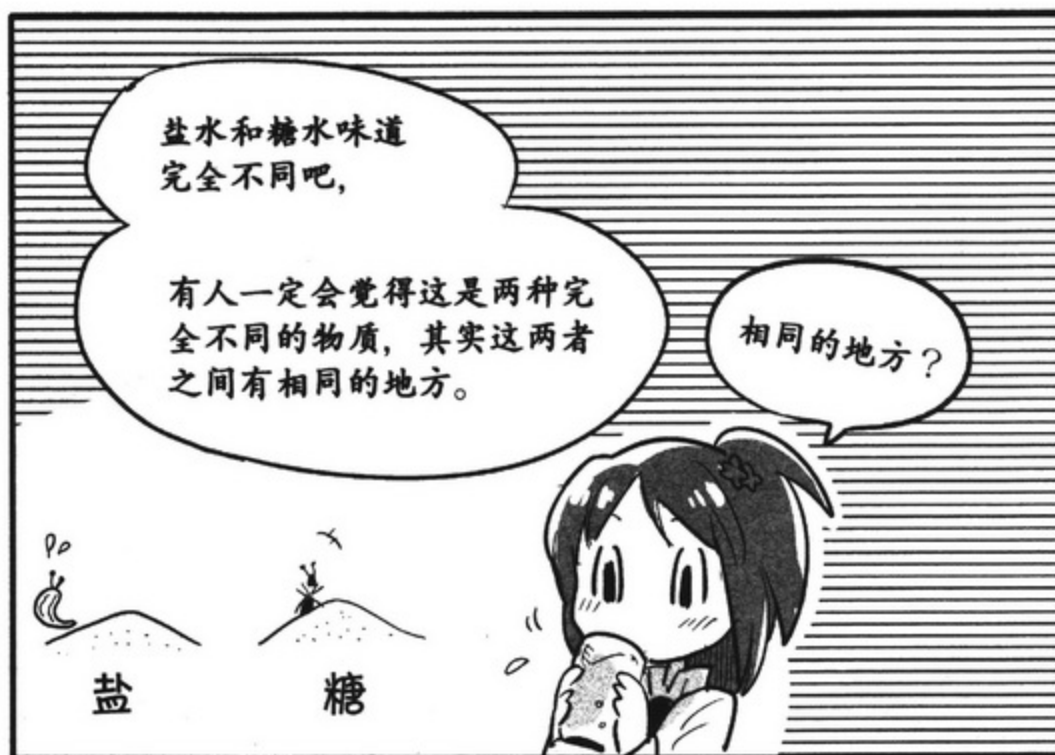
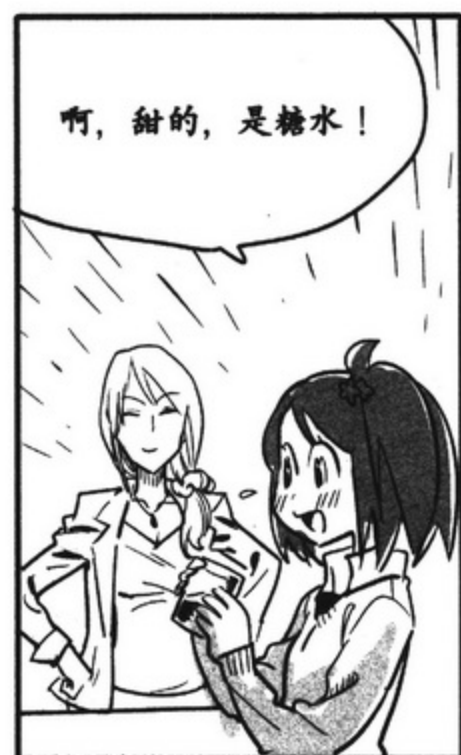
0 族元素是反应迟钝的气体，过去被称为非活性气体。

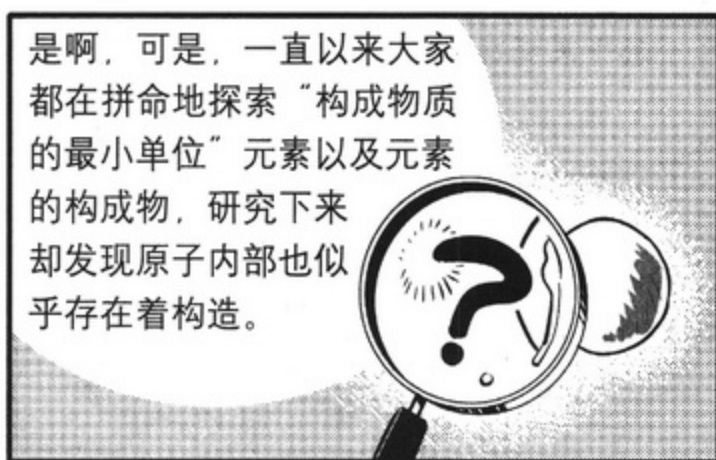
			III _A	IV _A	V _A	VI _A	VII _A	0
			5 B 硼 10.811 (7)	6 C 碳 12.0107 (8)	7 N 氮 14.0067 (2)	8 O 氧 15.9994 (3)	9 F 氟 18.9984032(5)	2 He 氦 4.002602 (2)
			13 Al 铝 26.981538 (2)	14 Si 硅 28.0855 (3)	15 P 磷 30.973761 (2)	16 S 硫 32.065 (5)	17 Cl 氯 35.453 (2)	10 Ne 氖 20.1797 (6)
VII	I _B	II _B	31 Ga 镓 69.723 (1)	32 Ge 锗 72.64 (1)	33 As 砷 74.92160 (2)	34 Se 硒 78.96 (3)	35 Br 溴 79.904 (1)	18 Ar 氩 39.948 (1)
28 Ni 镍 58.6934 (2)	29 Cu 铜 63.546 (3)	30 Zn 锌 65.39 (2)	49 In 铟 114.818 (3)	50 Sn 锡 118.710 (7)	51 Sb 锑 121.760 (1)	52 Te 碲 127.60 (3)	53 I 碘 126.90447 (3)	36 Kr 氪 83.80 (1)
46 Pd 钯 106.42 (1)	47 Ag 银 107.8682 (2)	48 Cd 镉 112.411 (8)	81 Tl 铊 204.3833 (2)	82 Pb 铅 207.2 (1)	83 Bi 铋 208.98038 (2)	84 Po 钋 (209, 210)	85 At 砹 (210)	54 Xe 氙 131.293 (6)
78 Pt 铂 195.078 (2)	79 Au 金 196.96655 (2)	80 Hg 汞 200.59 (2)	86 Rn 氡 (222)					
110 Ds 𨨏* (269)	111 Uuu * (272)	112 Uub * (277)						

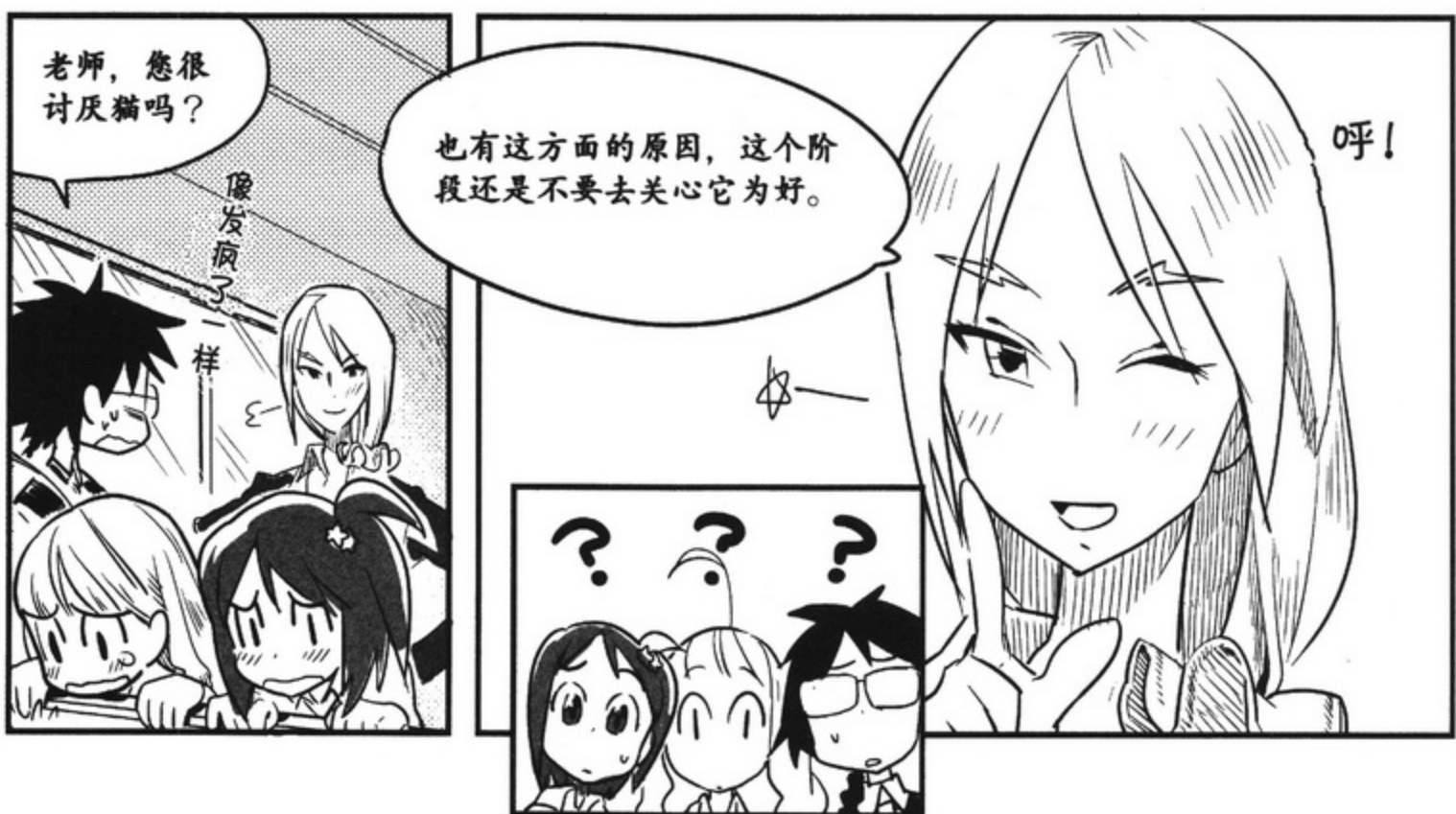
第 I_B 族元素及其旁边排列的铂、钯、铑、铱、钌、铕等都具有很强的耐腐蚀性，除了铜之外都很稀有，因而被称为贵金属。

63 Eu 铕 151.964 (1)	64 Gd 钆 157.25 (3)	65 Tb 铽 158.92534 (2)	66 Dy 镝 162.50 (3)	67 Ho 钬 164.93032 (2)	68 Er 铒 167.259 (3)	69 Tm 铥 168.93421 (2)	70 Yb 镱 173.04 (3)	71 Lu 镥 174.967 (1)
95 Am 镅* (243)	96 Cm 锔* (247)	97 Bk 锫* (247)	98 Cf 锿* (251)	99 Es 镱* (252)	100 Fm 镆* (257)	101 Md 镎* (258)	102 No 镎* (259)	103 Lr 铹* (260)









♠ 拉瓦锡打开了通向原子的大门 ♠



原子在英语中叫 atom。正如漫画中格洛里亚所说，它在古希腊语中是“无法分割的物质”的意思。可是，在对原子进行探索的过程中，其定义也变得奇怪起来。

创造了产生这个疑问的契机的是法国化学家拉瓦锡。

通常情况下，在量子力学的解说书里并不会出现拉瓦锡。可能是因为写书的人都是物理学家，作为化学家的他就被排除在外了。可是如果说用科学的知识来回答“不断分割、分解物质的结果是什么？”这样一个哲学问题正是量子力学的根本的话，在这个时代，认真面对这个问题的正是拉瓦锡。所以在这里就让他登场了。

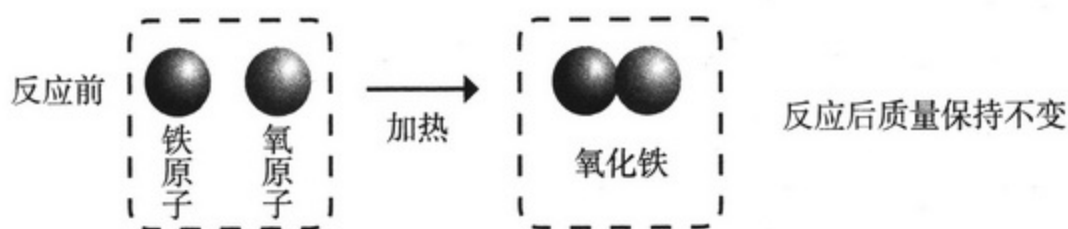
在这里先顺便介绍一下拉瓦锡。

在化学史上作为璀璨的光辉形象存在的拉瓦锡，他本身的职业是征税官，他的工作是向市民征收税金。在法国革命（1789年）以前的君主专政时代，能拥有这样一个职位是因为他是特权阶级的贵族。

拉瓦锡是一个非常认真，注重细节的人，这一性格让他非常适合征税官这个职位。可是，与本质相比，他更热衷于夜晚、周末时进行的化学实验。隶属于科学学会，不断发表具有划时代意义的论文的拉瓦锡从很早以前开始就被人们所熟知。漫画里面也提到了，在中学的理科课程中学习化学反应时最先学的“质量守恒定律”就是拉瓦锡的发现。

质量守恒定律

在化学反应之前和之后，与该化学反应相关的元素的种类及各自的质量是不变的。



◆ 能用实验证明的结果就是事实 ◆

拉瓦锡确实是一位伟大的学者，他对实验的热情是超出常规的。为了证明“钻石是碳的结晶”，他甚至将钻石燃烧。虽然我们知道他是不追求利益的高尚人物，可是还是应该识时务一点为好吧。那个时代的法国普通老百姓连饭都吃不饱，无论怎么为了科学，也不应该燃烧钻石吧。如果一直继续作这样的事情的话，什么时候一定会遭到人们的忌恨。革命发生之后，“贵族且是征税官”的拉瓦锡成为了再好不过的斗争对象，被逮捕后的他最终被送上了断头台。

在这一历史背景之下，据说还存在一位医生兼化学家让·保罗·马拉。马拉只是二流的学者，拉瓦锡批判说他根本不做实验而只是通过自己的猜测来写论文。也就是说这个时期存在着很多像马拉这样的学者，正是因为如此，坚持通过实验来进行验证的拉瓦锡才能够被称为“近代化学之父”，可是这位过于严格的父亲却经常遭到孩子们的憎恨。或许是因为马拉恼火于与拉瓦锡见面时遭到侮辱的事情，于是在他成为革命指导者后提议将拉瓦锡处死。有学者批判马拉的这一愚蠢行为时说：“拉瓦锡的头落地只是一瞬间的事情，而出现和他具有相同才智的人却花费了 100 年的时间。”

由于马拉性格恶劣，而在革命之后的派阀斗争中被反对派暗杀了。他的暗杀是在拉瓦锡处刑之前发生的。

◆ 自然界里充满了“整数” ◆

仍然继续 17—18 世纪的话题。

作为提出原子学说的道尔顿的功绩之一，他于 1803 年发表了“倍数比例定律”。也就是

将 A 和 B 两种元素化合成一种或几种化合物时，A 和 B 的各自的质量之间成简单的整数比。

比较容易理解的是由碳元素和氧元素构成的化合物一氧化碳和二氧化碳，28 克的一氧化碳和 44 克的二氧化碳中无论哪个都含有 12 克的碳元素。于是，碳元素和氧元素的质量比是

一氧化碳——碳元素 12 克：氧元素 16 克 = 3 : 4
 二氧化碳——碳元素 12 克：氧元素 32 克 = 3 : 8。

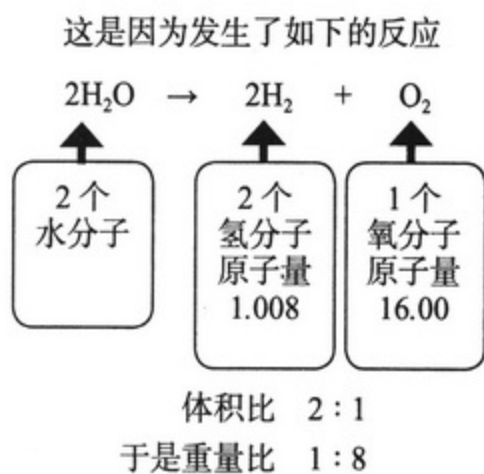
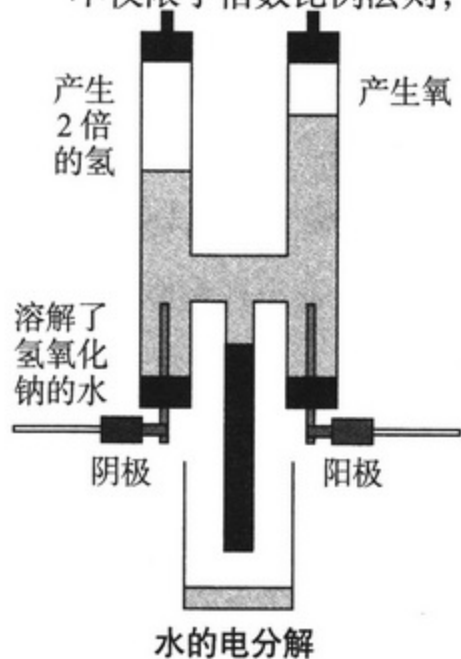
根据这个结果，道尔顿认为

因为原子是无法再继续分割的粒子，所以非整数个氧原子与一个碳元素结合而成的化学物是不存在的，因而倍数比例的法则是成立的。

从而把它作为原子学说的有力证据。

不仅限于倍数比例法则，自然界里充满了整数。

例如，前一章中提到的水的电分解中，氢原子和氧原子的体积比一定是 2 : 1，重量比是 8 : 1 的简单的整数比。



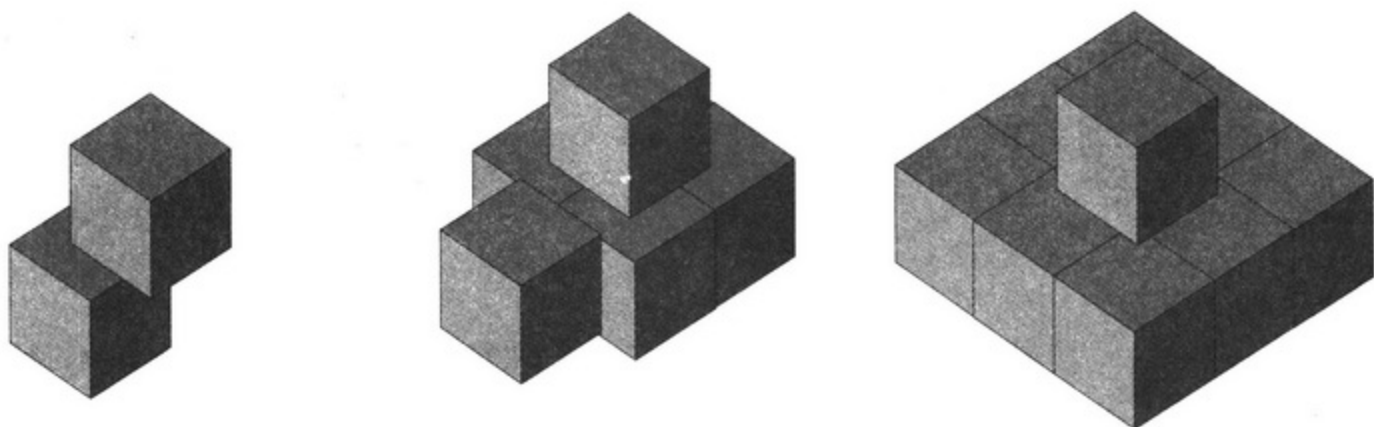
还有，体积也成整数比是根据“相同压力、相同温度下的相同体积的气体都会有相同的分子数”的阿伏伽德罗定律（意大利物理学家阿莫迪欧·阿伏伽德罗（1776~1856）于 1811 年发表的定律）得来的。氢和氧的原子量分别是 1.008 和 16.00，重量比大约是 1 : 8（因为氢气和氧气的分子数是 2 : 1）。

关于氢的原子量不是整数的理由将在下章之后说明。

◆ 潜藏在原子这一“零件”里的结合的规则 ◆

“自然界里充满着整数”是打开连接原子内部之门的关键。

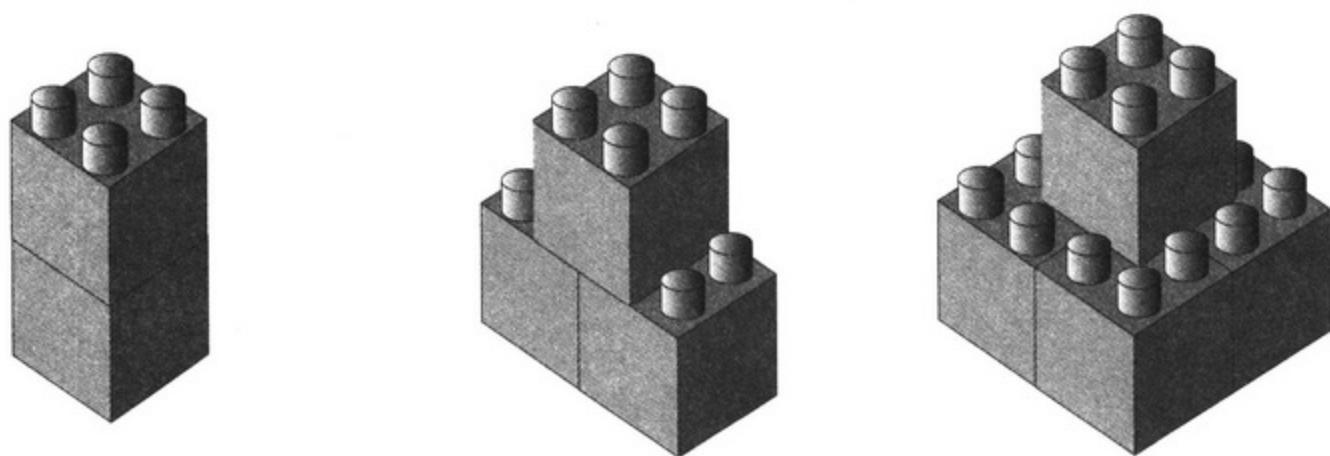
把原子当作是积木一样的东西，而且搭积木的方法是自由的。于是搭积木的时候就可以想出以下这些搭法。



由于没有规定搭法，所以无论怎么组合都可以

如果原子是这样没有规律的构造的话，说明倍数比例定律就比较困难了。

接下来，假设原子是乐高（LEGO）之类的玩具。这样的话，组合的方法就被模式化了。包括上下接合的情况，块儿与块儿之间的位置关系应该是可以用整数比来表示的。



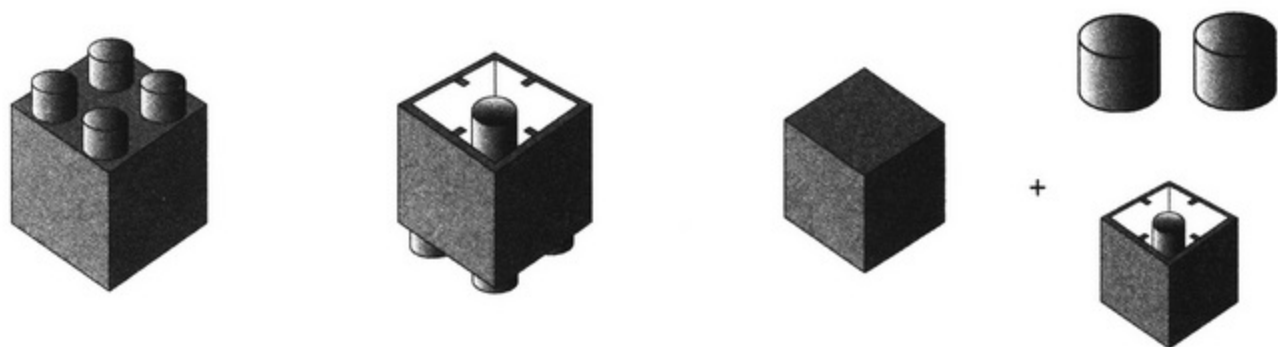
由于组合方法是有规则的，组合就被模式化了

由于自然界里充满了整数，原子也多半和这个一样，是按照一定的规则结合起来而组成分子、物质的。这样的话……

原子无法再继续分割的想法在这里就遇到了疑问。像玩具的方块一样按照一定的规则结合的话，这其中一定存在着什么规则，而且是各种原子共通的内部结构。

乐高这样的玩具，在它的四方的主体上带有圆形的突起。其反面是凹陷下去的，于是通过这两者的结合组合在一起。区分不同形状的关键只能是这种凹凸的个数。

实际上的乐高等玩具的每一块儿是无法分解的，可是我们仔细思考一下的话，这每一块儿也是由“四方的主体 + 凸起的部分 + 凹陷的部分”组合而成的。也就是说具有这样一种内部构造的零件。



四方的主体 + 凸起的部分 + 凹陷的部分

如果原子是按照一定的规则发生结合等各种反应，而且整数比例定律也成立的话，其内部可能存在像上述玩具一样的共同的结构。大约在 19 世纪后半期出现了有这种想法的学者，可惜没有确定原子内部构造的方法。

于是在这种模糊不清的氛围持续的过程中，既量子力学之后对于极小世界的研究迎来了决定其命运的 20 世纪。

● 超越电子显微镜的 STM

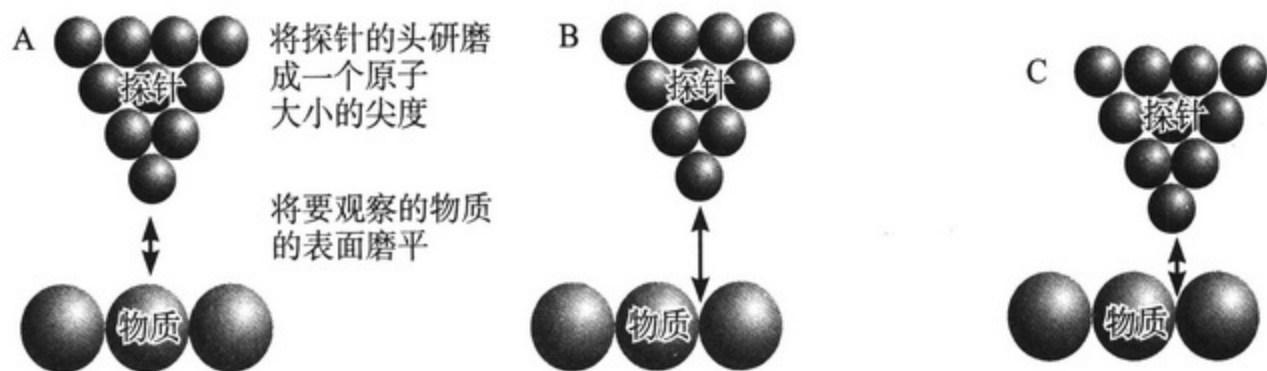
物质是由“原子”这种粒子构成的！这一想法在近代从 18 世纪中叶开始慢慢地被人们所接受。进入 20 世纪 20 年代，探索原子构造的研究迅速得到发展，继续阅读之后的漫画就能发现这一事实。可是，在很长一段时间，所有的学者对于原子这一“粒子”是否真的存在一直半信半疑。无论如何，谁都没有看过原子的真实面貌。

在正式开始对原子进行研究之后，经过了 200 多年，也就是 1982 年，在利用最新的扫描穿隧式显微镜（STM: Scanning Tunneling Microscope）对金的表面进行拍摄时，成功地看见了分解成一个一个的原子。由于这一发现，STM 的发明者格尔德·宾宁和海因里希·罗雷尔于 1986 年获得了诺贝尔物理学奖。

● 用尖锐的针来探索原子

STM 的原理是这样的。首先准备一根金属制的“针”。被称为金属探针的这个部分是左右 STM 的性能的尤其重要的部分，它的前部必须像金属原子一个大小那么尖锐。作为原料还必须准备钨。然后将金属探针接近被研究的金属的表面并左右移动。这个时候，给予样品和针电位差，通过它们之间的极小的空间来形成电路是关键。

这之后的原理就没有那么复杂了，简单地说，就是根据金属探针和金属样品表面之间的距离的不同，电路里的电流量发生变化。这样的话，让电流量保持不变来移动探针的话，很自然的就可以摹写出样品表面的形状。然后用所得到的数据进行计算制作出三维图像。这样就可以观测出垂直分辨率为 10 皮米，即电子显微镜的分辨率的 1 位或 2 位数以下的世界。而且，作为 STM 的应用，格尔德·宾宁于 1985 年开发出了利用分子、原子间具有的电磁的力量而不是电路里的电流来运作的原子力显微镜（AFM: Atomic Force Microscope）。于是具有导电性的金属以外的样品的原子也可以被观察到了。



将探针的针尖接近要观察的物质的表面，由于量子力学的隧道效果产生电流

根据原子的位置，当针尖与物质表面的距离变远时电流变弱

为了产生相同的电流，要不断调整探针的高度。其结果是通过针的运动可以摹写出物质表面的形状，并可以通过增加电的变化量来画出图像。

扫描探隧式显微镜的原理

● 观看“原子”的价格 How much ?

接下来是闲聊。那么，高性能的显微镜大约多少钱呢？

光学显微镜当中便宜的有 2000 日元（人民币约 150 元）左右的，专门的科学研究者使用的最贵也不过 20 万日元（人民币约 15000 元）左右。所以小学中学里都可以看到。

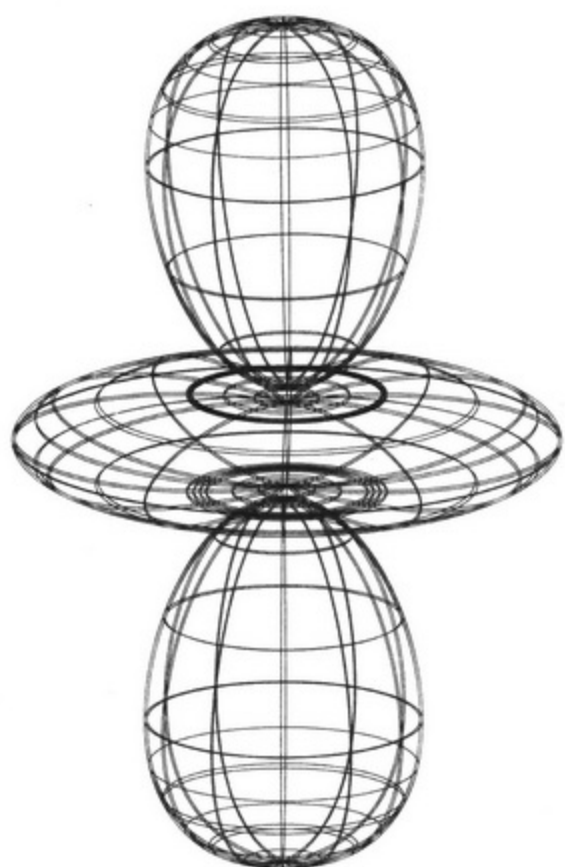
到电子显微镜，价格就上去了。研究开发级别的大约要 1000~3000 万日元（当然，既有好几亿日元的高级品，也有只要 500 万日元的破例的产品）。这么高的价格即使是大学也只有有钱的大学才能买得起。可是对于企业来说，他们认为“如果用数千万日元的显微镜就可以带来上亿日元的利益，还是比较便宜的”，所以在制造商们的研究所呀，开发中心里到处都放着这样的电子显微镜。当询问年轻的工作人员时，他们都很高兴地回答到：“工作之后最好的事情就是可以自由地使用电子显微镜。”

接下来终于轮到可以“看见”原子的扫描探隧式显微镜了。到了这个级别，由于空气也会影响观察所以必须配上能形成超高真空的机器，其价格也就达到 5000 万日元（人民币约 375 万元）以上了。这样的话，只有大企业才可以买得起，通常还必须锁在研究室里。

研究最新金属材料的制造业者大多拥有这样的显微镜，如果去参观研究所的话，他们应该会让我们免费看到金属原子了。

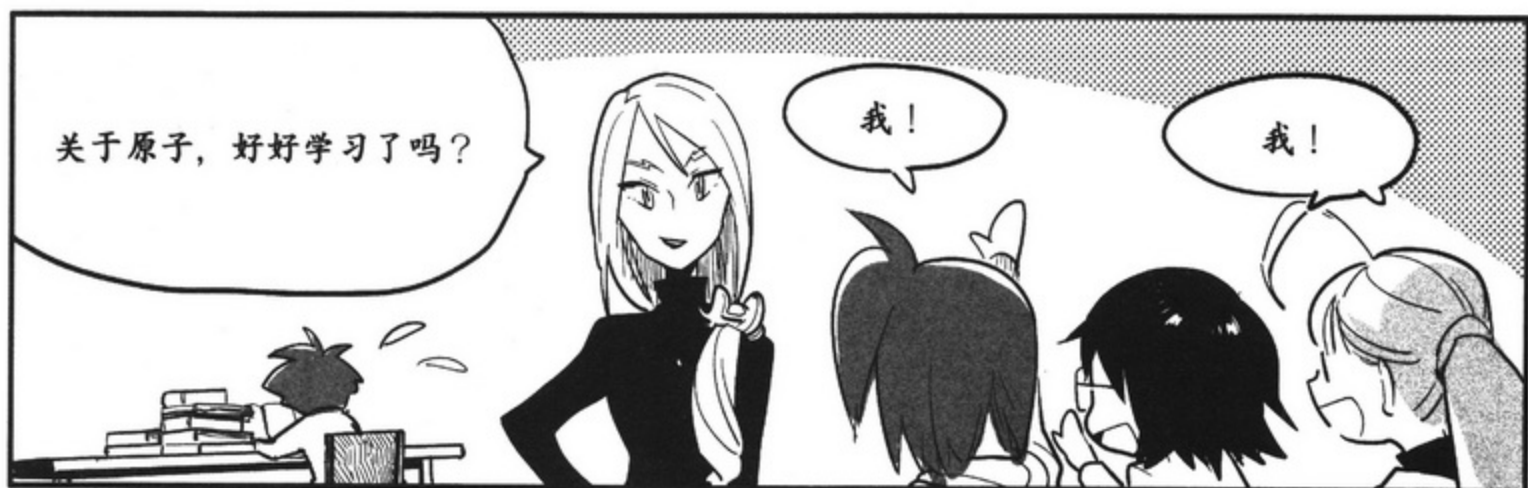
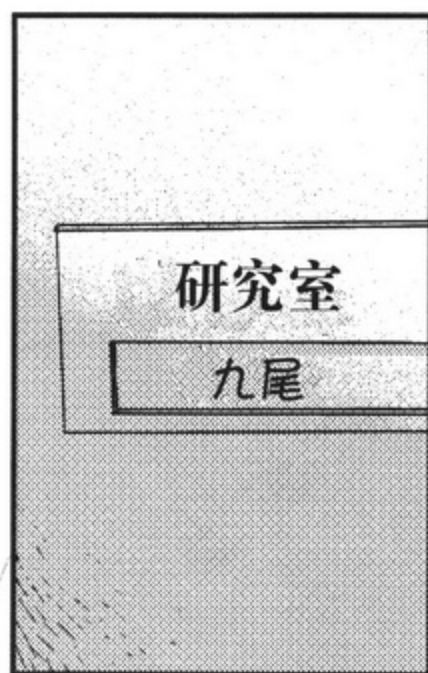
第 3 章

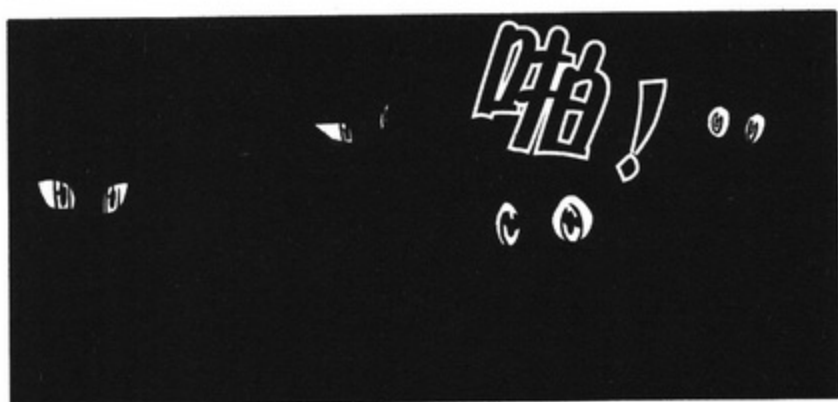
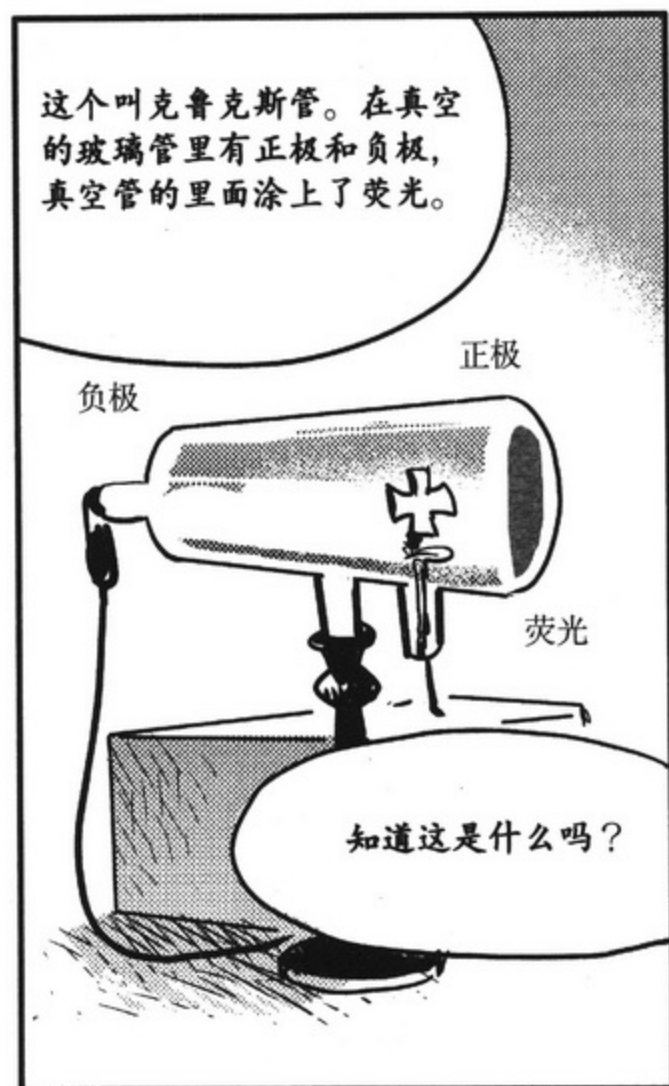
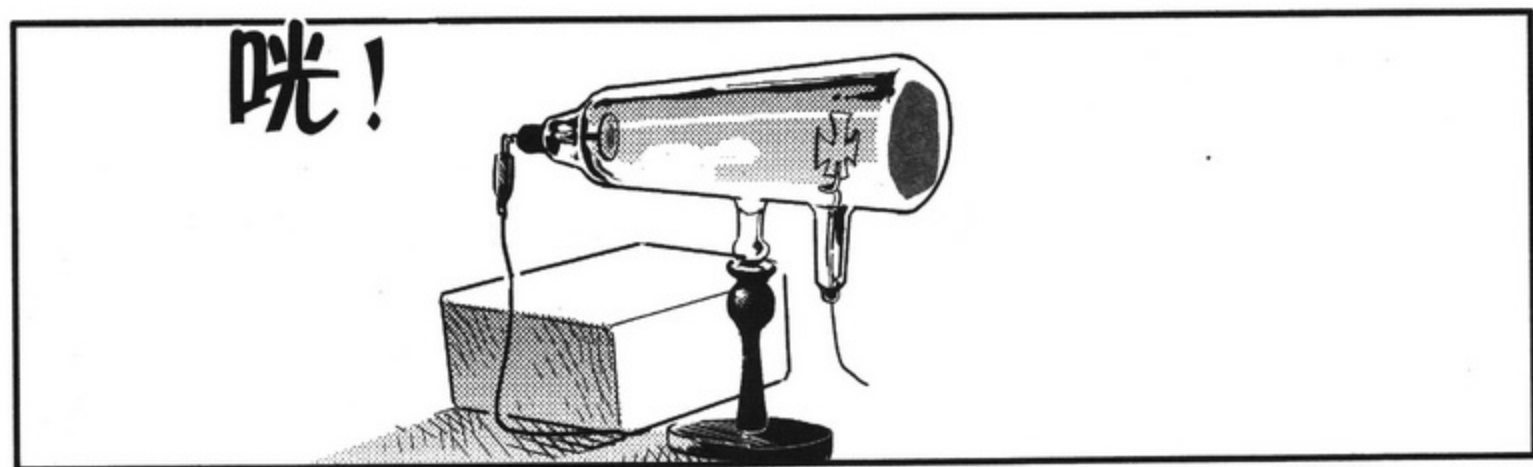
如何探索原子的内部

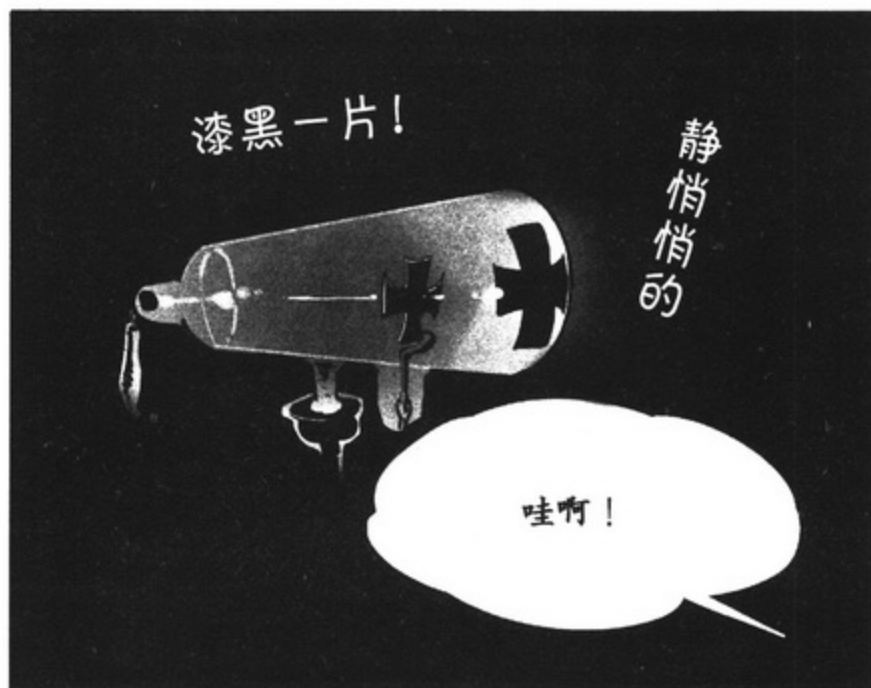






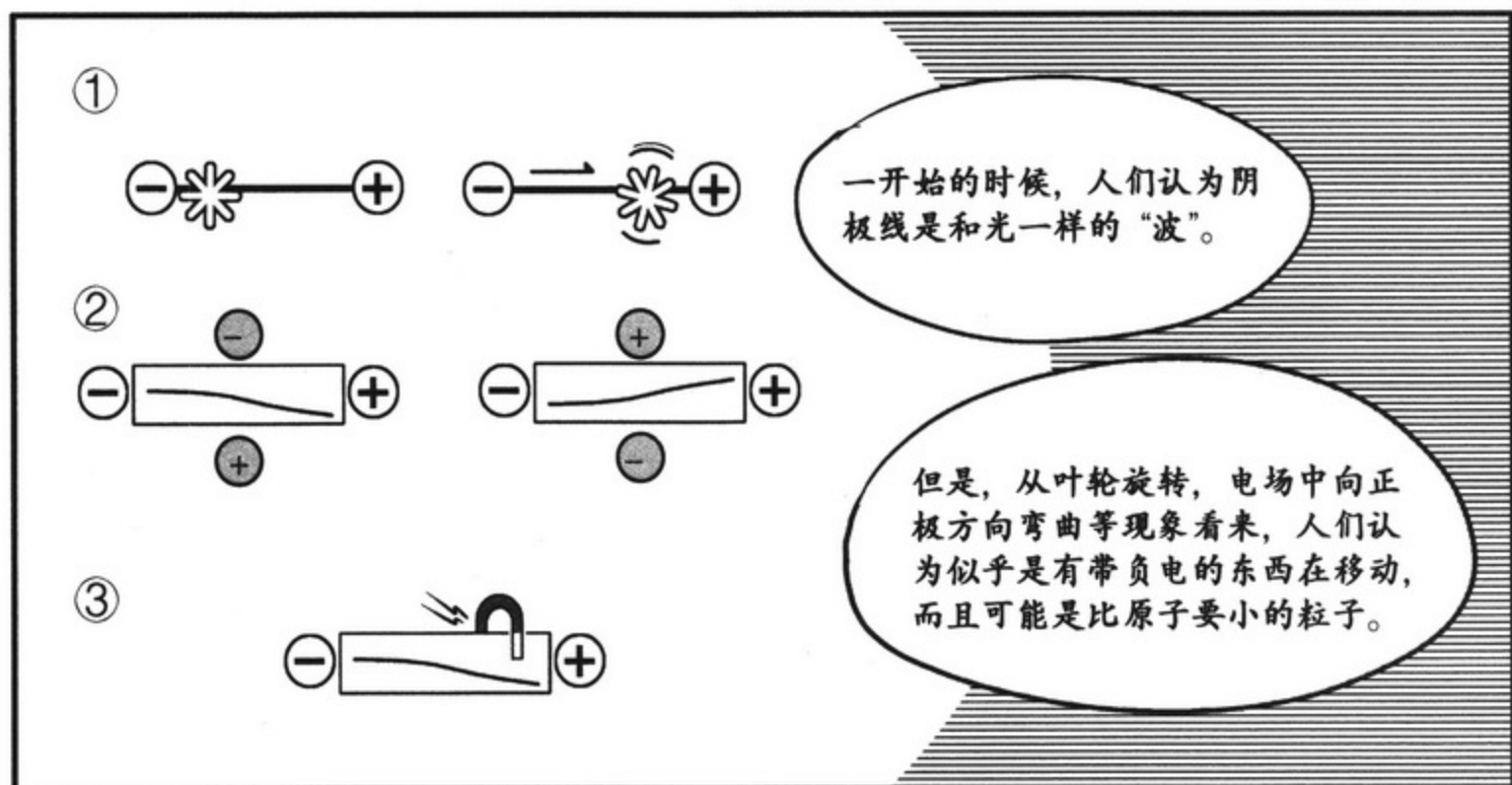




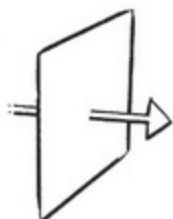




- ① 用阴极线轰击小的叶轮时，叶轮会旋转。
- ② 在克鲁克斯管等放电管的上下部位放上别的正极和负极而形成电场时，阴极线的正级的部分会弯曲。
- ③ 用吸铁石做成的磁场里，阴极线也会弯曲。



而且，阴极线能够穿透薄的金属箔的事实也得到了证明，于是人们渐渐明白，存在比原子小的物质是有可能的。



仔细地看



怎么了？

接着电源说明有电流流过是吧。

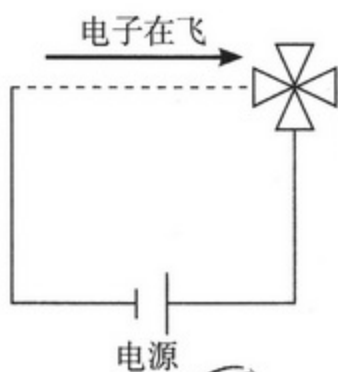


是啊，形成了电路。

也就是说，电的原形是电子？

那个在理科的课上已经学过了好不好。

大发现！



对啊，还以为有大发现了呢……

这个发现也是很重要的。

英国物理学家 J.J. 汤姆逊也……

这种带有正电的物质的移动是电流吗？

他意识到。

失望！

所以电的孩子就是“电子”了。

英语当中，电是 electricity，电子是 electron。

接下来就进入正题了。

电子比原子小，它会从原子中飞散出来。以这个事实为基础，很多科学家都开始思考，原子到底是怎样一种结构呢？

刚刚说的 J.J. 汤姆逊、日本的长冈半太郎提出的原子模型就是初期的代表。

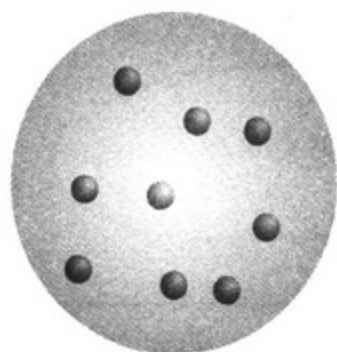




3.2 汤姆逊和长冈半太郎的原子模型

初期的原子模型

汤姆逊的原子模型（原名：西瓜型模型）



汤姆逊的原子模型

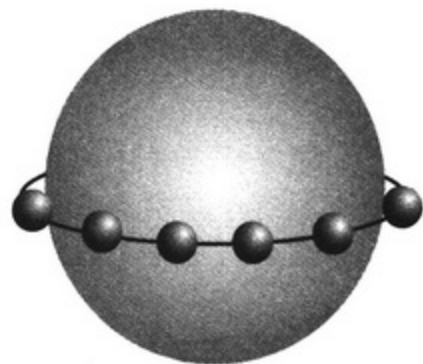
它是电子的发现者英国物理学家约瑟夫·约翰·汤姆逊（J.J. 汤姆逊）于 1903 年提出的模型。从阴极线的实验中即使有电子被放出电极也不发生变化的现象中，他设想出了一个一定大小的球状的“主体”，其中充满了带有正电荷的非粒子状物质（像着哩一样的物质？）。然后，在其内部存在着可以抵消它所带的正电荷的一定数量的电子。

因为与西瓜和西瓜子的关系相近，在日本也被称作“西瓜型原子模型”，在国际上被叫做葡萄干布丁模型（Plum pudding model）。葡萄干布丁是 J.J. 汤姆逊的祖国英国的传统的圣诞节蛋糕，是加入晒干的葡萄等其他干果一起烘烤而成的点心。说起布丁也有各种各样的。

长冈的原子模型（土星型模型）

它是日本物理学家长冈半太郎于 1904 年提出的模型。和汤姆逊一样，他也认为原子的中央部位有一个很大的带正电的粒状的构造物，而认为与“行星&卫星”的结构一样，在这个粒状构造的周围有电子在旋转的想法是这一模型的主要特征。也就是说，虽然还不是很全面，“原子核”这一概念的提出是具有划时代意义的。

长冈把这一构想在东京数学物理学会上第一次做了发表。明治 37 年，日本正处于日俄战争这样一个动荡的时期，根本没有发展科学的氛围，他的学说反而在国外受到更多的重视。但是，由于他无法说明“电子为什么会能量不减的不停地旋转”的理由，这一学说也渐渐地被人们所遗忘了。



长冈的原子模型

在考察原子模型的初期，做出整个世界通用的伟大贡献的长冈半太郎，是被称为日本物理学始祖的人物。

明治维新的3年前，在现在的长崎县大村市，作为大村藩藩士的独生子的他出生了。后来他在建立没多久的东京大学学习物理，研究生毕业后留校当了老师，从助理教授到教授而慢慢成功。中途，去了德国留学，在那里学习了作为当时最先进理论的原子论。他的研究对象不仅包括量子力学里的原子物理学，还包括地球物理学，宇宙物理学等。在很多领域他都竭尽全力地进行研究，直到85岁去世的那一天，身边仍然放着打开的物理书。



长冈半太郎
(1865~1950)

知道了这样的经历，大家一定会觉得他是一个高高在上无法接近的人，其实现实中的长冈半太郎是一个很有人情味且富有吸引力的人。大学时期的他总是不停地在思考“难道东洋人就没有比欧美人优秀的具有独创性的见解吗？”，为此他休学一年考虑着是否应该把自己的专业改成汉学。最后虽然他仍然选择了物理学作为自己成功的道路，由于当时的日本还没有被世界所认可，他的自卑情结一直延续着。也有人认为在他独自考虑原子模型的时候，无法及时地在国外的学会上得到发表也是其原因之一。

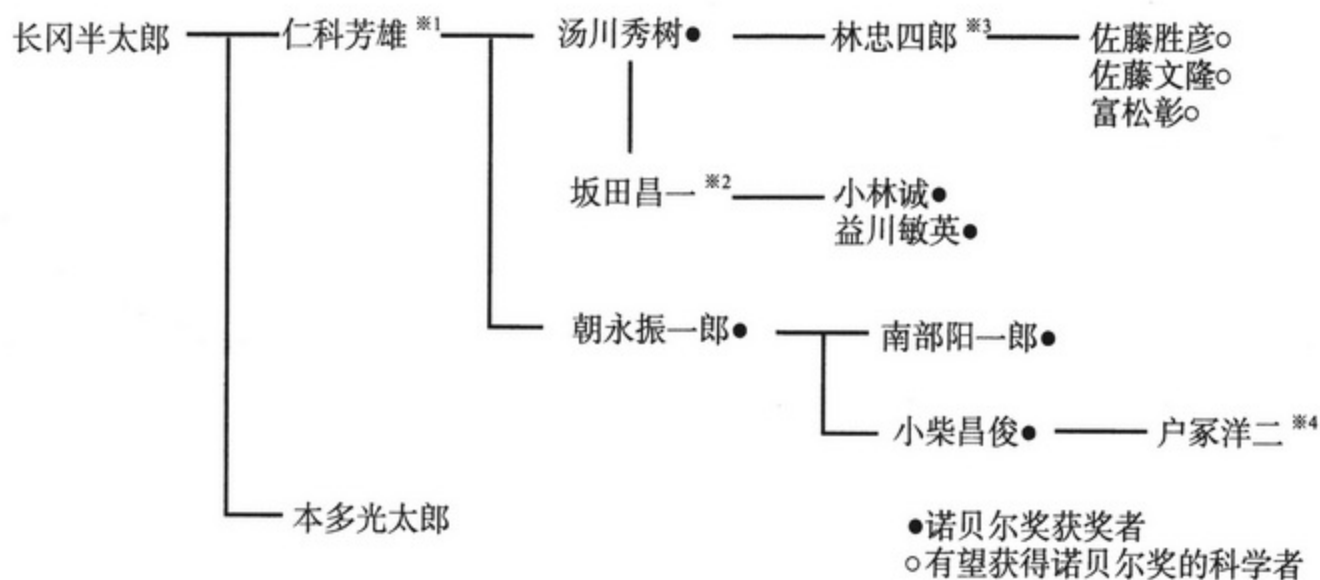
随着时代的进步，他意识到国际活动的重要性，为了“至少可以让后来的人走上光辉的道路”，1939年他向瑞士的诺贝尔奖委员会强烈推荐了汤川秀树。在经历了第二次世界大战的10年之后的1948年，汤川秀树之所以可以获得诺贝尔奖，可以说完全归功于长冈半太郎。接下来，朝永振一郎的获奖让全世界都知道了日本物理学的发展已经达到了国际水平。

不仅仅是汤川和朝永，与长冈有师徒关系的优秀的学者有很多，仅仅是诺贝尔奖的获得者就有六个人。加之今后有望获奖的学者，可以说长冈半太郎形成了量子力学研究的一大潮流。接下来简单地介绍一下他们的简历。

佐藤胜彦是宇宙膨胀说的提倡者。佐藤文隆和富松彰作为黑洞研究的先驱而在海内外享有盛名。

作为他的得意门生的仁科芳雄和本多光太郎，关于金属方面的研究在当时的世界上具有权威性。本多门下的研究者，技术人员大多在企业从事研究开发工作，可以说他们的活跃成为了“先进工业国家日本”的基石。

从最先进的物理学到机械工业，电子学，长冈半太郎为日本国家的发展创造了基础。他的功劳是伟大的。



日本物理学图谱

- ※1 仁科芳雄：被称为“日本现代物理学之父”的学者，为了在日本建立量子力学的研究基地而竭尽全力。同时，也在宇宙线和加速器的研究方面取得了成绩。
- ※2 坂田昌一：是汤川秀树获得诺贝尔奖的介子论文的共同执笔者。通过在基本粒子物理学方面进行的很多起先驱作用的研究而闻名于世。
- ※3 林忠四郎：作为天体物理学者，总结出了恒星·行星系的全部形成过程的标准模型，创造了很多伟大的功绩。
- ※4 户冢洋二：作为宇宙线研究的第一人，获得美国版诺贝尔奖本杰明·富兰克林·奖章。于2008年去世，享年66岁。据说“如果还可以活两年的话应该可以得到诺贝尔奖”。



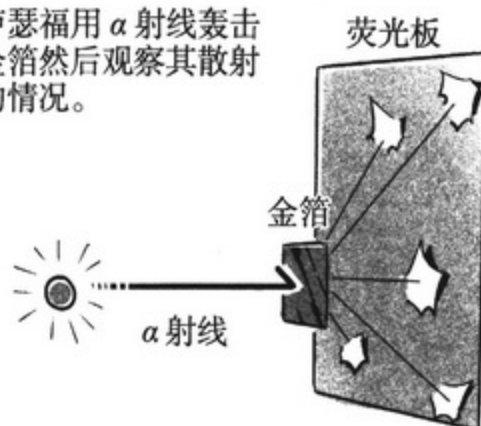
可以解释一下刚刚学的卢瑟福的散射吗？

好的……



卢瑟福利用 α 射线进行了这样的实验。

卢瑟福用 α 射线轰击金箔然后观察其散射的情况。

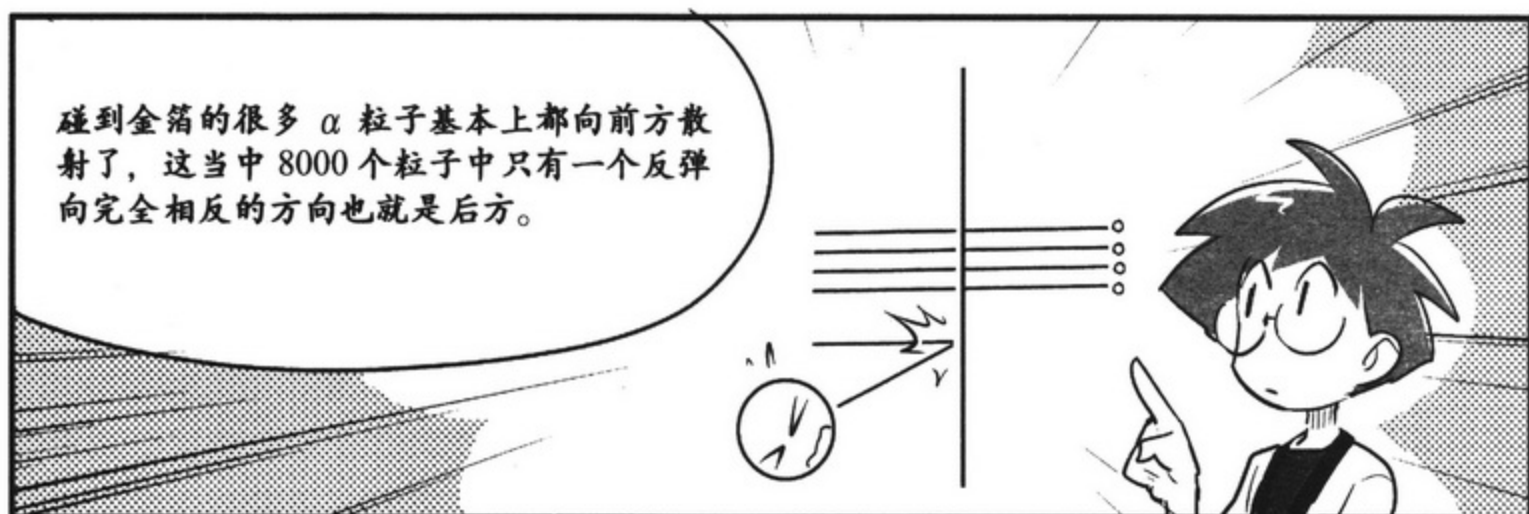
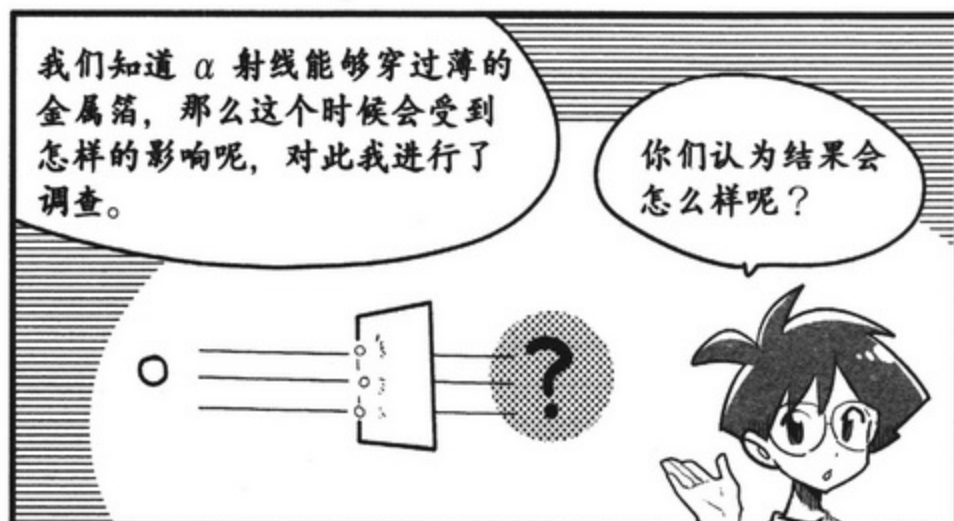


放射线是从铀、镭等一部分物质（放射性元素）放出的，具有高能量的电磁波或者粒子线。其中有 α 射线、 β 射线、 λ 射线等。 α 射线是 α 粒子的运动， α 粒子是由2个质子和2个中子组成的氦的原子核。

完全听不懂！

不用想得太复杂。

把它想象成是带有正电荷的颗粒像子弹一样在飞就可以了。





啊，大家都来啦！

讚岐教授！

老师，什么时候回来的啊？

扑向
讚岐教授
老师不在的这段时间，好辛苦啊。

真没礼貌！

刚刚回来，估计你们快到了，一直在这里等着你们呢。

就算是那样……

这个豪华的台球桌是怎么回事儿啊？

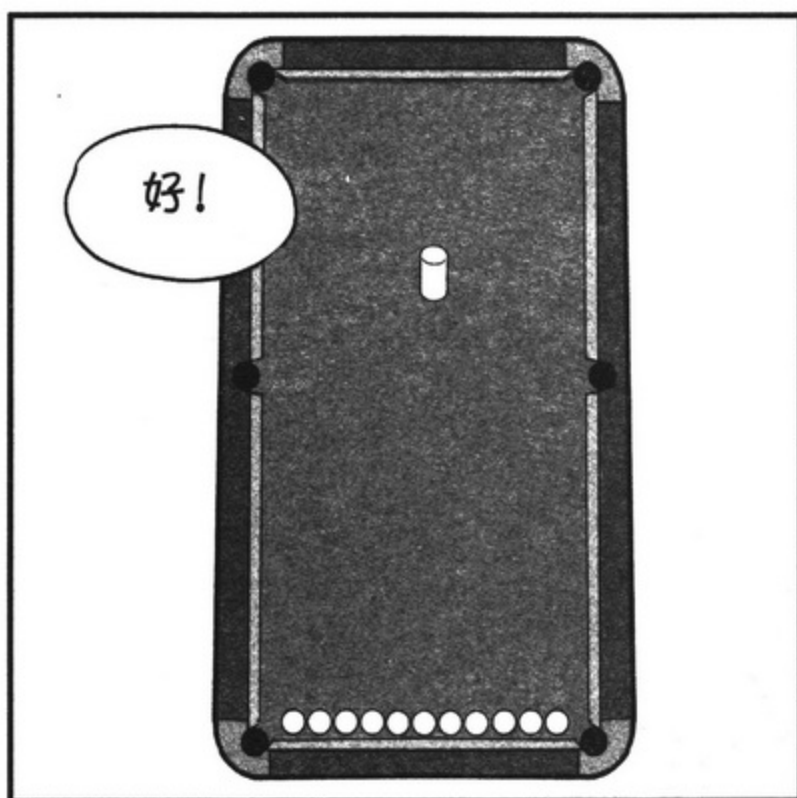
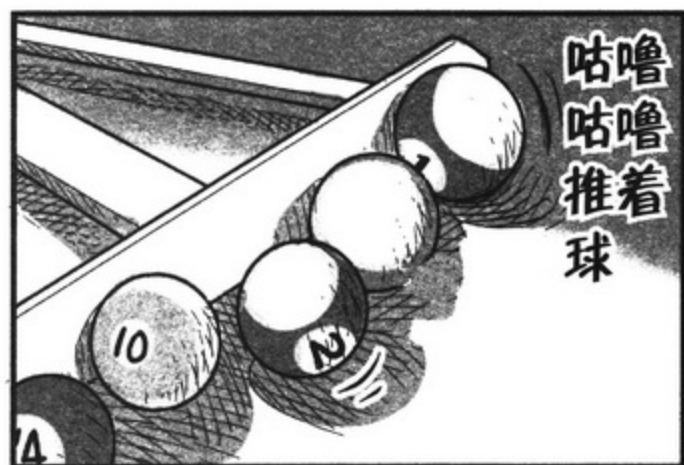
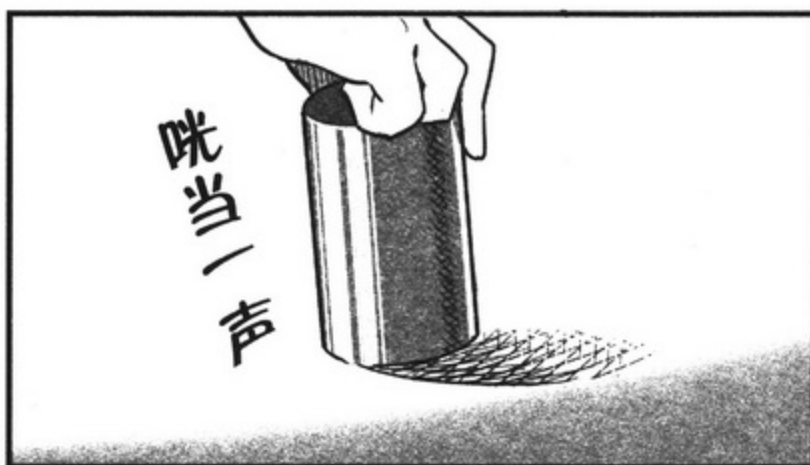
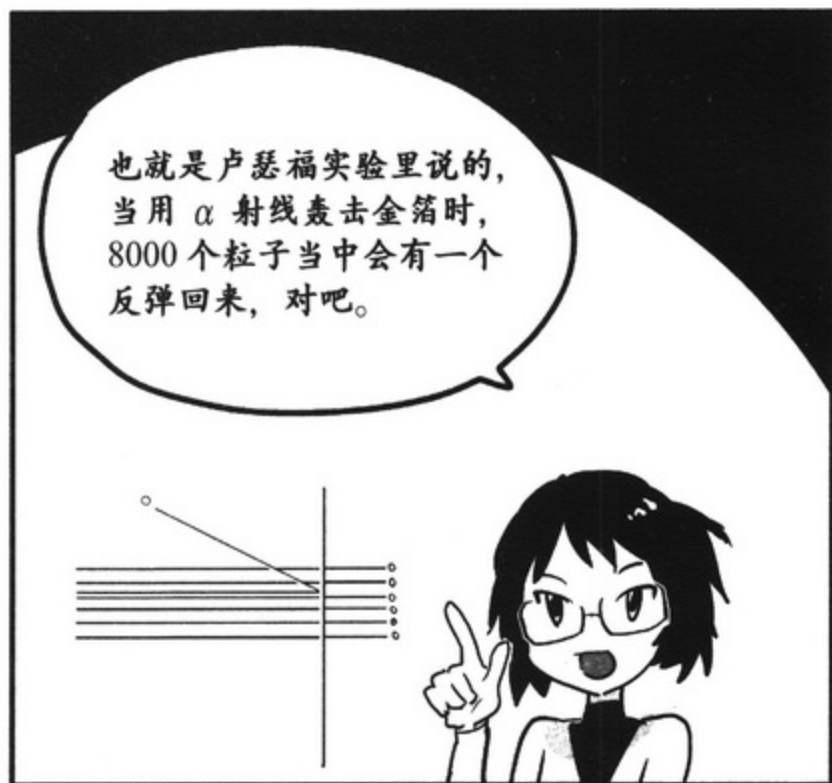
用研究经费买可不太妙啊。

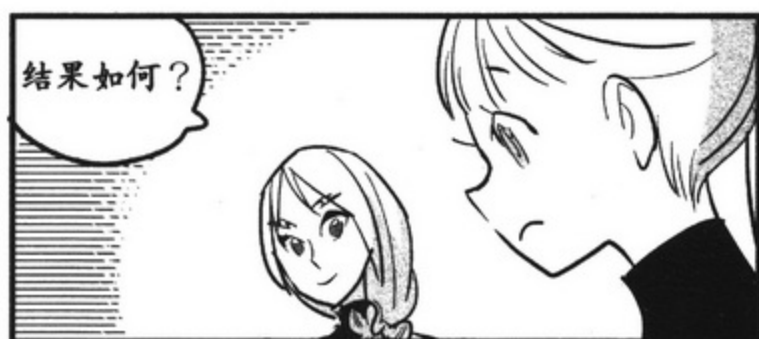
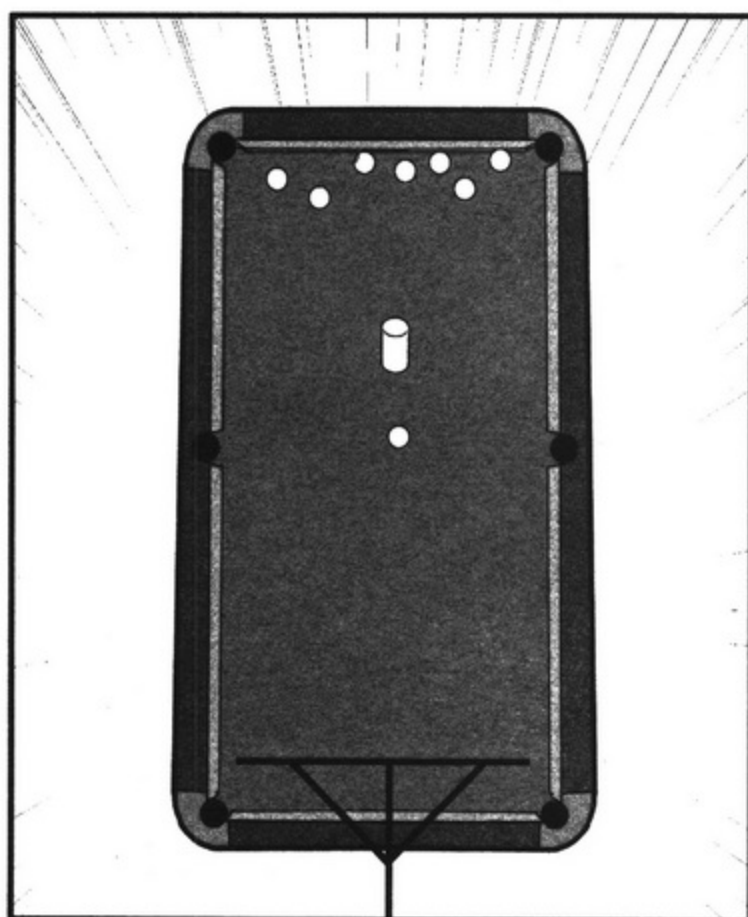
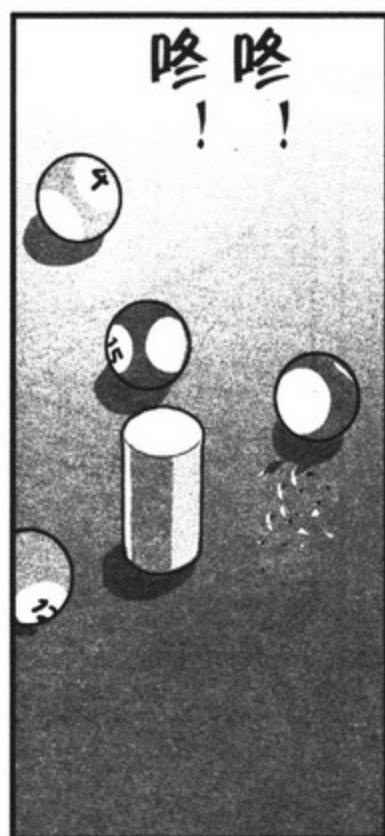
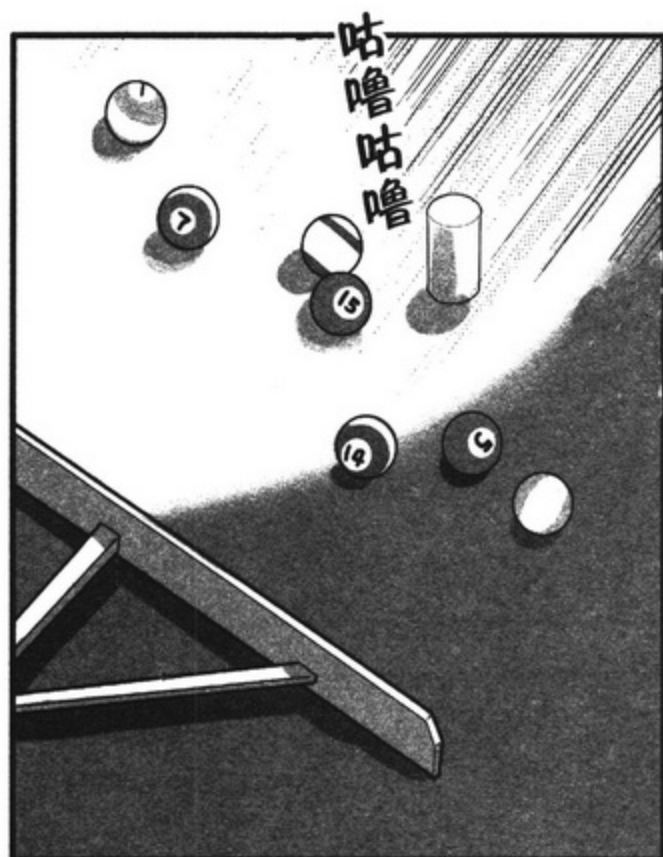
惊讶！

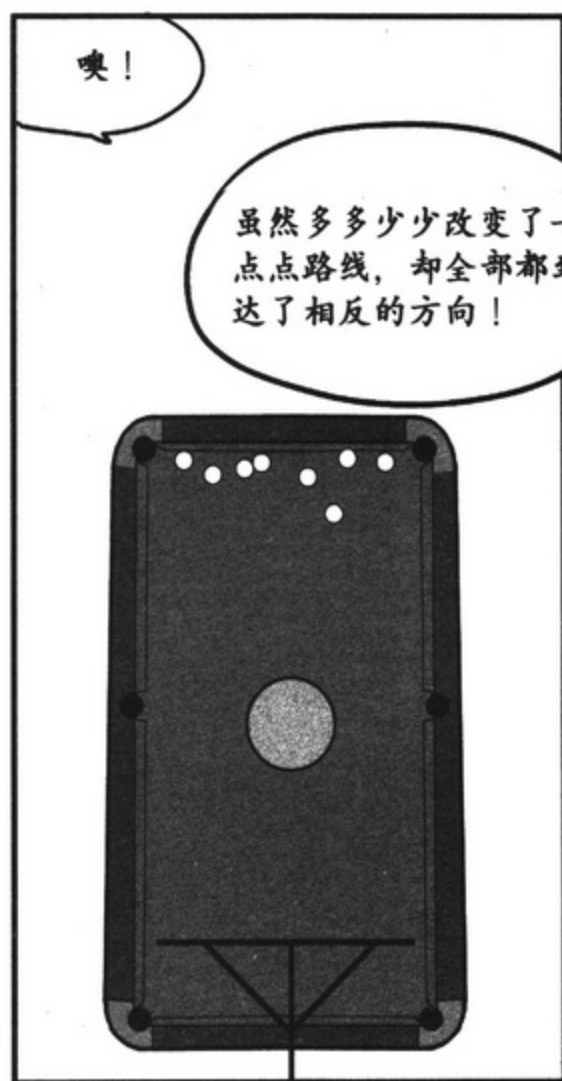
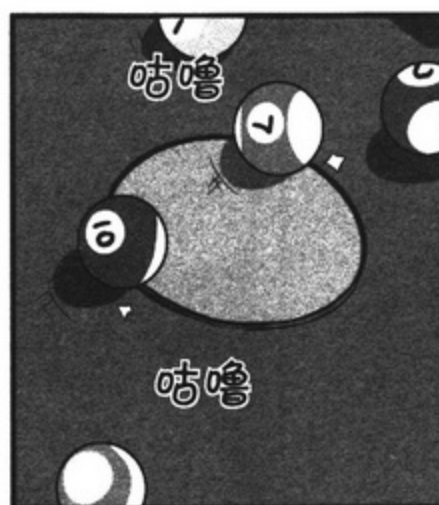
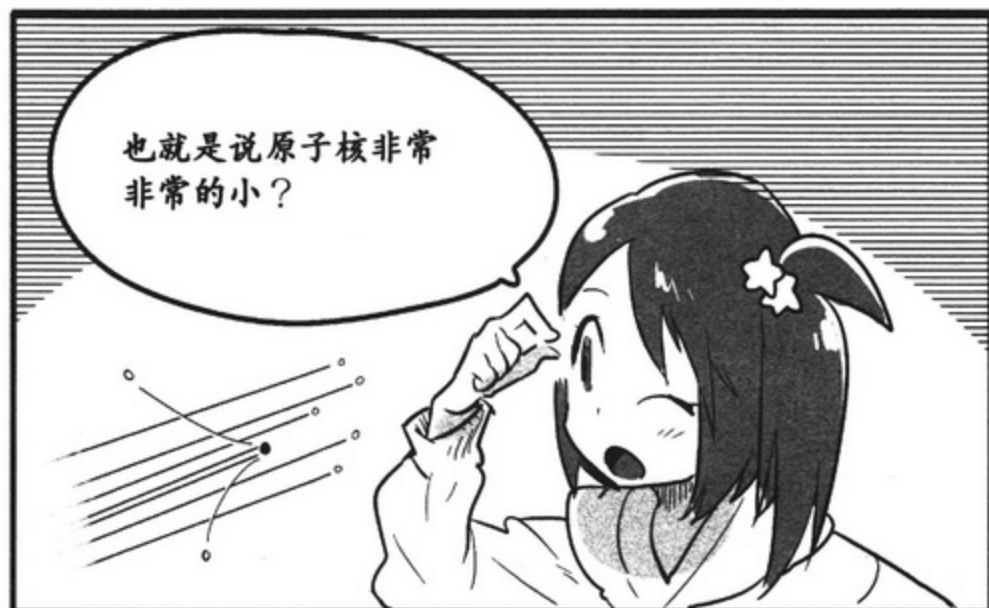
不可以对别的同学说哦！

WE ARE HUSTLER!

啊？什么呀！

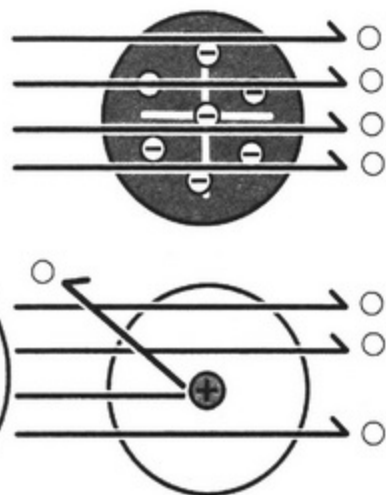






明白了吗？用汤姆逊的原子模型来做实验的话，就不会发生 α 粒子散射的现象。

也就是说，通过卢瑟福的实验，第一次证实了原子核的存在。



据说卢瑟福也是在那时想起了一直以来不怎么被人注意的长冈半太郎的原子模型。



于是就有了卢瑟福的原子模型。

眼睛一亮



对吧，九尾老师……

讚岐老师，您出差之前的比赛还继续吗？

哦，可以啊。

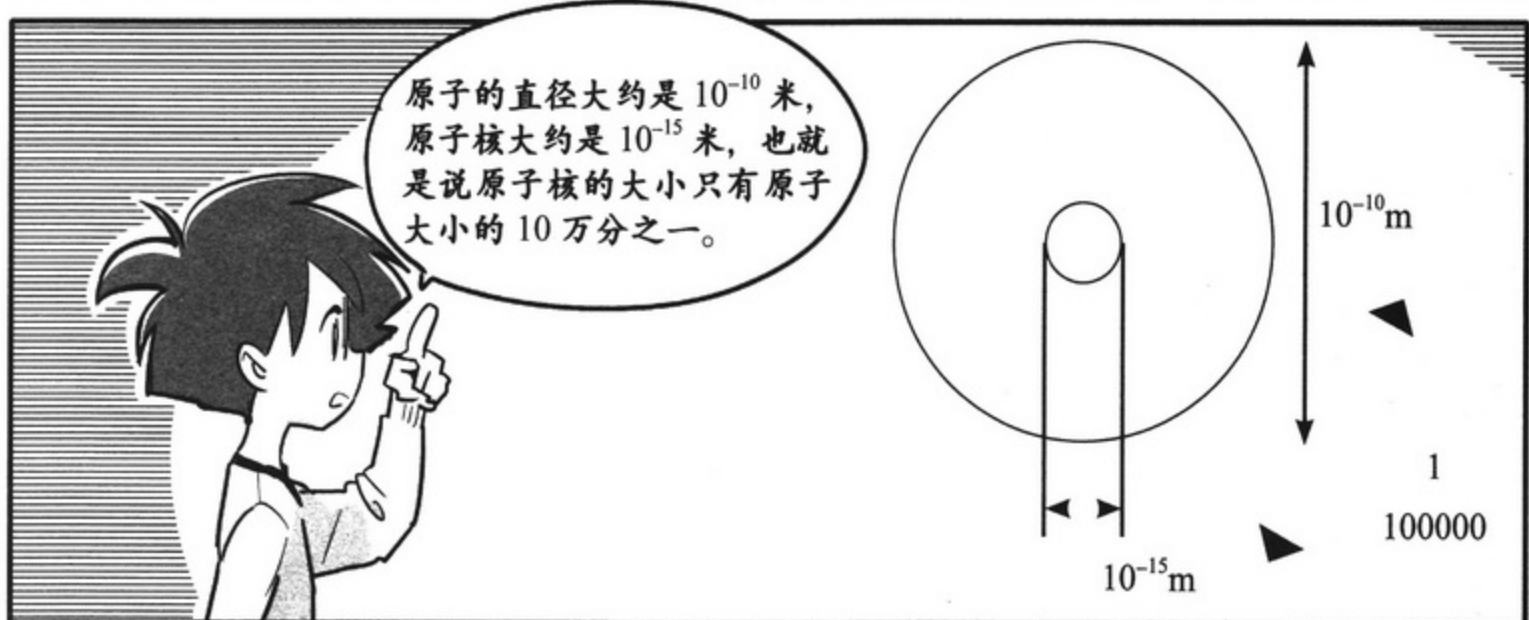
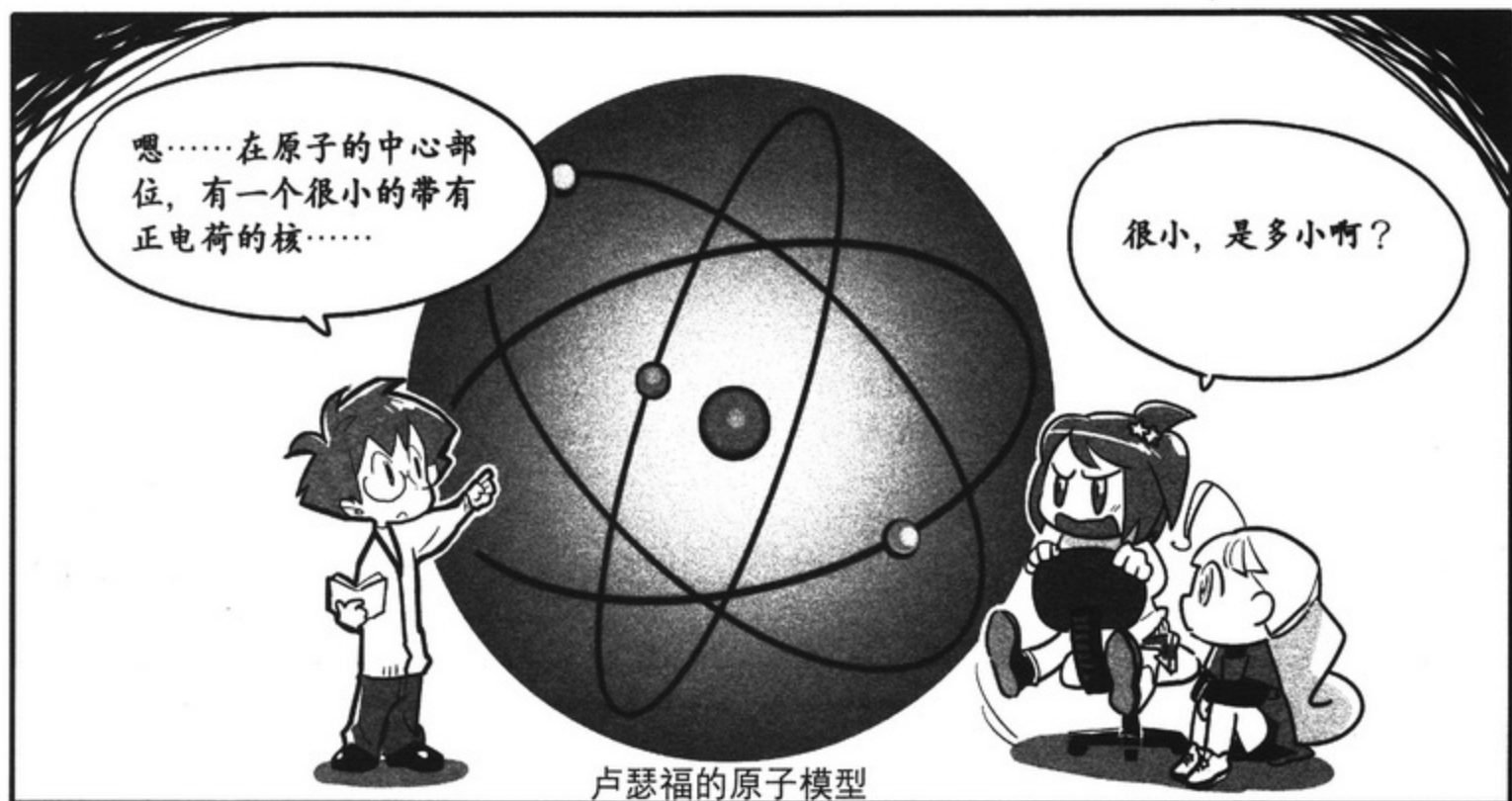


老……

那剩下的就拜托你了啊，贯太。

啊???





太阳直径大约是地球公转轨道直径的 1/200。

与最远的行星海王星的轨道相比的话，是其长度的 1/6500，从大小的比率来看的话出入很大啊。

实际上不是这样吧……

咚!

哇~!!



由原子组成的物质也像太阳系那样，绝大部分是空荡荡的，对吧。

自己的身体也是那样稀稀拉拉的构成的？真是难以想象！

稀稀拉拉

稀疏



哥哥您一说到宇宙的话题立刻精力充沛啊！

真啰唆，补习是很辛苦的啊！

九尾老师还很可怕！





接下来才是故事真正的开始！

“更小的”世界！



不……不是很明白，我能行吗？

比原子还要小？



没关系，演员都已经聚齐了。

迅速转身



哎？



我？



啊？

会……变成什么样啊，这个？



♣ 从电子到质子、中子及夸克的世界 ♣



♣ 发现阳子的就是卢瑟福 ♣

在漫画当中，从电子发现的话题开始进而对原子的构造进行了解说，那么关于原子核内部的研究是如何进展的呢？

发现构成原子核的物质其中之一的是，以用 α 粒子进行的散射实验为基础而提出原子模型的卢瑟福。这之后，卢瑟福还尝试着用 α 射线轰击别的各种各样的“物质”，并观察其反应。他发现，当向氮气中注入 α 粒子时，尽管容器是密封的，当中仍然出现了氢的原子核。

至此为止，明白了以下事实。

氢的原子核：

1. 带有正电荷，其所含有的电荷量是物质所带电荷量的最小单位
2. 是无法再继续分割的粒子的一种

由于上述实验是在氮气中进行的，由此可推断出氮气的原子核中一定也含有相同的物质。附言之，氮位于元素周期表的第7位，其原子量为14。

通过以上研究，卢瑟福将“形成氢的原子核的粒子”命名为proton，其由来为在希腊语中意思为“最初”的protos。由于氢的原子核只带有一个最小单位的正电荷被称为质子。

这是1919年卢瑟福发表有原子核的原子模型之后第8年发生的事情。

♣ 中子的发现是一场后来居上的赛跑 ♣

发现“构成原子的物质其中之二”的是之后的事情。至于发现者，虽然说是英国物理学家詹姆斯·查德威克，但从研究的过程来看，说是众多科学家智慧的结晶可能更加合适。

到马上就要“发现”为止的过程是由居里夫人（玛丽·居里）的女儿伊伦·约里奥·居里，女婿弗雷德里克·约里奥·居里进行的。

在那之前，科学家们都知道当用 α 粒子轰击铍（位于元素周期表第四位，原子量为9.0）时，会产生强烈的放射线。而且，这种放射线有很强的穿透性，可以穿过几乎所有的物质。即使是水泥板或金属板都无法阻挡。

说起具有很强穿透性的放射线，能让人们立刻想起的，一定有由W·C·伦琴于1895年发现的X射线。当然，至于这种射线与X射线是否相似受到

怀疑，当时的很多科学家都认为，它有可能是与X射线电磁波相同而波长相近的 γ 射线。

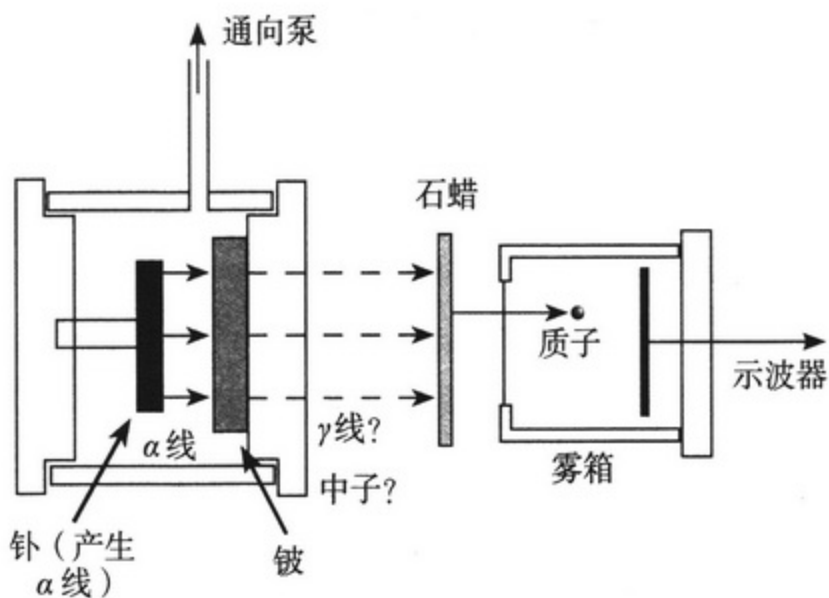
约里奥·居里夫妇并不认同这个结论，于是他们继续进行实验研究。当用仍然是个谜的这种射线去轰击含有氢的化合物石蜡时，他们发现，高能量让质子从原子中分裂出来。

由于质子从原子中分裂了出来，如果是台球的爱好者可能会由此判断：有可能是和质子质量相同或者是比质子重的其他的粒子。而在这里约里奥·居里夫妇却犯了一个严重的错误。他们没有完全摆脱 γ 射线学说的影响，而发表说“有可能是含有高能量的 γ 射线的粒子”。

下章之后会详细说明，现在捎带提一下，20世纪20年代，认为“光（电磁波）也具有和粒子相同的性质”的爱因斯坦的光量子假说对物理界产生了很大的影响，约里奥·居里夫妇认为他们的研究结果正好和爱因斯坦的光量子假说相符，很可惜，他们的判断并不正确。如果他们能更简单一点思考的话，发现中子的荣誉应该是属于约里奥·居里夫妇的。就像踢足球时，一直带球到门前，却在最后关头没有射中球门一样。

而迅速将“踢偏了的足球”捡起来的正是查德威克。他非常关注居里夫妇的论文，不停地重复着同样的实验。通过反复研究思考，查德威克认为：这种放射线并不是 γ 射线，而是质量与质子基本相同的中性的粒子，并将其命名为中子。这是居里夫妇发现相同现象之后第二年，也就是1932年的事情。

虽然在发现中子的这场赛跑中，伊伦·弗雷德里克·约里奥·居里没有取得胜利，他们却在人工放射性元素的研究上得到认可，两个人于1935年获得诺贝尔化学奖。除此之外，妻子伊伦·约里奥·居里历任过科学部门国务副部长，巴黎大学教授，原子能委员会委员等，获得了作为科学家的无比高尚的荣誉。由于长期进行放射线的研究，妻子伊伦·约里奥·居里最终因患白血病而去世，她充分的继承了和她母亲居里夫人一样的对科学的热情态度。



发现中子的实验

◆ 原子量与原子数，哪个在前面？ ◆

进入 20 世纪 30 年代，虽然好不容易将构成原子的粒子电子、质子、中子全部聚齐了，而实际上在 1869 年提出元素周期表的阶段，就已经在一定程度上预测出了这样的结果。

周期表中，氢、氦、锂、铍……等元素是按照原子数的顺序排列的；这个说到底只是结论。门捷列夫发表的周期表里的元素是按照原子量由小到大的顺序排列的。这样的话，为什么说“显示出周期性的类似的性质”是他的发现呢？

原子量是指

按照一定的规则所规定的元素的原子的质量。

现在是以碳 (^{12}C) 为标准，而以前是以氢，然后是氧 (^{16}O) 的质量为标准来决定的。

测定的方法是将需要测定的元素的原子和作为标准的原子化合，从增加的质量来推测出其质量。可是在元素发现的黎明期（初期），这个数值让很多学者为之困扰。

到氢、碳、氧、氮为止还可以，分别是 1、12、14、16 的整数。虽然与正确的数字相比可能有些误差，但就当时的实验精度来说，测算的结果基本上都是整数。

“氮的原子量测算出来了！”

“正好是 14。”

“太好了！”

像这样的热烈场面可能会一直继续下去吧。

可是，不久便出现了非常微妙的元素。例如到了氯附近，原子量大约是 35.453，无论怎么花工夫都得不到整数。

研究进一步发展，人们发现反而不是整数的元素比较多。

这个结果和“按照顺序排列就能够显示出周期性”的周期表的基本概念并不吻合。周期性（周期率）是指，排列的元素中显示出有规则的相似的性质，可是“排列的标准”却不是整数，不免让人觉得心情不是很舒畅。

再试着按照原子量的顺序排列一下，我们发现数字也不是很整齐地增加的。碳→氮→氧的原子的重量虽然是不断增加的，但是原子量的变化是 $12 \rightarrow 14 \rightarrow 16$ ，为什么没有 13 和 15 呢？这当中虽然好像隐藏着什么秘密，暂时还是按照重量的顺序来排列，并且为了容易理解把它们编上号。这就是原子数。

也就是说，按照定义是原子量^{*}在先，原子数只是在制作周期表时为了方便编上的数字而已。发现它与原子中的质子或者电子的数量相同是之后的事情。

原子量的大多数之所以不是整数是因为存在在化学课上所学的同位体。例如原子数 17 的氯的原子核里含有 17 个质子，中子的数有 18、19、20 三种。质子和中子的数量的和是其质量数，把这个数字标在元素符号的左上角，分别就是 ^{35}Cl 、 ^{36}Cl 、 ^{37}Cl ，以用来区分。

这当中的 ^{35}Cl 和 ^{37}Cl 很稳定地存在于自然界中，其中 ^{35}Cl 的比率是 75.77%， ^{37}Cl 是 24.33%。由于在自然界中无法存在， ^{36}Cl 的比率是 0%。

于是，氮的原子量是将 ^{35}Cl 和 ^{37}Cl 按照存在的比率平均之后得来的，是 35.453，不是整数。

※“原子量”和“质量数”的值基本一致，是将前者的同位体存在的质量比加重之后计算其质量数的加重平均得来的。

◆ 基本粒子的微妙的定义 ◆

已经说到了电子、质子和中子，接下来简单地了解一下基本粒子。

基本粒子被认为是“构成物质的最小单位”的粒子。原子的研究毫无疑问就是探索什么是基本粒子的研究。

可是，由于人们明白了原子并不是“无法继续分割的原子”，这之前被认为是基本粒子的物质都一个一个地被淘汰出局，而使研究进入了混乱状态。

玻色子 (boson)	规范玻色子 传递基本粒子 之间的相互作用 力的粒子	光子 传播电磁相互作用力
		弱玻色子 传播弱相互作用力 ^{※1} 。有 3 种
		胶子 传播强相互作用力 ^{※2} 。有 8 种
	引力子 传播引力(尚未发现)	
	希格斯玻色子	赋予基本粒子质量(尚未发现)

※1 弱相互作用力：引起基本粒子衰变的相互作用力。其典型的例子是放出粒子而使原子核发生衰变的 β 衰变。

※2 强相互作用力：将核子结合在一起形成原子核以及与基本粒子的生成·散射过程有关的相互作用力。

作为相互作用力媒介的基本粒子

		世代	电荷	
费米子	轻子	电子 (e)	第 1 世代	-1
		μ 粒子	第 2 世代	-1
		τ 粒子	第 3 世代	-1
		电微子 (ν_e)	第 1 世代	0
		μ 微子 (ν_μ)	第 2 世代	0
		τ 微子 (ν_τ)	第 3 世代	0
	夸克	上夸克 (u)	第 1 世代	2/3
		粲夸克 (c)	第 2 世代	2/3
		顶夸克 (t)	第 3 世代	2/3
		下夸克 (d)	第 1 世代	-1/3
	奇夸克 (s)	第 2 世代	-1/3	
	底夸克 (b)	第 3 世代	-1/3	

构成物质的基本粒子

现在，“探索真正的基本粒子”仍然是量子力学的热门课题。用漫画的故事说明不是很容易，在这里进行一下总结。

最新的量子力学研究认为形成原子形状的力、电磁力、重力等“力”是由基本粒子的作用形成的。在这里不作详细说明，这一类基本粒子被归类为玻色子 (boson)。

虽然电子在现阶段被认为是基本粒子，但是由于已经发现质子和中子也有其内部结构，所以准确地说电子并不是基本粒子。只是，关于这一点还不是很明确，有的书中也将质子和中子归类为基本粒子，这是需要注意的地方。

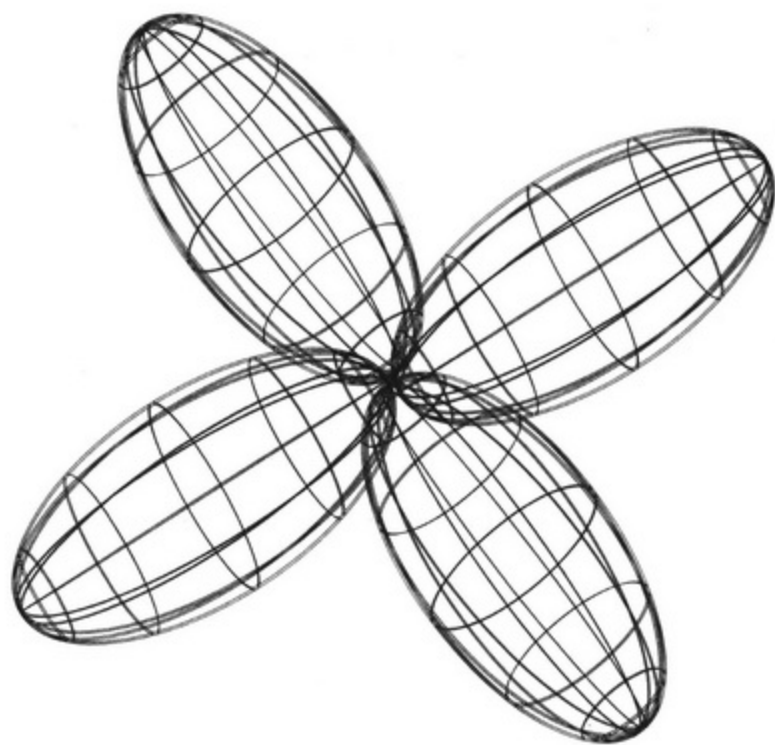
在这里，将现在大多数物理学家所认为的“构成物质的基本粒子”夸克和轻子（两者合在一起叫费米子）总结成上面的一览表。

无论是夸克还是轻子还是玻色子，全部放在一起的话数量会非常庞大，与只有“电子、质子和中子”的时代相比，会感觉到有点麻烦。但是从原子的构造，特别是物质的形成过程的理论性的研究来考虑的话，现在的观点会更合适。

然而，最近，认为所有的这些粒子都只是具有有限的大小的“弦”的振动状态的“超弦理论”受到关注，到头来，谁才是真正的基本粒子，还没有一个定论。

第 4 章

没有量子力学就没有原子





虽然身材矮小身手可不错。

请雇佣我吧！



啊，
那个是……

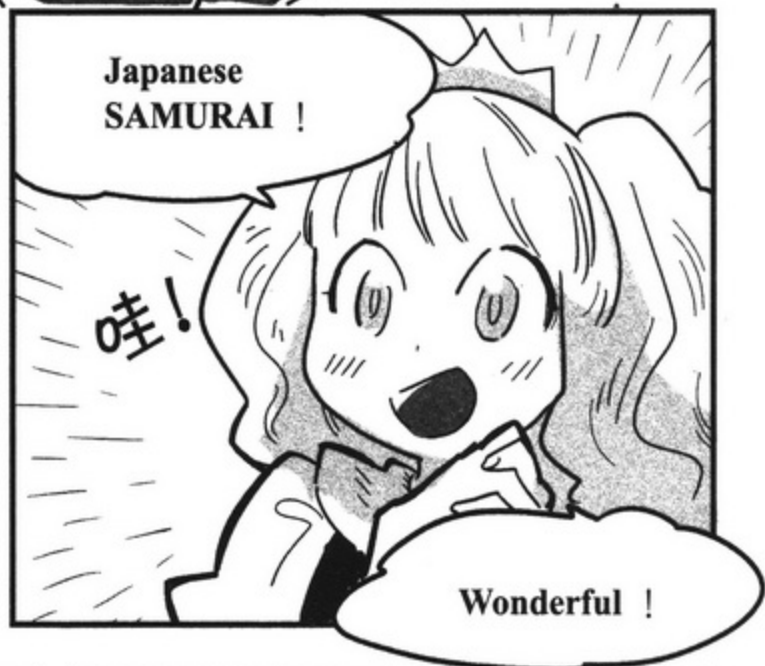
扑
通
扑
通

于是，坐在树叶做的
船里的拇指姑娘
漂了过来。



这位很合我心意的小
巧的姑娘芳名是？

我
叫
小
巧



Japanese
SAMURAI !

哇！

Wonderful !



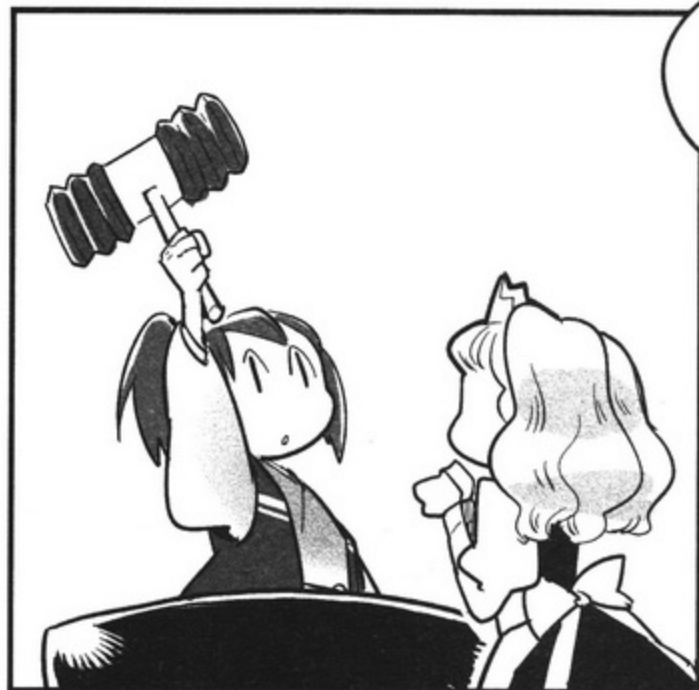
说的真流利！

是国外来的客
人吗？

请稍等一下，自
动翻译机……



看！



错了。这是从刚刚被我打败的妖怪身上夺来的小槌子。

Oh, Japanese traditional hammer?



什么，说摇这个小槌子？小菜一碟！



开始！



说明：一寸法师手里的小槌子上有写着“变得更小”的字样。

可是不凑巧他并不是会注意这个细节的人。

发出一声巨响！

光芒四射

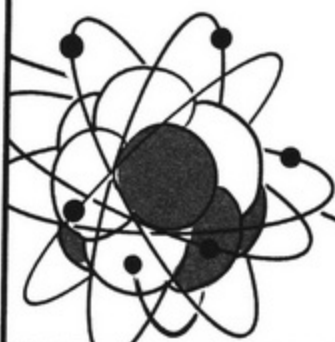


这个原子很奇怪啊！

奇怪？



从原子核的构造来看，有6个质子，6个中子，应该是碳原子。



这样的话就必须有6个电子。

确实如此。有6个带正电荷的质子的话，如果带负电荷的电子不是6个的话就不能保持平衡了。

你也来帮忙。



好，这样的话就是原子了。

等一下！

谁？



轰的
一声

我是从未来国度来的
量子假面！

关于量子，只要是我
明白的，都交给我吧！

嘴角还粘着布
丁呢。

啊？

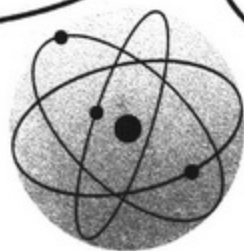
为什么在别人的厨房
里随便的偷吃呢？

小信息：据说乳蛋糊布丁是在明治中期传入日本的。

你突然跑出来，
想说什么呢？

卢瑟福认为原子核和电
子的关系就像太阳和地
球的关系一样。

是哦，跟原子的
形状一样。





4.2 电子并不像球体一样会自由下落

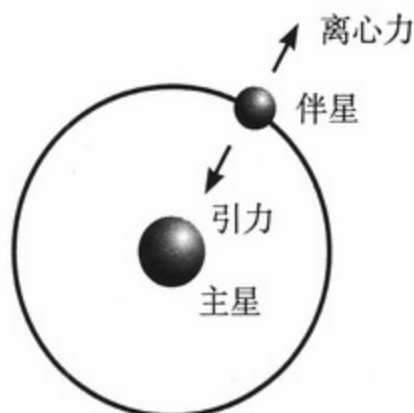


讚岐教授的演讲 1

可能是因为说认为电子在原子核周围不停旋转的卢瑟福的原子模型和人们非常熟悉的天体图完全一致会让人们更加容易接受，至今天体图仍然经常被用作原子的形象图，因此让很多人都认定了“原子是这样一种结构”。可是这是完全错误的。

首先我们来说明一下天体的公转。

以太星系为例，位于中心部位的太阳（主星）和
在它周围旋转的行星（伴星）之间如果没有作用力的话，行星就会向着它运动的方向一条直线似的飞出去，可是由于受到引力的吸引行星才按照一定的轨道运动着。

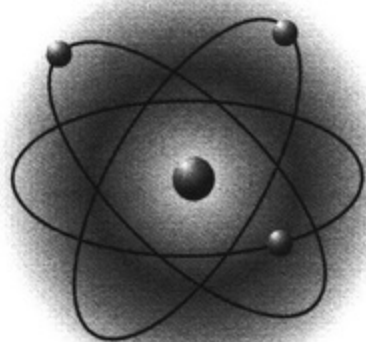


天体的公转

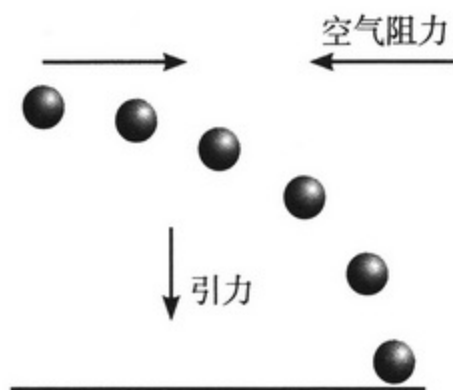
然而这种平衡并不是稳定的。当然，我们生活的地球并不会突然的偏离公转的轨道，可是在宇宙当中打破这种平衡的事情是经常发生的。小的天体由于引力而坠落到恒星或行星上的事情并不稀奇。

有发生在我们身边的更好的例子。

在往平行于地面的方向扔球的时候，最初是往横的方向飞的。这和以地球为中心的公转轨道是一致的。可是由于达不到人造卫星的速度（围绕地球旋转的轨道速度或第一宇宙速度，在地面上是 7.9km），所以很快就会落下来。即使是想以比这个更快的速度扔出去，由于地球上存在的空气的阻力，速度很快就会慢下来……



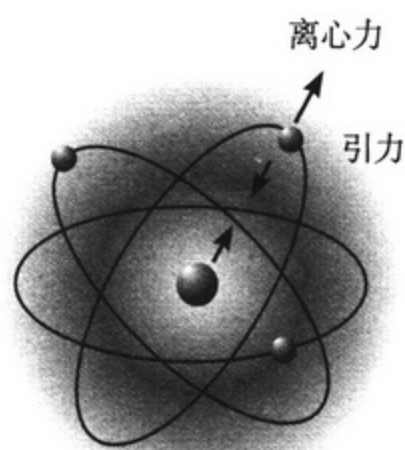
卢瑟福的原子模型



球体的运动

让我们再来思考一下卢瑟福的原子模型。他认为由于以下两种力量的平衡，原子才能够维持它的构造。

1. 带有负电荷的电子和带有正电荷的原子核各自所带电量的抵消
2. 电子在原子核周围高速旋转所产生的离心力



卢瑟福的观点

由于这种机制和天体的公转相似，乍一看很有说服力，实际上存在很大的问题。

刚刚我们说了，天体公转时引力和离心力的平衡被破坏而无法继续的情况时常发生。月球上存在的很多火山口似的突起，可以说正是说明失去平衡坠落下来的天体的数量之多的证据。

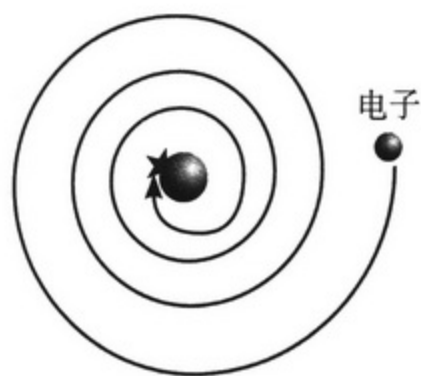
可是，整个宇宙当中有如此多的原子，从太古时期至今却没有发生过这样的“案件”。

这里之所以说是案件，是因为在原子当中，如果电子被原子核吸引而撞向原子核的话，会产生很严重的后果。

由于原子失去了其原有的构造而发生了衰变，由原子构成的物质也就有可能消失了。

然而，世界上的很多物质都一直很稳定的存在着。无论你怎么仔细地看，电子都不可能撞到原子核上。因撞上原子核而“牺牲的原子”也是不存在的。

卢瑟福的原子模型，反映出了通过实验所判明的原子核的大小，从构造上来说是非常接近事实的。可是，如果是那样的话，为什么不会坏呢？这是困扰当时的物理学家们的最大的问题。



被吸引的电子



卢瑟福的原子模型确实没有能够说明电子的稳定状态。

是吗？

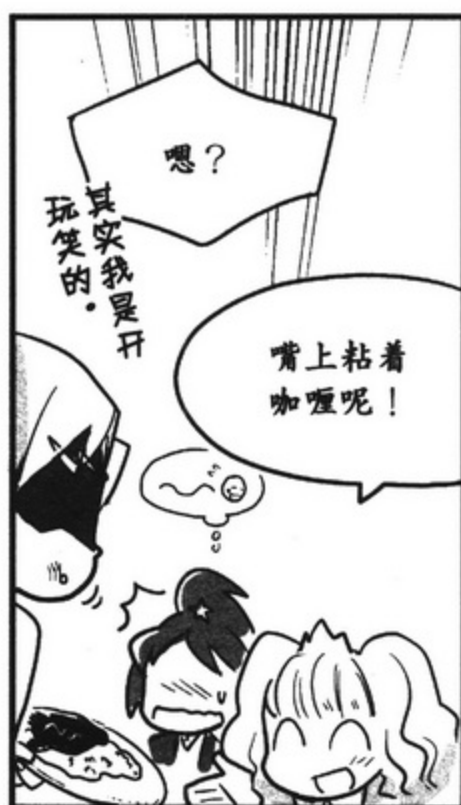


如果电子不停地旋转的话，不是有可能会累吗？

乒!
乒!



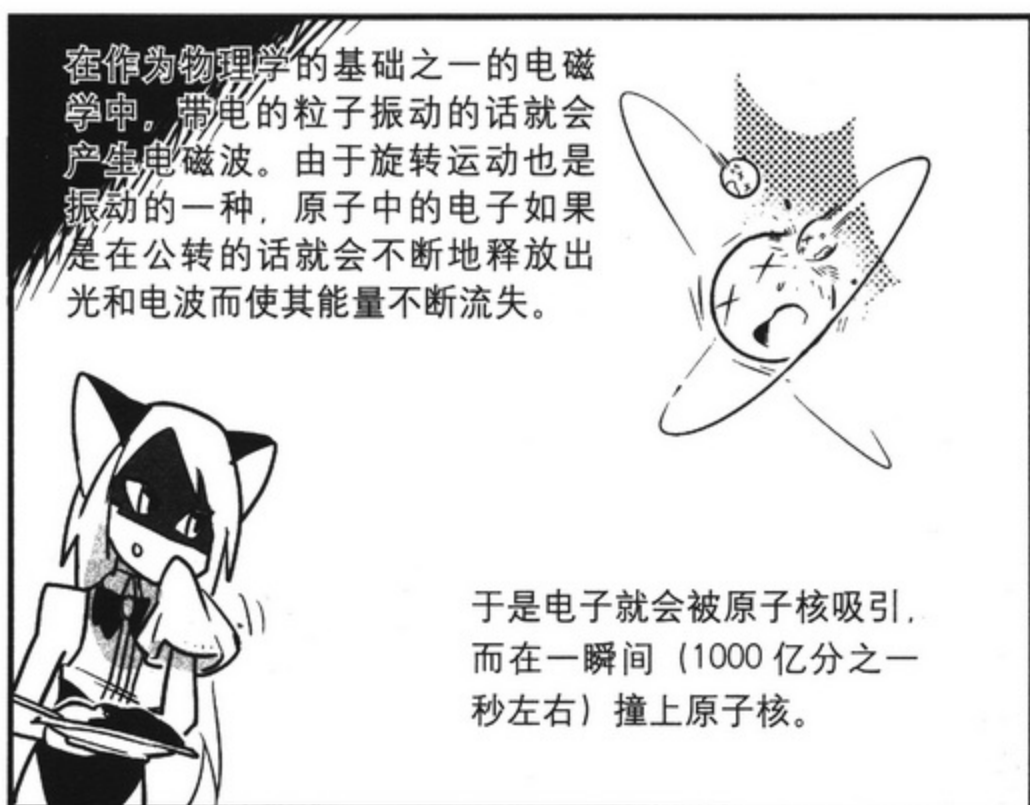
实际上根据一直以来的物理学理论，电子最终应该是会累的。



嗯？

其实我是开玩笑的。

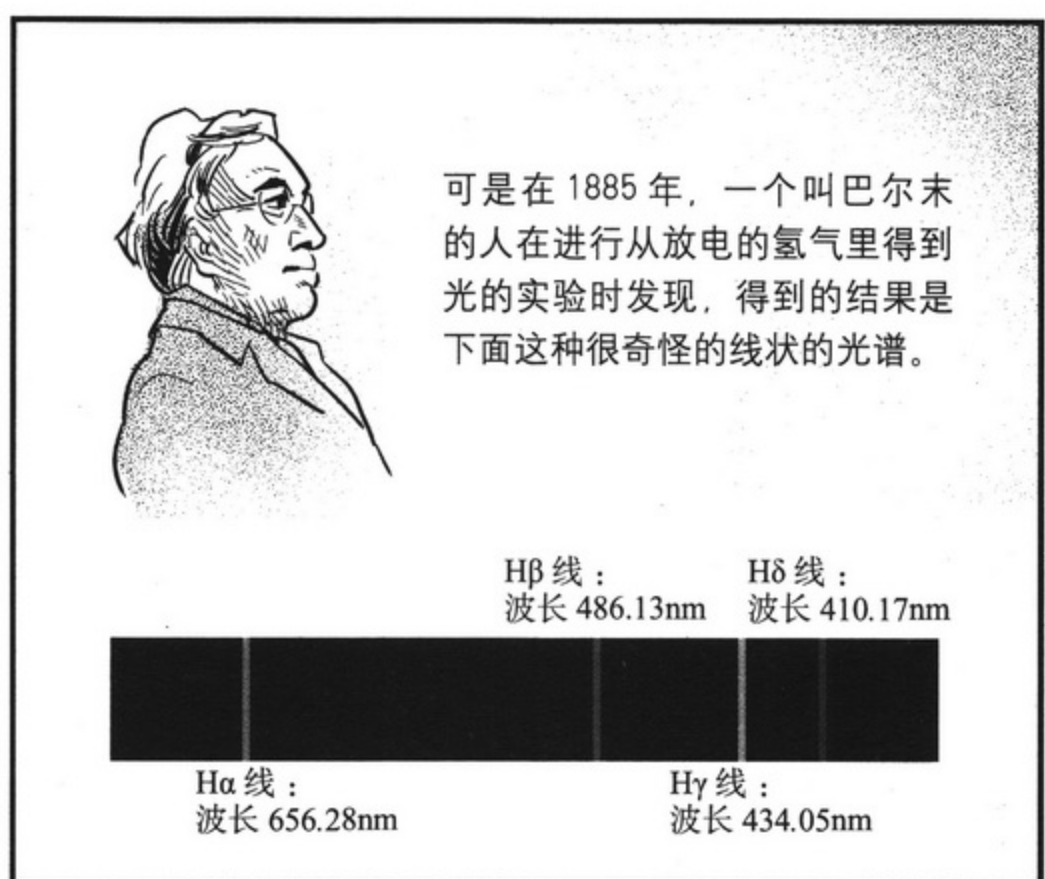
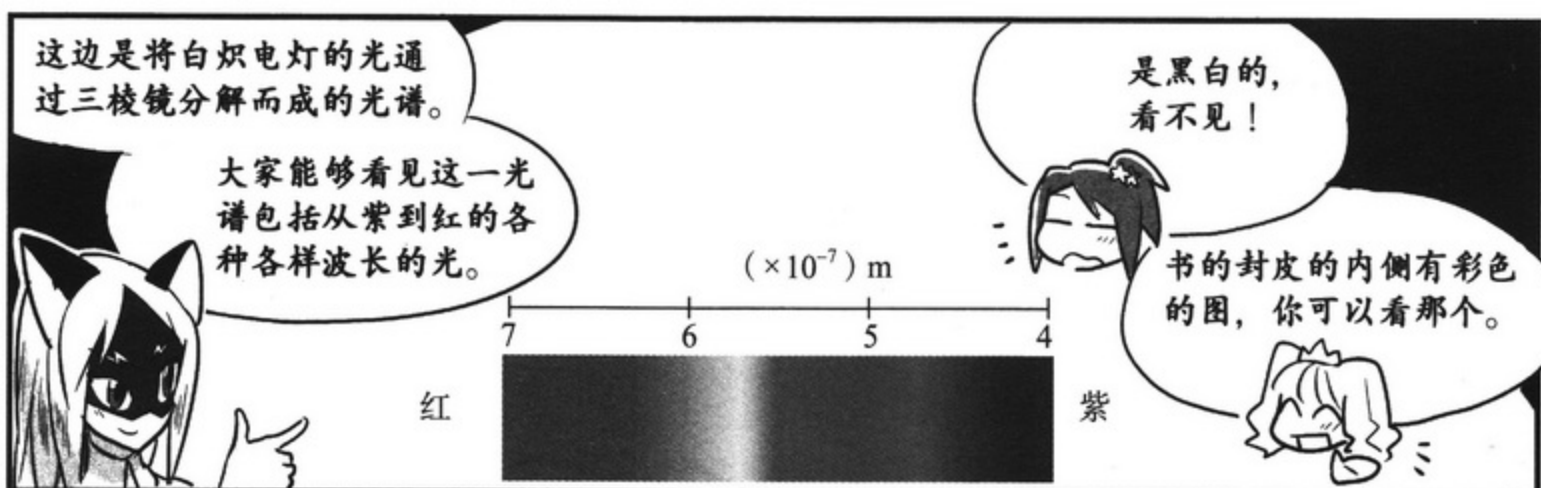
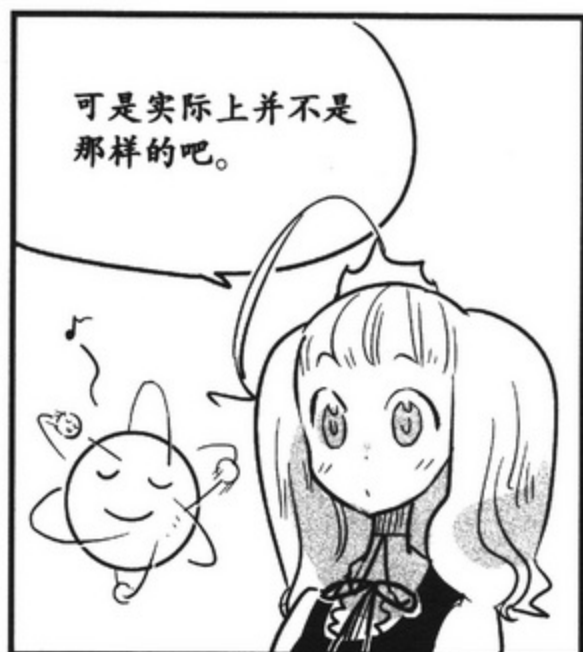
嘴上粘着咖喱呢！



在作为物理学的基础之一的电磁学中，带电的粒子振动的话就会产生电磁波。由于旋转运动也是振动的一种，原子中的电子如果是在公转的话就会不断地释放出光和电波而使其能量不断流失。



于是电子就会被原子核吸引，而在一瞬间（1000 亿分之一秒左右）撞上原子核。



是说只出现了一定波长的光吗？

而且线的排列方式上似乎还有一定的规律。

你们注意到了很重要的地方啊。由于巴尔末也是中学的数学老师，他努力的思考着这里出现的4个波长的数字之间是不是存在某种规律。

于是便导出了这样的公式。

$$\lambda = f \times \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

λ : 光谱线的波长 f : 364.56nm (常数)

n : 3, 4, 5, 6 等整数值

例如 $n=3$ 的时候

$$364.56 \times \frac{9}{5} = 656.2 \text{ (nm)}$$

这与实验中得到的 H α 线的波长 656.28nm 很接近。

多么简洁的一个公式啊！

好在巴尔末擅长数学。

可是，50岁发现光谱的巴尔末直到60岁才总结出这个公式来。

真了不起！

那个意思根本不是

这是要告诉我们科学之所以能进步正是因为有这些勤勤恳恳的人们。



4.3 波尔的原子模型



讚岐教授的演讲 2

首先，波尔认为原子中的电子的轨道只有在特定的能量的状态下才会存在。如果把它模式化的话就是以原子核为中心的同心圆。然后越往内部的轨道能量越低，越往外部能量越高。而且，同心圆的半径的比是如同

$$\frac{r_n}{r_1} = n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots, r_1 = 0.529 \times 10^{-10} [\text{m}])$$

所表示的，是用整数的 2 次方来表示的分散的值。而且各轨道是与符号为负，和半径成反比例的电子的能量 E_n 相对应的。于是这个 E_n 也和 n^2 成反比例，所以就把它称之为，电子的能量准位是离散的。离散是指非连续的，中间是“跳跃”过去的意思。

波尔能考虑到这一点，是因为得到了一个很大的提示。这一提示是指德国物理学家马克思·普朗克于 1900 年发表的表示“黑体放射”的光谱的公式。黑体是指拥有可以将入射的电磁波全部吸收，然后向周围 100% 全部释放出去的拥有表面的假想的物体。能够显示出由温度所决定的放射出来的光谱的独特形状。熔炉上面开的小孔由于可以让内外的光全部穿过，而被认为是和黑体表面一样。从这个小孔出来的所谓的“空洞放射”也拥有黑体放射的光谱。导出这个表示空洞放射的光谱的公式在当时是物理学界的一大课题，虽然有很多科学家都挑战了这一课题却都没有成功。成功的突破这个难关的是普朗克。

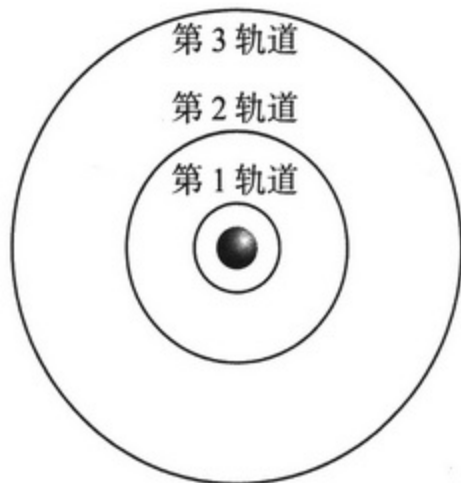
他首先考虑到，在充满在空洞（熔炉）中的电磁波中，振动数为 ν 的电磁波只允许 $h\nu$ 的整数倍的数值通过。也就是

$$E_n = nh\nu \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots)$$

（光能）=（整数）×（普朗克定数）×（振动数）。

n 的值越大个数当然就越少。于是普朗克假设其个数是随着在气体分子的速度分布中经常能看到的波尔兹曼分布 $Ke^{-nh\nu/kT}$ （ K 为定数）而变化的。将 $n=0$ 到 ∞ 代入





波尔的原子模型1

$nh\nu \times K_e^{-nh\nu/k_B T}$ 后得到的数值相加来求出振动数为 ν 时放射出的总强度，于是便可以计算出从黑体的表面（例如熔炉上的小孔）的单位面积每秒向外部放射出的振动数为 ν 的光的能量为

$$F_\nu = \frac{2\pi}{c^2} \frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

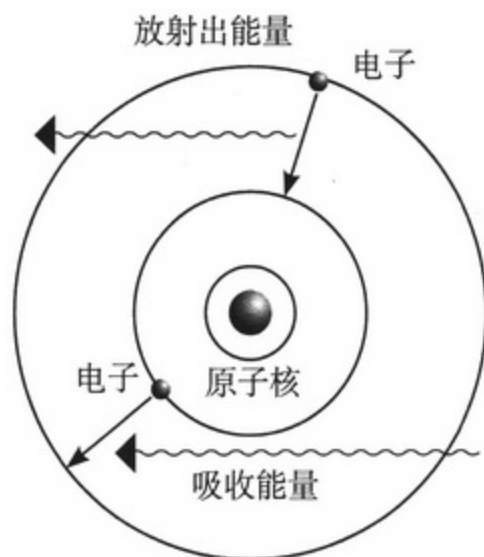
e : 自然对数的底 k_B : 波尔兹曼定数 c : 光速
 h : 普朗克定数 T : 黑体表面或空洞内的绝对温度

这个公式可以极其精确地表示观测到的黑体放射的光谱。现在被称为“普朗克函数”的公式正是这个（见 P.139 图）。

据说一开始普朗克在这个放射公式下信笔写下了“完”，之后才重新添加上了上述的推导过程。与实验值完全一致的事实说明了认为放射的能量是以 $h\nu$ 为最小单位（量子）来活动的他的量子假说的正确性。于是他的这一想法为之后的量子学说的研究拉开了新的序幕。

波尔从他的这一想法里得到提示，他想如果光是这样的话那么电子就有可能也是这样的。像这样继续思考下去的话，巴尔末的公式中所包含的整数的问题也就可以得到解释。于是被发表的波尔的原子模型认为存在像 $n=1, n=2, \dots$ 这样按照离散的能量标准变化的电子轨道。而且当原子受到外部能量的冲击时，电子便会移动到比现在的能量状态要高的轨道上，当电子再次回到原来的轨道时就会放射出多余的能量。

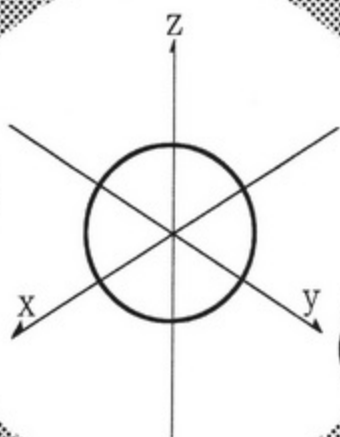
如果只能采集到用整数表示的“离散的”电子轨道的能量的话，那么电子在改变轨道时吸收或放出的能量便是它们的“差”，正好就是由整数导出的“离散的”量。这与巴尔末所发现的线状光谱的规则性完全一致。这正是改变时代的伟大思想。



波尔的原子模型2



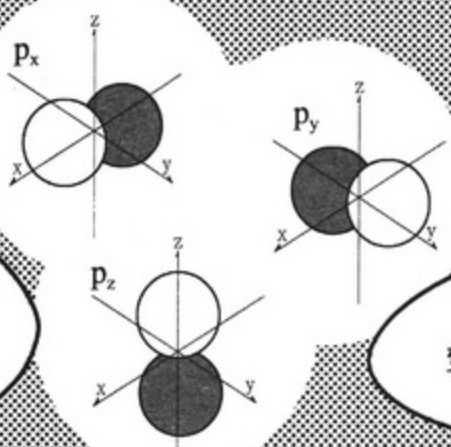
这是位于能量标准极低的
K 壳的 s 轨道。



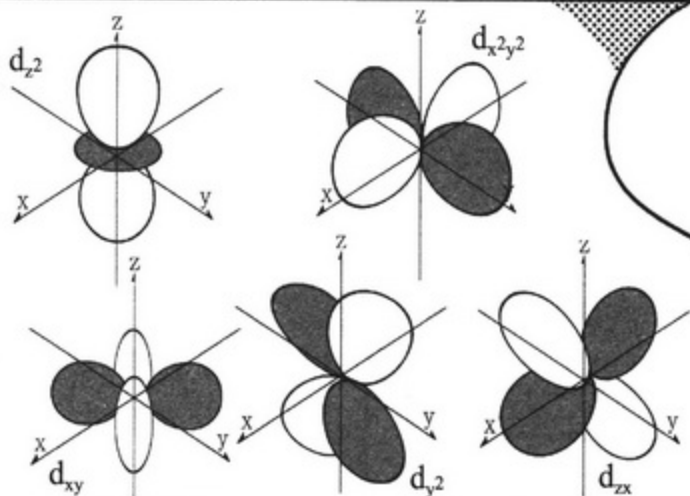
圆的比较容易
理解吧。

接下来是位于第二位的 L
壳的 p 轨道的模型。

这里有 p_x 、 p_y 、 p_z
三种轨道。



变得有点复杂了吧。



这是位于第三位的 M 壳的 d
轨道的模型，有 d_{xy} 、 d_{yz} 、 d_{zx} 、
 $d_{x^2y^2}$ 、 d_{z^2} ，

五种轨道。

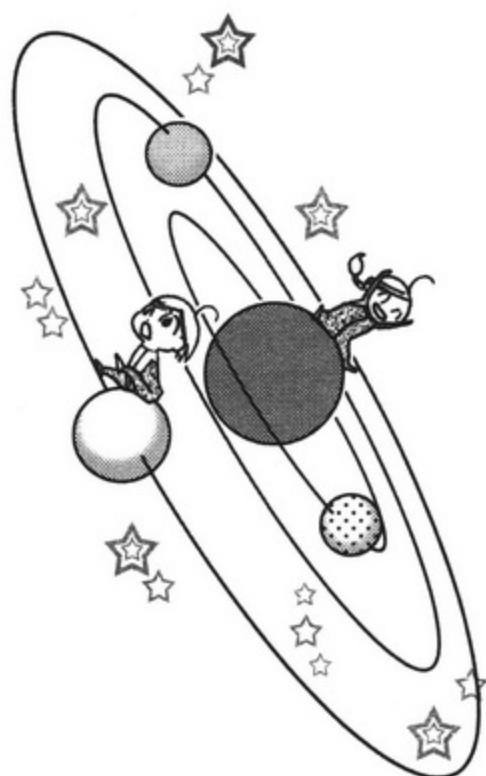
和书上写的完全
不一样啊。

还有？



♣ 波尔为什么被称为“量子力学之父” ♣

♣ 不要去考虑不合适的事情 ♣



20 世纪的两个物理学理论之一的相对性理论是由爱因斯坦一个人独自完成的（准确地说应该是由爱因斯坦数学不是很好，有几个人帮助他进行了数学方面的计算……），而与此相对应，量子力学是很多学者共同智慧的结晶。没有特别的代表者，这也是它不为一般人所熟知的原因之一。如果“一定要说量子力学的领袖是谁的话”，也就只能说是尼尔斯·波尔了。

可是读了量子力学的书却发现这位波尔先生似乎并不是那么伟大。反而作为他后辈的薛定谔呀，海森堡什么的似乎拥有更加辉煌的成就（他们的名字也更加有影响力）。

因此，现在整理说明一下波尔所获得的成就。

他想要真正的开始研究原子内部结构的时候，已经发表了的是以下的理论和假说。

- 巴尔末所发现的氢原子的线状光谱的规律性（巴尔末系）
- 普朗克所判明的能量的量子性
- 然后是英国留学时代的大师卢瑟福的行星系列原子模型

波尔以这三个理论和假说为“材料”，一直在思考更加具有说服力的原子的样子。与实验相比他更加重视思考，所以一直都是副眉头紧锁的神情。深思熟虑的结果是 1913 年他发表了同心圆形的“波尔的原子模型”。

可是这个原子模型从某种意义上来说也没什么大不了的。毕竟，被认为是卢瑟福模型最大缺陷的“如果电子被原子核吸引，电子是否会衰变？”的疑问并没有得到解释。而且虽然思考出了巴尔末系产生的机制，却并没有解释为什么会发生。对于不明白的地方，根本不提及，只是说“现在暂且忽略”。实在是太狡猾了。

虽然这么说，但这种说法似乎有点儿过于苛刻了。新的假说之所以被称为“新的假说”

正是因为它是以往科学家无法解释的，所以说明不了也是没有办法的事情。这种情况之下，如果用适用于这一假说的内容能够集中的说明比以前更多的内容，形成新的假设并能够证明它的正确性的话，就能够判断作为条件的假设的正确性。从这一意义上来说波尔所导入的原子模型也并不是那么没有道理的。

◆ 并不是伟大的发现而是伟大的假说 ◆

波尔的原子模型有两个重点。

第一个是量子条件，写成式子是这样的。

$$2\pi r \times mv = nh$$

r : 电子的轨道半径 m : 电子的质量

v : 电子的速度 n : 整数 h : 普朗克定数

波尔认为，原子（氢）在不发光的稳定状态下，围绕圆轨道的圆周 $2\pi r$ 旋转的电子的运动量 mv 应该是一个固定的数值。然后只是用数学算式说明了作为当时刚刚发现的普朗克定数的整数倍的“离散的”数值的观点。

第二个重点是振动数条件，如下。

$$\nu = \frac{E_b - E_a}{h} \quad (E_b > E_a)$$

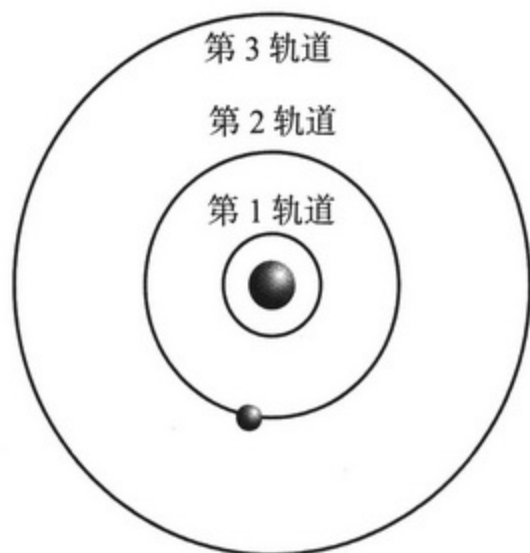
ν : 电子所放出的光的振动数 E_a : 电子位于 $n=a$ 的轨道上时的能量

E_b : 电子位于 $n=b$ 的轨道上时的能量 h : 普朗克定数

它所表达的意思是氢原子的电子在轨道之间移动时发出的光形成线状光谱，每一个轨道的电子所带的能量是一定的，振动数取决于被认为是物理量的最小单位的普朗克系数。也就是说，如果原子中的电子符合这两个条件原子就不会发生衰变，巴尔末系也就是必然的了，说到底这些都只是假设（只是在大约 $t=10^{-8}$ 时，会自动地向下方移动）。

当 $n=1$ 时，电子轨道的半径叫波尔半径，大约是 1 厘米的 2 亿分之一。电子不可能更加接近原子核……这是波尔老师的判断。

如果是这样的话，作为卢瑟福原子核模型会发生衰变的理由，虽然有“在电磁学中，带有电荷的粒子（在这种情况下是电子）发生振动（旋转）运动时在发出电磁波（光）的同时释放能量，离心力一旦消失电子就会被原子核吸引”的理由，关于这个疑问，波尔也作了简洁明了的回答。“在原子中不可能发生这样的情况”。没有任何理由。由于电子的发光只会在移向能量标准不同的轨道时才会发生，所以即使在旋转也不会产生这种现象。即使是这样，波尔老师仍然断言说：“原子的内部就是这样一个奇怪的世界！”



波尔的原子模型

◆ 只要符合“道理”就能够找到出路 ◆

更大的问题是，波尔的理论（假说）并不适用于氢原子以外的复杂一点的原子。也就是说到铀为止的 92 种自然存在的元素中有 91 种都无法解释线状光谱现象。

可是即便如此，波尔仍然是非常伟大的。他在家乡丹麦的哥本哈根非常受尊敬。据说波尔在即将出站的公共汽车上发现了他的朋友而上前跟他说话的时候，当时两人就学术问题展开了讨论，市民们认为“波尔老师即将提出新的理论”而没有一句怨言，一直等候在停着的公共汽车里。

波尔之所以伟大的理由，实际上正是他对于无法解释的地方可以爽快地放弃这一点，然后笑着说“就是这样一个特别的世界”。不，笑没笑我们不知道，这里表现出他的自信，他相信过不了多久一定有人（或者是自己）能够解开这个谜。

例如关于他自己的理论，虽然只适用于氢原子，他却坚信“只要把它复杂化就可以解释其他原子的一举一动”。也就是说，他擅长于“看清物质的本质”。关于这一点，后来围绕量子力学的解释好几次发起论证的爱因斯坦也曾说过，“波尔的直觉和才能是可以响彻思想的宇宙的音乐”。

事实上，波尔的原子模型存在很多错误，包括认为电子与行星和卫星一样是围绕轨道旋转的，但作为它的中心的量子条件和振动数条件是没有错误的。因此它的进一步发展才构筑了今天的量子力学体系。虽然活跃在这个阶段的学者有很多，如薛定谔，海森堡等，但是能够被称为“量子力学之父”的只有尼尔斯·波尔。

◆ 波的能量必然会变成“电子” ◆

追溯物理学的历史，到波尔之前为止是前期量子论的时代，从波尔开始终于进入了以量子论为基础的形成真正的理论的后期量子论时代，也可以说是拉开了量子力学的帷幕。

那么，之前讚岐老师的解说里出现的普朗克怎么样了呢？

翻开科学的历史，第一个想出了通用于电子的概念的人就是普朗克。关于这方面的内容在 P.131 已经提到了，现在再补充一些。

19 世纪欧洲的制铁业非常繁荣，为了能够制造出高品质的铁各国激烈交锋。最后的王牌是确立了测量熔炉内部正确温度的方法。毕竟铁的熔点有 1500 度之高，普通的温度计根本无法测量。于是只能通过查看熔炉中铁的颜色的变化来判断，专业的技术者当然没有问题。可是这并不是谁都可以完成的事情。如果可以求出颜色（光的波长）和温度（与光的强度成比例）的关系式，就无论什么时候就都可以制造出品质稳定的铁来了。

很多学者都挑战了这一课题，可是谁都没有成功。以实际测出的数值为基础画出的坐标图如右侧，像拉长了下摆的裙子一样。在那之前所求出的式子中，波长短的时候（从紫到红）和波长长的时候（从红到红外线领域）是分别不同的式子。也就是说没有能够完整地论述自然现象。

这里所画的坐标图正是表示了这一状况，点线所表示的是瑞利 = 金斯公式，断续线所表示的是维恩公式，实线所表示的就是 P.132 提到的普朗克公式 F_ν 。普朗克仔细地观察着这两个公式，于是提出了这样的想法。

1. 波长短的光波的数量就多（= 振动数多），于是能量单位量就大。
2. 波长长的光波的数量就少（= 振动数少），于是能量单位量就小。

这样所推导出来的就是实线所表示的这个普朗克函数。

在这里重要的是提出了能量的“单位量”的概念。也就是“波的一个摇动（ \sim ）”，所以某种波长的光只能获得振动数的整数倍的能量。用 P.131 的公式来表示话就是，

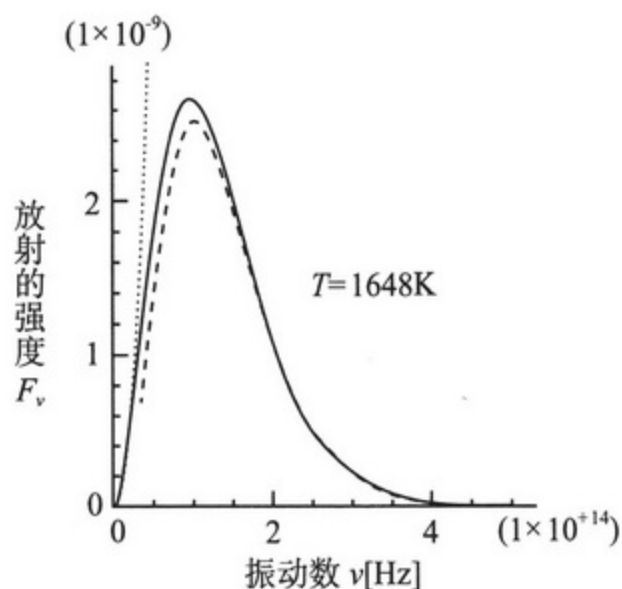
$$E_n = nh\nu \quad (n=0,1,2,3,\dots)$$

（振动数 ν 的能量）=（整数） \times （普朗克定数） \times （振动数）

实际上这是一个划时代的想法。只是这里所出现的整数 n 与波尔的原子模型的轨道半径里所使用的整数的意思是不一样的。这一点希望大家注意。普朗克增加了 $nh\nu$ 所带的众数的个数而成功地获得了光的能量的总和。毫无疑问，在 P.132 的 F_ν 的式子中当 $h\nu/k_b T$ 取非常小的量时，就得到了瑞利 = 金斯公式，相反，当取足够大的量时就能够得到维恩公式。

◆ 连外星人都知道的普朗克的名字 ◆

用按照普朗克的想法所得出的关于熔炉状态的计算公式计算出的结果和实际测出的结果基本一致。于是，



存在能量的最小单位量 = 量子

的想法的正确性得到了证明，可是可惜的是普朗克自身却多少缺乏一点看清事物本质的感觉。他错误地认为，光所显示的量子性是“因为光源的粒子（分子或原子）吸收了离散的能量”。因此而被爱因斯坦得了便宜。

爱因斯坦一边研究着普朗克的能量量子假说，一边思考着

如果光能里存在量子这样的最小单位，那么也就可以认为光的每一个单位就是粒子……

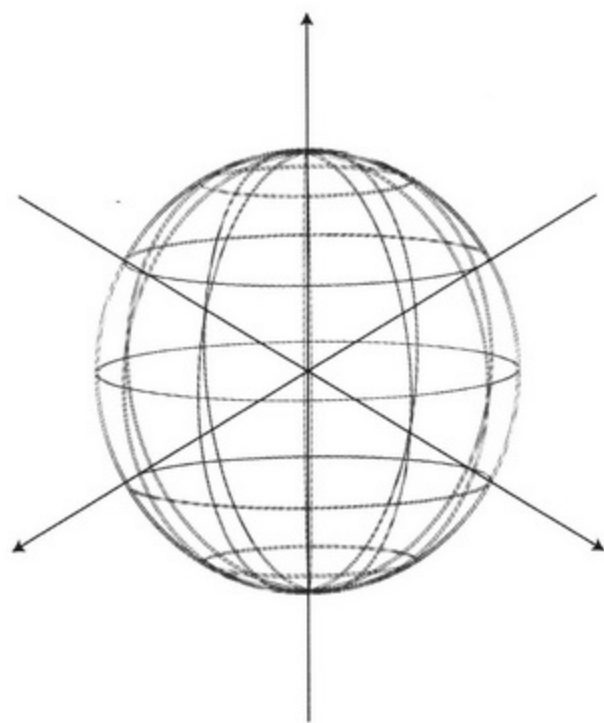
并于 1905 年总结出了光量子（光子）假说的论文（而且爱因斯坦获得诺贝尔奖的并不是相对性理论而是这个）。关于这一内容将在下一章进行详细的说明。其实普朗克在 5 年前就已经提出了量子的概念，如果可以有效地利用这一领先，这一伟大的业绩就应该是属于他的。而且，将无法找到满意的能够充分发挥自己的地方的爱因斯坦带进自己的研究室，让爱因斯坦认真研究的不是别人正是普朗克……

普朗克所留下来的普朗克定数作为量子力学基础的物理常数，几乎出现在所有的公式或者方程式里。而且，从那里产生的普朗克时间，普朗克长，普朗克质量，普朗克电荷，普朗克温度等普朗克单位系列因为都只是以纯粹的物理量为基础的，与以像“地球的周长”这样并不通用于整个宇宙的数值为基础的米公制相比，更加明确。有人甚至评价说“如果和外星人联系的话，这一单位系列一定会成为标准”。

从这个意义上来说，普朗克是一个非常伟大的人，在他的祖国德国至今仍然被认为是最受尊敬的科学家之一。因此，与波尔被称为“量子力学之父”相对应，普朗克被称为是“量子论之父”。太平无事，每个人都分得了一个称号。值得庆祝值得庆祝。

第 5 章

**在探索物质的过程中发现：
其真面目并不可爱**





明治末期，在日本没有找到工作的一寸法师和拇指姑娘一起坐着小燕子来到了遥远的异国他乡。



你好像忘了找工作了吧！

完完全全的……

真没有价值啊！



好像还忘记了什么别的事情……



算了算了！

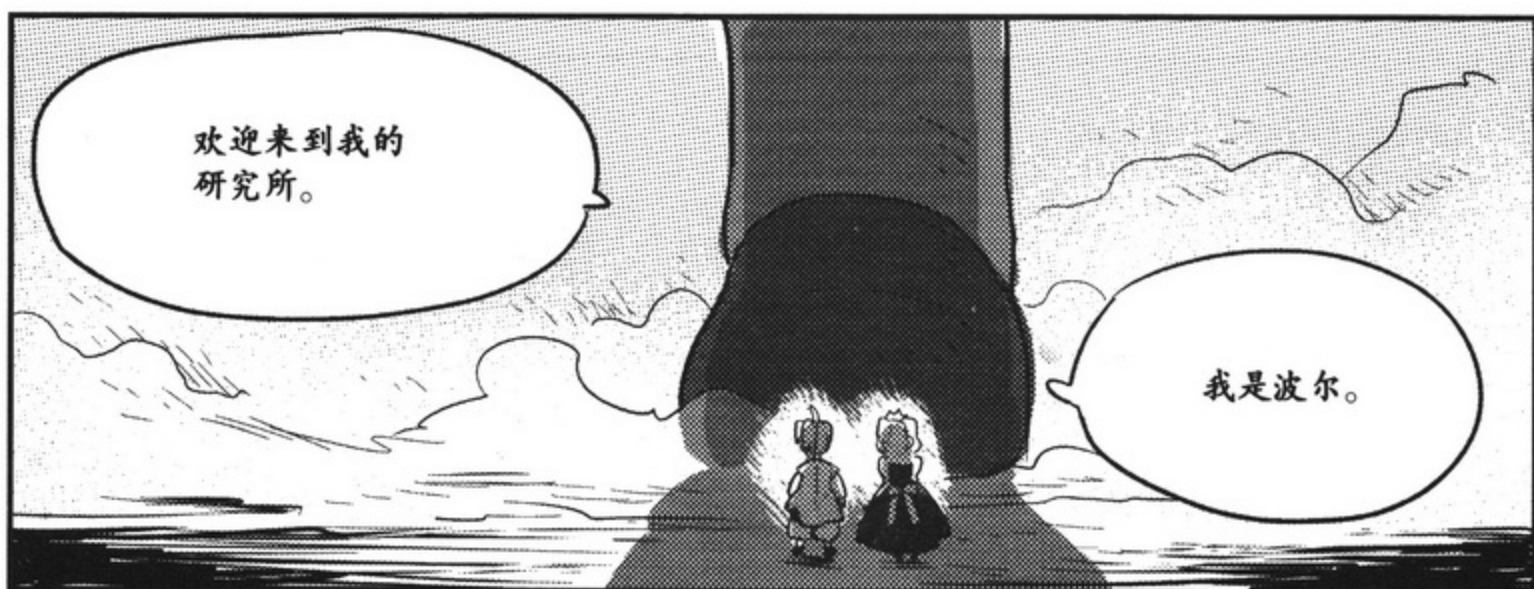


这儿是哪儿啊？

这里是丹麦的哥本哈根，我出生的地方。



小信息：第一座美人鱼的雕像是1913年完成的。



听说你们可以把
身体变小……

无论怎么小都可
以，用这个奇怪
的小槌子。

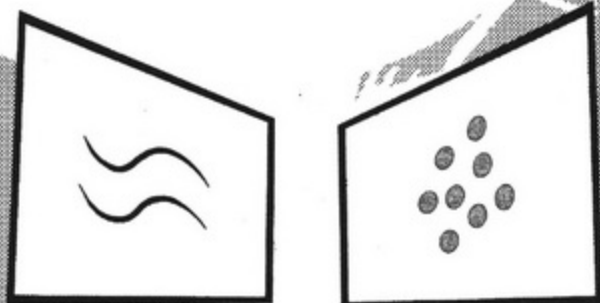
依靠它的力量，我想拜
托你们一件事情。



是什么呢？

我们希望我们所进行
的量子论的研究可以
走在世界的最前端，
所以想请你们帮我们
确认一件事情。

实际上，现在关于电子是粒子还是
波动的问题引起了大的争论，希望
你们可以帮我们调查一下这个。



明白了！



仅仅靠你们两个是很困难
的，所以给你们准备了一
位帮手。

帮手？

扑通！

疼——







这里是……



欢迎再次光临
超微观世界!

哇哦!

怎么又来了!



这也是成为量子的招数……

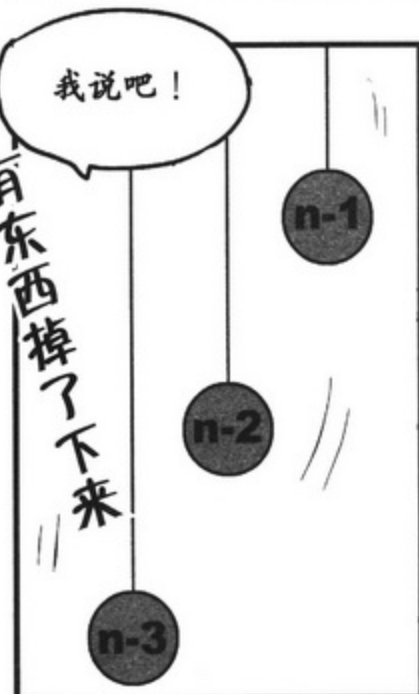
只是人手不够
而以!

可怕的
量子!



好像和原子没
什么变化……

有变化!



我说吧!

有东西掉了下来

n-1

n-2

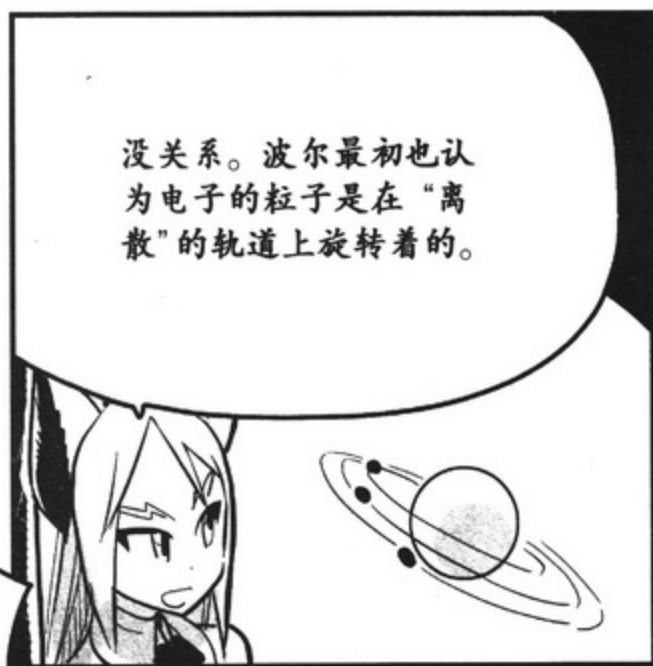
n-3



偷工减料!

真是偷工
减料!

真烦!



没关系。波尔最初也认为电子的粒子是在“离散”的轨道上旋转着的。

可是那样的话还是没有说明电子不会撞上原子核的理由啊。

也没有说明为什么是“离散的”轨道。

波尔作为理论物理学家只是提出假说。他只是坚持“按照理论来思考的话就能得到这样的结论”。

那样的话，大家都不认同吧！

这个时候出现了法国的德布罗意，

1923年，他提出

“如果电子是波的话，这个问题就可以解决了”。

粒子和波有什么区别呢？

好问题！

推出黑板

旋转的粉笔



照例先查看辞典,关于波是这样写的。

波

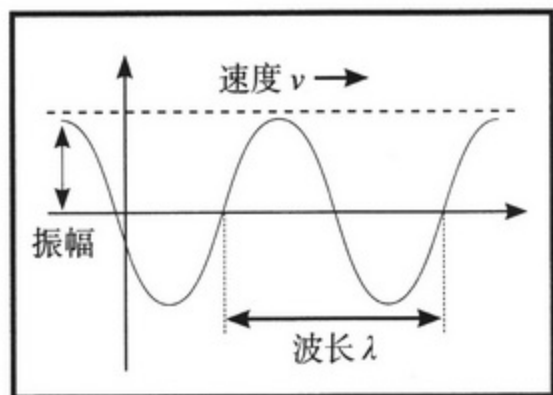
1. 由风等产生的水面振荡起伏的运动,像被推开一样传递下去的现象。
2. 3. (略)
4. 声音,光在空气等中振动而向下传递的现象。



与这个相比,“波动”的意思更容易理解吧。

波动

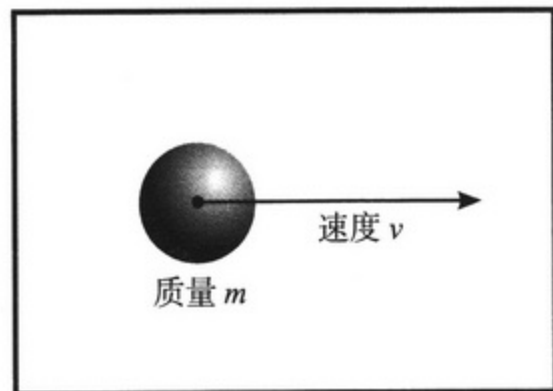
1. (物理上)媒介的各个部分的振动一点一点地错开,(看起来)像波在前进的现象。
2. 周期性的变化



接下来是粒子。

粒子

1. 组成物质的细小的一个一个的颗粒。



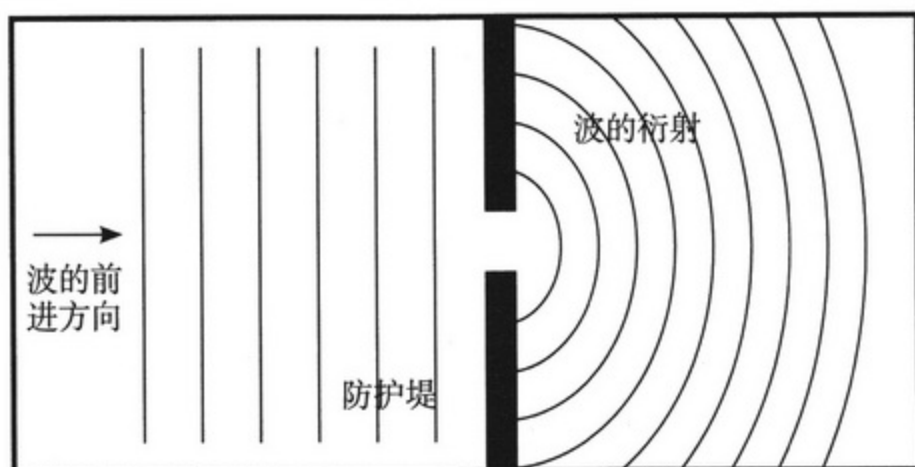
好像是明白了。



那么,波动和粒子的性质有什么区别呢?



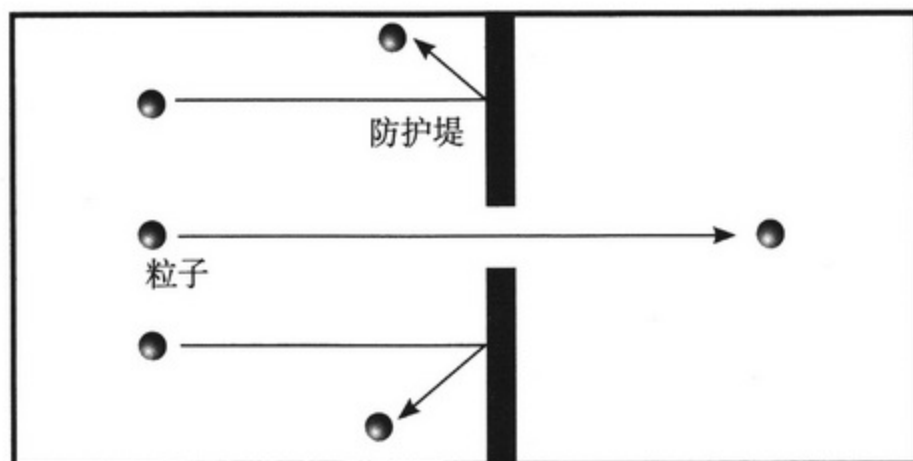
波动的特有的性质之一就是衍射。是指即使存在障碍物也会绕过障碍物一边扩散一边传递下去的现象。波浪涌向有裂缝的大堤的样子会比较容易理解。



粒子不会发生这种现象吗?



只有能够穿过裂缝的粒子能够直线前进,不会发生衍射现象。

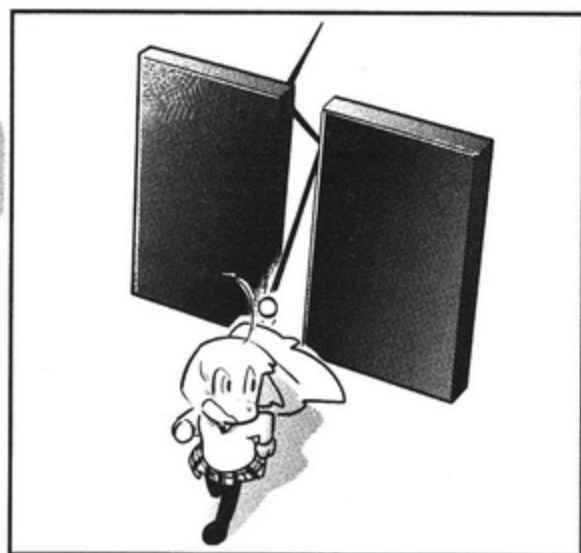




要是发生的话会很危险的。



原来是这样啊。



还有一点,干扰现象也是波动所特有的。

干扰

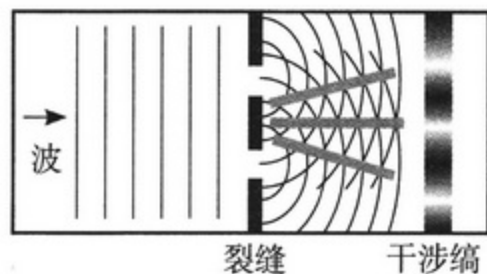
(物理学上)在同一个地方声波和光波相遇,作用的结果是,产生增加相互作用力或者减弱相互作用力的现象。



像这个图一样,将两个波合在一起产生新的波的现象中,经常做的是使用两个裂缝制作干涉縞的实验。



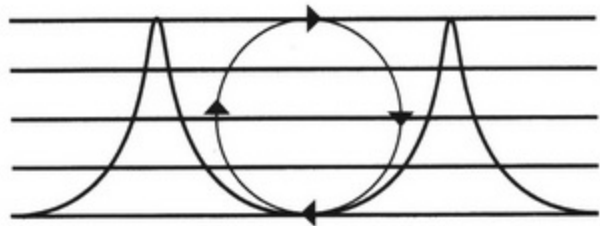
这个实验,
我也做过。



下次我也在洗澡的时候做做看。



在这里希望大家不要产生误解,所谓的波并不是物质本身在移动。例如海水的波(水面波)只是水面的高低差以水为媒介平行的传递出去的现象。



媒介

(物理学上)传递波动的物质。在空气中传递声音的情况下,空气是媒介,在真空中声音是无法传递的。



声音也是以空气为媒介传播的啊。



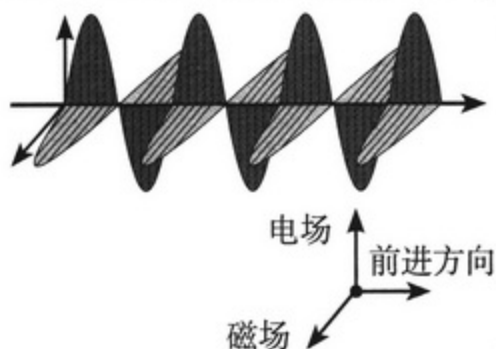
声音的情况下,不是面的高低差,而是空气的密度的大小形成波来传递的。



那么光呢?



电磁波有点儿复杂,因为也能够在真空中传播,所以不需要媒介,而是由空间中的电场和磁场的变化而形成的波动。关于这方面的知识,不深入的学习物理的话是比较难理解的。







讚岐教授的演讲 3

在德布罗意发表论文之前，在物理学的世界中出现了“光是波还是粒子”的疑问。根据波长的不同光的颜色会发生变化，也会变成电波。从被叫做电磁波也能够理解，毫无疑问它具有波的性质。

关于这一点 19 世纪初期就已经知道了。光也具有反射·折射·衍射·干扰等波动所特有的现象已经得到证实。

可是应该是波的光，也具有用波动说无法说明的性质。

大家都有被晒伤过的经验吧。在强烈的紫外线之下，皮肤会变成红黑色，于是害怕皮肤变黑的人就会使用被叫做防紫外线的防止紫外线穿过的太阳伞或者防晒霜。

大家不觉得很奇怪吗？

夏天去海边的话不到一个小时就能被晒伤。确实可能是因为光很强烈，可是与室内的照明相比，发光的强度也不过就 100 度左右。

那样的话，在照射着荧光灯和白炽灯的房间照 100 个小时也会被晒成那样。但是这种现象并不会发生。而且，交织在一起的电波也会产生同样的电磁波，却不会对皮肤产生任何影响。

也就是说，只有特定波长的紫外线才能发生晒伤现象。

这一理由用光的波动说是完全无法解释的。

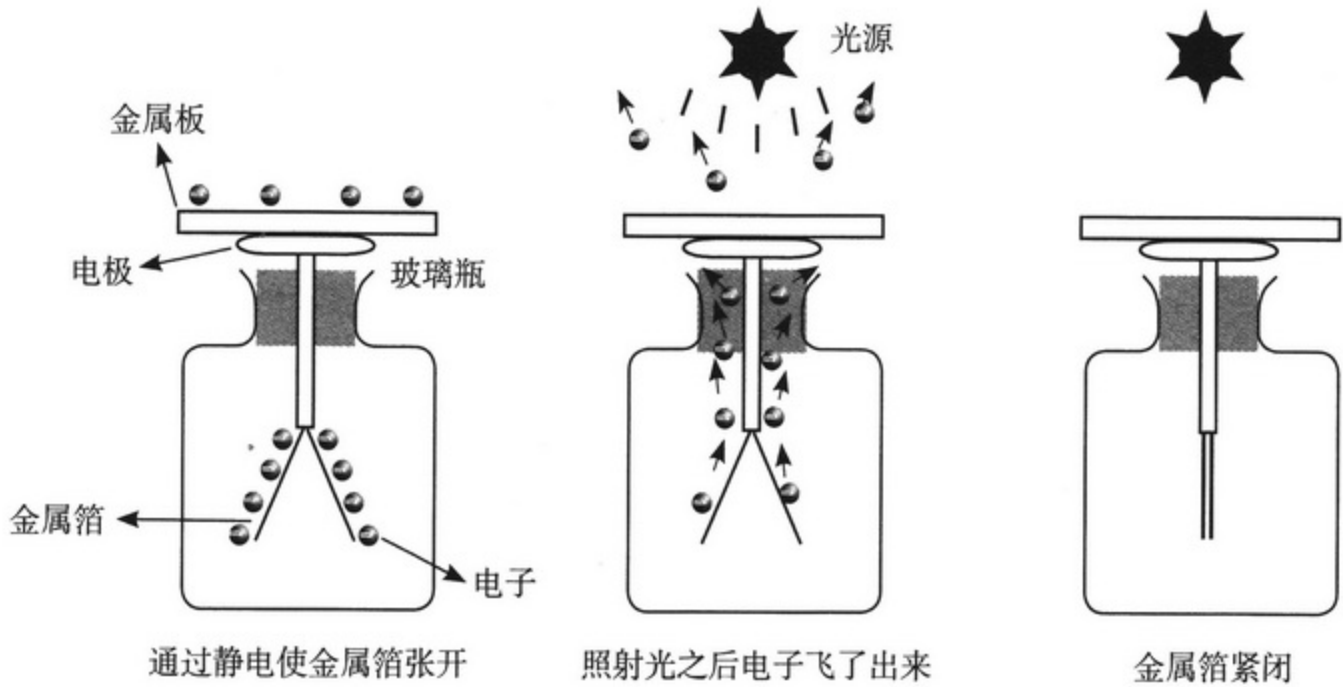
由于波的能量，简单地说取决于振动的大小（振幅）和时间，所以与波长和振动次数无关，如果长时间暴露在它的下面的话，就会吸收很大的能量。因此，如果长时间待在家里的照明灯下，就会变成和在夏天的海边一样的条件，而被晒伤。

同样的现象在“光电效应”中也会发生。将光照射向某种金属时，产生的能量可以使电子飞出来。太阳能电池和光探测器就是利用这一原理。光电效应也是只有波长短的光（振动次数多的光）才会产生。用使用箔检电器的实验来检验就能发现，对于波长长的光，无论用多强的光去照射都不会产



生电子飞出来的现象。

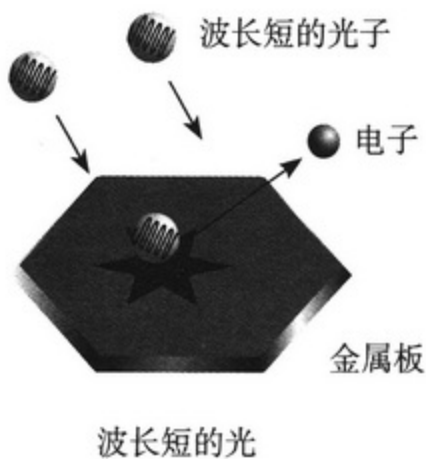
这一现象在很长一段时间在物理学界都是一个谜。



光电效应

在这里出现的是爱因斯坦。他虽然是因为相对性理论而出名，而他在1921年所获得的诺贝尔奖却并不是因为这个，而是运用光量子假说对光电效应所进行的理论性的说明得到了很高的评价。这篇论文认为，光是波动同时也具有粒子的性质。

波长短的光相撞的时候由于冲击大就会产生电子飞出来的现象。



如果光是粒子的话，解释光电效应就变得简单了。

从形象上来考虑的话是这样的。

把波长短的光当作粒子来思考的话，它就像是很硬的钢珠。而波长长的光就像是海绵球。光的强度就是飞过来的球的数量。

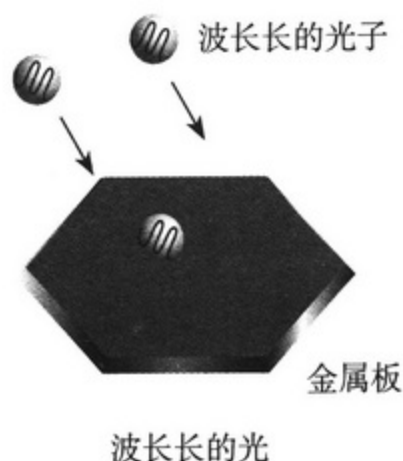
当然，硬球（粒子）和软球（粒子）碰撞的时候对对方所产生的影响是不一样的。海绵球的话，无论怎么碰撞都不会有损伤，如果是钢珠的话，即使是一颗也会很疼。如果不小心的话还会受伤。

撞上钢珠的话，可以很有效地传递能量而将电子赶出来。可是如果是海绵球的话，无论怎么碰撞都不会受伤。在这里有解释晒伤现象和光电效应的关键。

爱因斯坦从普朗克的量子的理论出发把这种光的粒子命名为光量子。现在被叫做“光子 (Photon)”。

光既是波动又是粒子。爱因斯坦的这一倒退的想法对当时的物理界产生了很大的冲击。德布罗意也是尊敬爱因斯坦的学者之一，他是这么认为的。

撞上波长长的光时由于冲击很小，电子不会飞出来。

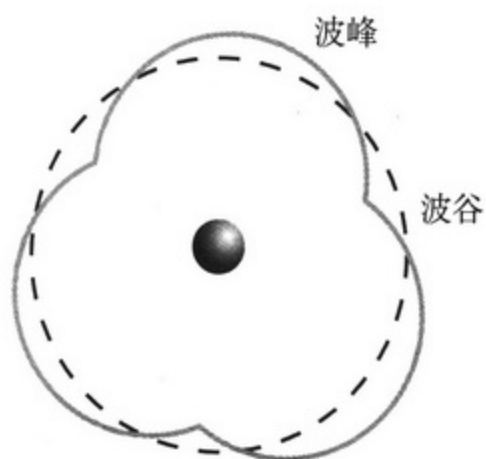


如果光具有粒子的性质，那么被认为是粒子的电子也具有波的性质……

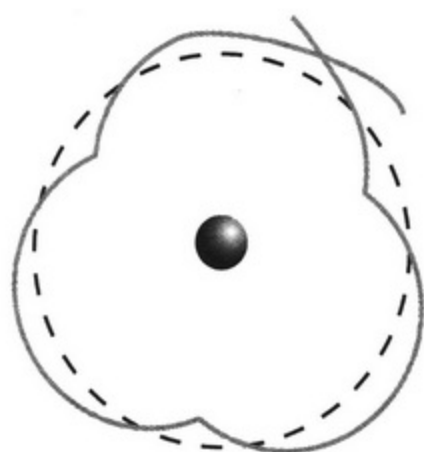
如果电子是波的话，那么波尔的认为“能量基准是离散的”的原子模型就能够说明。拨动吉他等弦乐器的弦时，最后只能留下弦的长度的1倍，二分之一倍，三分之一倍，四分之一倍……等的整数比波长的振动。只是在一开始的一瞬间产生了各种波长(频率)的振动，由于弦的两端是固定的，“多余的振动”立刻就被收紧，只有整数分之一的波长的声音继续响下去。而且这些音程发出的响声传到人的耳朵里可以让人心情舒畅，在音乐的世界里被叫做是完全和谐音。

波长和振动次数的关系如下式，其中振动数为2倍，3倍，4倍……

$$\text{波长 } \lambda = \frac{\text{波的速度 } v}{\text{振动次数 } \nu}$$



作为标准的长度的“整数分之一”的波峰和波谷无论旋转多少圈都是分别重合在一起的。



不是这样的话，就会最终消失

接下来，将这一想法应用于波尔的原子模型中的原子轨道上来看看。

假设电子的波是围绕原子核旋转的，它的波长是和弦乐器一样，必须是作为标准的长度的“整数分之一”。也就是说，无论旋转多少圈波峰和波谷都是分别重叠在一起的。不是这样的话，在旋转的时候就会产生波的干扰，于是波的振幅变小，结果波立刻消失了。电子根本无法存在。

可是，如果波长是轨道周长的整数分之一的话，那么无论到什么时候都可以不停地旋转。

接下来会变得有点难，用式子来表示德布罗意的观点的话，会有像魔术一样有惊人的发现。

刚刚说了电子的波所允许的波长只能是轨道的周长的整数分之一。假设波长为 λ ，轨道的半径为 r ，以上内容可用下面的式子来表示。

$$2\pi r = n\lambda \quad \dots\dots A$$

当然其中的 n 为整数。

另一方面，根据特殊相对性理论和量子假说，电子的波的波长和电子的运动量之间有以下关系（ $v \approx c$ 的情况下）。

$$pc = E = hv = h\frac{c}{\lambda}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

其中, p 为运动量, h 为普朗克定数。以上所表示的关系是在研究光的粒子说的阶段导出来的。在物理学中, 物体(粒子)的运动量是质量和速度的积, 将 $p=mv$ 代入上面的式子中便得到以下的式子。

$$\lambda = \frac{h}{mv} \dots\dots B$$

m : 电子的质量 v : 电子的速度

然后将 B 式代入 A 式。

$$2\pi r = n \times \frac{h}{mv}$$

↓

$$2\pi r \times mv = nh$$

让人惊讶的是, 这和波尔在他自己的假说中提出的量子条件的式子(参照 P.137)是完全一致的。通过这一点, 德布罗意提出

如果量子是波的话, 就可以从理论上解释量子条件。

姑且假设电子是波，就可以清楚明了的解释波尔老师的原子模型？



可是一直以来被认为是粒子的电子实际上是波的说法由于过于偏离常识，所以刚开始的时候并没有得到大家的赞同。

不行吧！



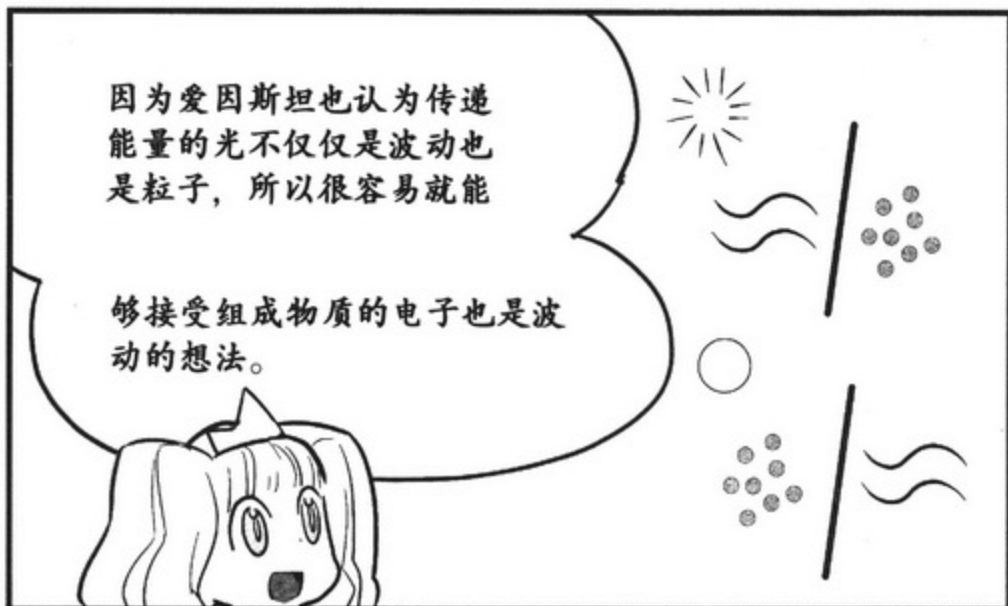
有一位学者读了他的想法之后，认为“如果是爱因斯坦的话可能会感兴趣”，然后把它寄给了爱因斯坦。

于是，得到了已经成为名人的爱因斯坦的称赞，因此而引起了大家的注意。



因为爱因斯坦也认为传递能量的光不仅仅是波动也是粒子，所以很容易就能

够接受组成物质的电子也是波动的想法。



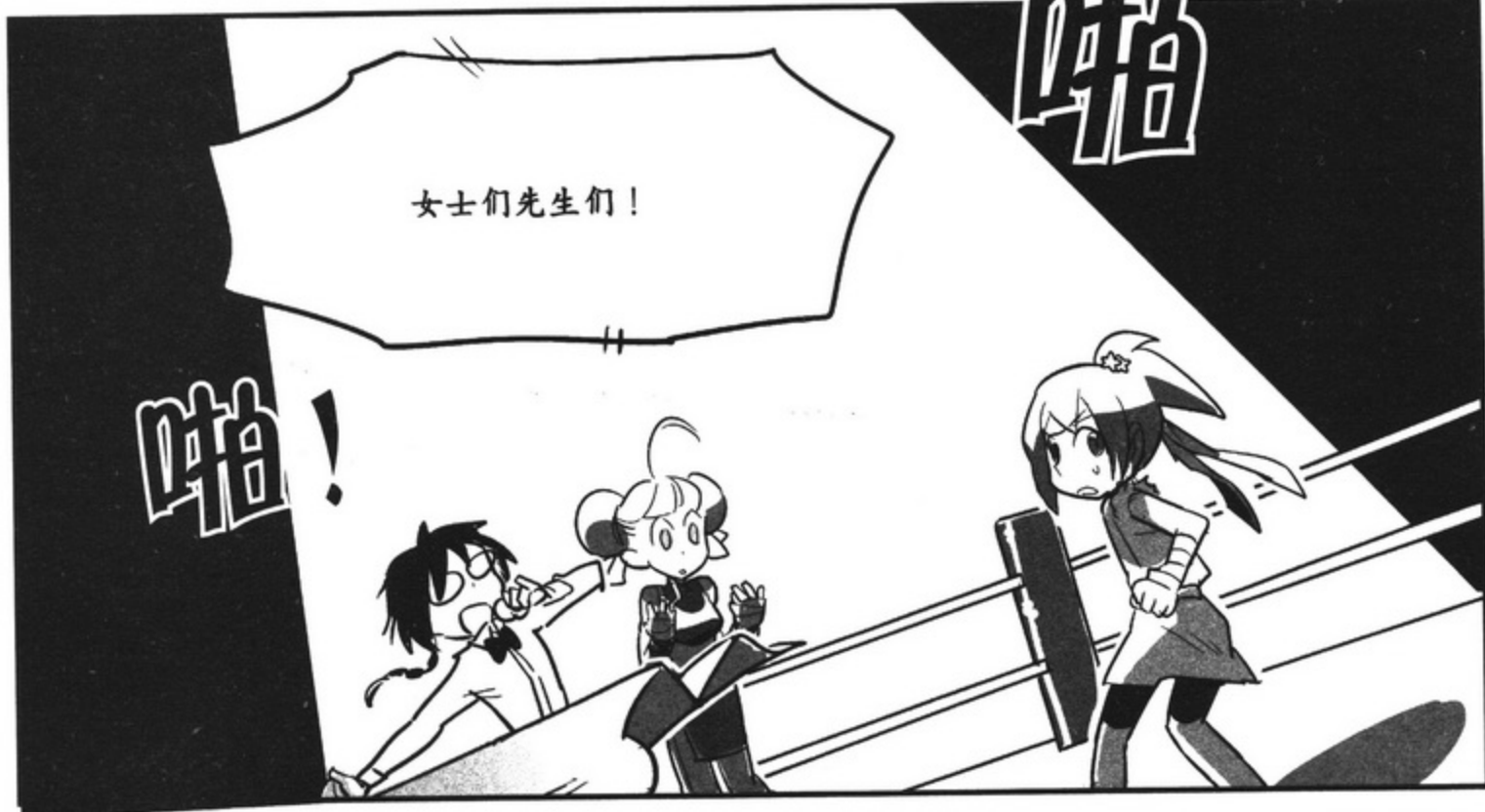
太好了！那么现在先将电子是波动的事情报告给波尔博士吧。



啪

女士们先生们！

啪！



到目前为止我们尽量不使用难懂的数学式子来推动故事向前发展，接下来将要出现的是我们无法避免的薛定谔的波动方程式和海森堡的运动方程式。

让两个人尽情地打斗吧！



你不是应该和拇指姑娘格斗吗？

我是编剧我有责任决定剧情的发展。

不觉得有点儿奇怪吗？

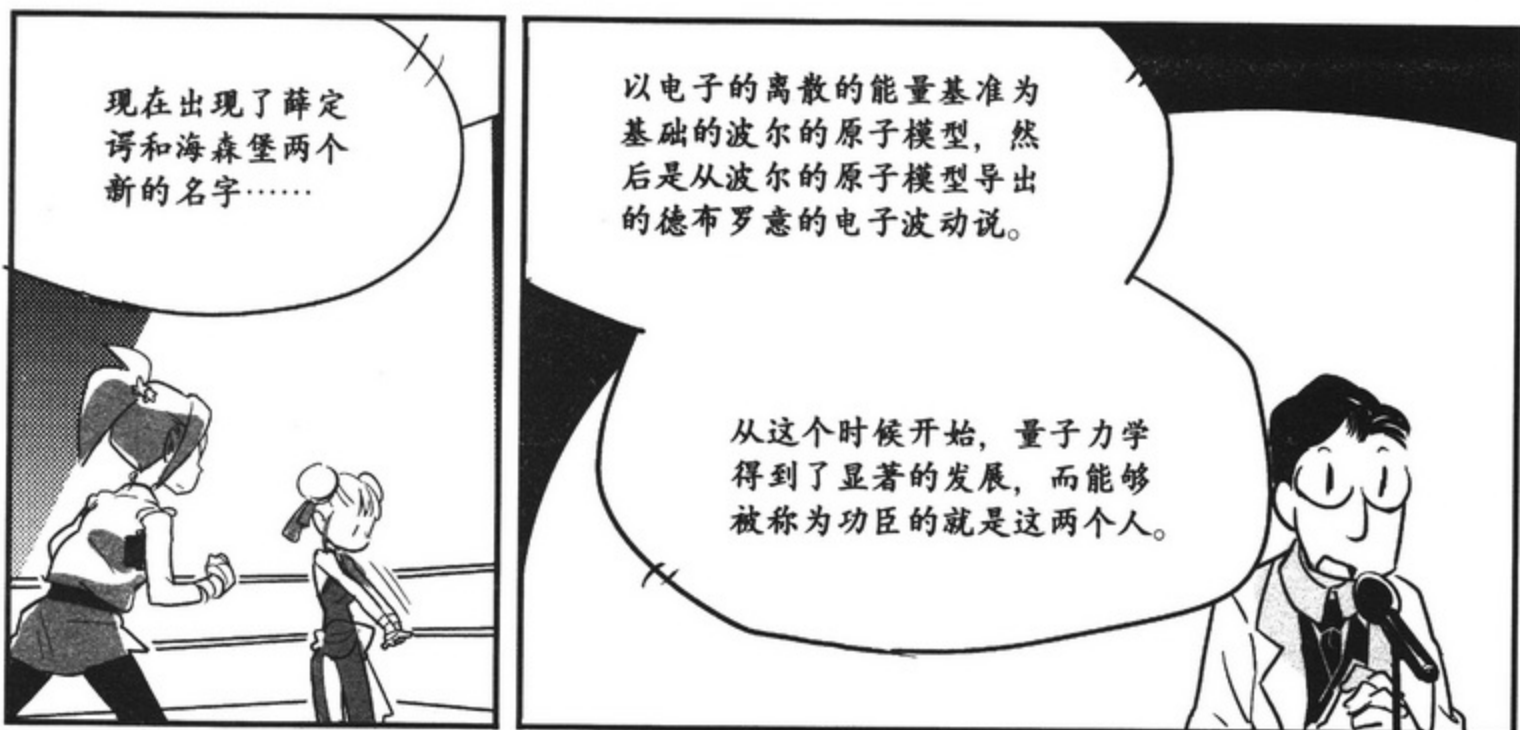


蓝色方阵！是薛定谔队的一寸法师！

啊哈

红色方阵！是海森堡队的拇指姑娘！





埃尔文·薛定谔
(1887~1961)

澳大利亚理论物理学家。之后由于某种原因退出量子力学领域而成为一名分子生物学者。



维尔纳·海森堡
(1901~1976)

德国理论物理学家，作为波尔最优秀的弟子之一而闻名。



嗯，德布罗意在1923年提出的电子的波被称为电子波或德布罗意波，

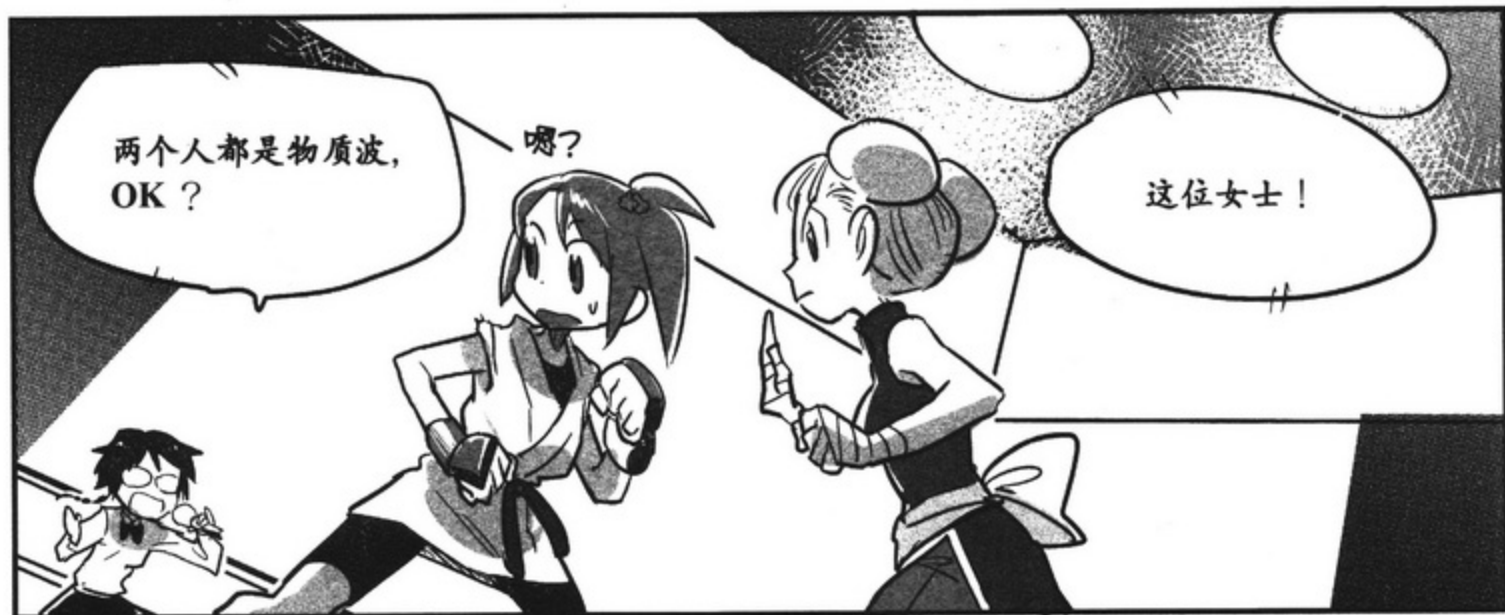
由于电子是构成物质的基本粒子的一种，而且也证明出其他的基本粒子也具有相同的波动性，于是现在被称为物质波。



两个人都是物质波，OK？

嗯？

这位女士！





有空当！



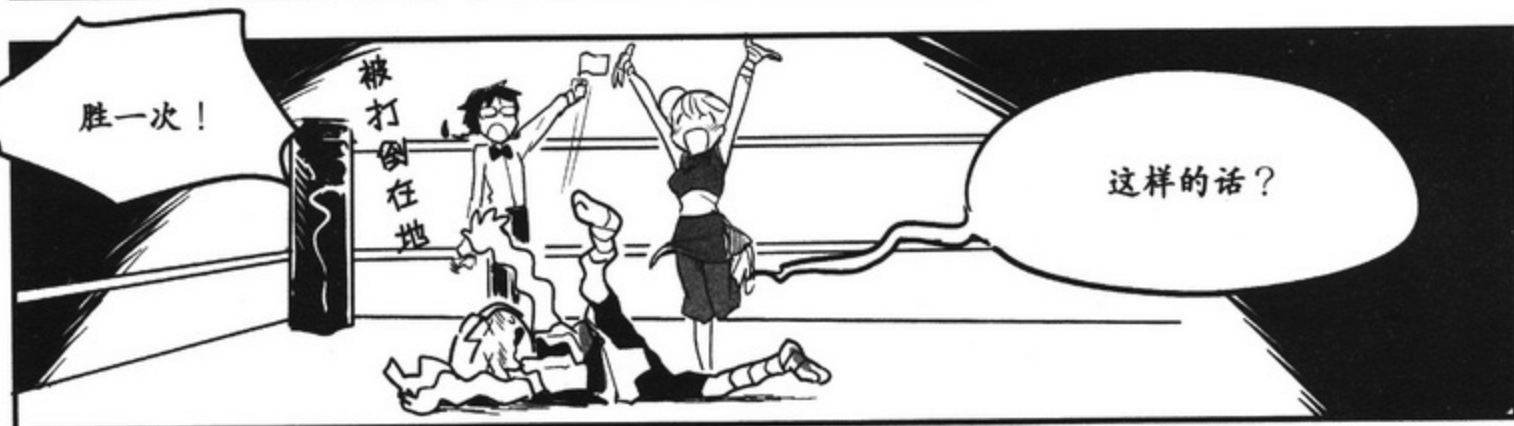
哇啊！

咣当！



胜一次！

被打倒在地



这样的话？

所有的物质虽然都具有波动性，但是原子级别的小东西，对于我们来说是没有直接影响的。

选手一寸法师是因为有点儿得意忘形才被打败的啊！



在基本粒子的世界里，即使是很小的波也是很重要的。

它可能是决定比赛结果的关键。





怎么样！明白这个薛定谔的波动方程式吗？

$$i \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

i ：虚数单位 ($i^2 = -1$)
 h ：普朗克常数 = 表示作为量子力学基础的单位的物理常数
 ψ ：波动函数
 ∂ ：偏微分符号
 t ：时间
 H ：能量所对应的算子

对德布罗意所提出的物质波产生兴趣而构筑了波动力学理论的正是薛定谔。

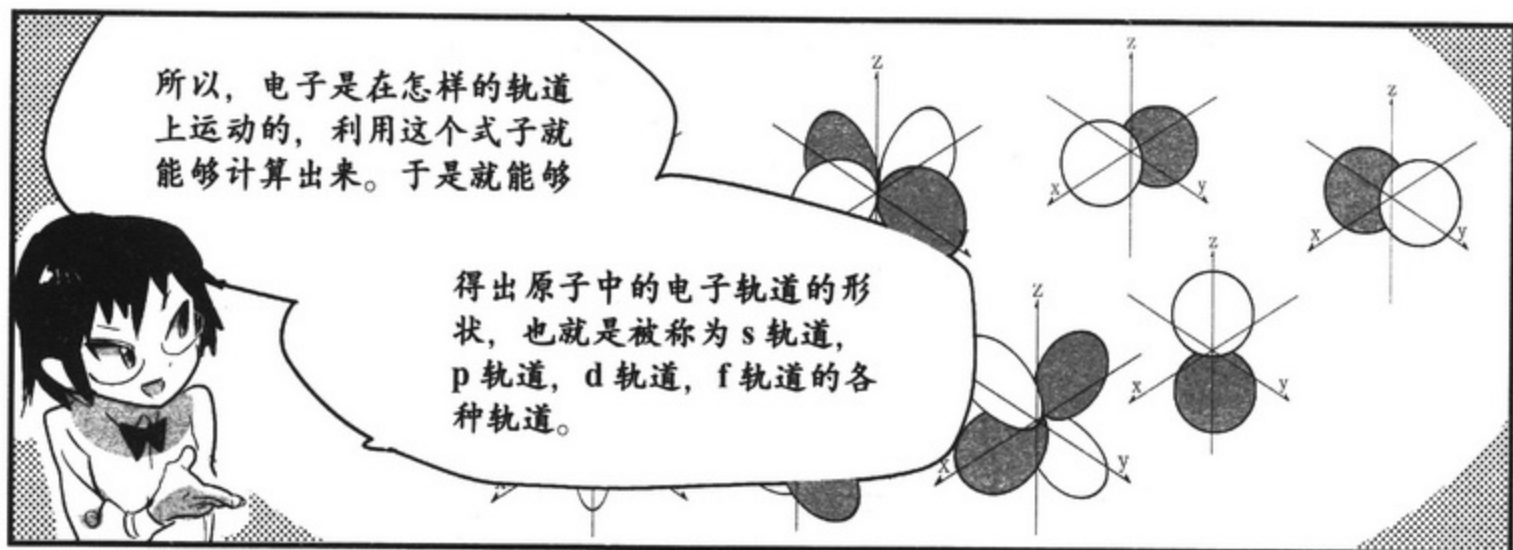
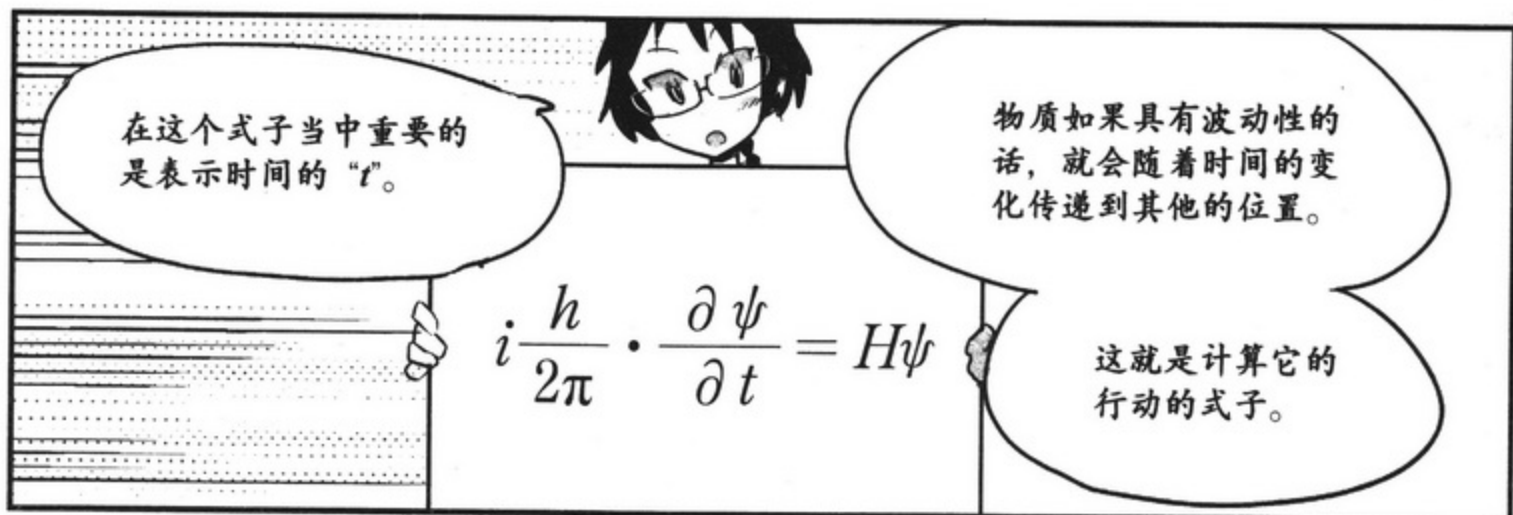
他于1926年所发表的《薛定谔方程式》是量子力学的基本方程式之一，而且是因其难度而闻名的。

接下来，拇指姑娘，怎么办呢？

虚数单位 i 是平方后得 -1 的数，

π 是圆周率……

可是，波动函数， H 是……



薛定谔方程式入门的高中数学复习



突然一下就变难了啊!



薛定谔方程式是量子力学的基础中的基础的式子,可是很多人都是在这里受挫,是一个很难突破的关口。



网上也批判说“大多数量子力学的入门书都在薛定谔方程式这块儿敷衍了事,蒙混过关”。这本书的作者恐怕也是同样的心情吧。



为了理解薛定谔方程式,在这里我们先来学习一下必要的高中数学和物理知识。



擅长数学和物理的人可以跳过P.169~P.176的内容。想了解故事内容的人可以跳过至P.184的内容。

① 复素数和三角函数

$$z = a + ib \quad (a, b \text{ 为实数, } i \text{ 为虚数单位})$$

复素数 z 除了以上的表现方式之外,也有如下的使用三角函数,用极的形式来表示的方法。

$$z = r(\cos\theta + i\sin\theta)$$

在单位圆（以原点为中心半径为1的圆）上，将表示角度为 θ 的点放大 r 倍后会比较形象而易于理解。

$\cos\theta+i\sin\theta$ 是说明薛定谔方程式时经常出现的， \sin 和 \cos 都是适合表示波的函数。

② 指数函数

$$y=a^x$$

来表示的函数是指数函数，用 x 进行微分*，就可以得到

$$(a^x)'=a^x \log_e a$$

虽然形式上比较复杂，用 e （自然对数的底）来替换 a 的话，可以得到

$$(e^x)'=e^x$$

这样就变得简单多了。微分·积分就变得相当容易。使用 e^x 也就变成自然而然的事情了。

※微分的表示方法可以写成(式)′的形式，也可以写成 $\frac{d}{dx}$ (式)的形式。由于后者明确的表示出了“关于什么的微分”而更加容易理解。

③ 欧拉的公式

这个在高中还没有学习。使用欧拉公式的话，就可以表示成

$$e^{i\theta}=\cos\theta+i\sin\theta$$

也就是复素数 z 可以表示成

$$z=re^{i\theta}$$

这样的话，就没有了三角函数，式子就变得更加简单了。

④ 微分和积分

在薛定谔方程式的计算中出现了三角函数和指数函数的微积分。下面复习一下基本的公式。

微分

$$(e^x)' = e^x$$

$$(\sin x)' = \cos x$$

$$(\cos x)' = -\sin x$$

积分

$$\int e^x dx = e^x$$

$$\int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \cos x dx = \sin x$$

在这里举一个例子。把下面的式子用 t 来进行微分。

$$x = A \sin \omega t$$

↓

$$\frac{dx}{dt} = A \omega \cos \omega t$$

微分的结果是用时间 t 来对单振动的变化 x 来进行微分，也就是导出了“速度”。把这个式子用 v 来代替再用 t 进行微分，就可以得到

$$\frac{dv}{dt} = -A \omega^2 \sin \omega t = -\omega^2 x$$

这一次又导出了“加速度”。可以说微积分是导出未知事物的重要工具。

薛定谔方程式入门的高中物理复习

① 关于波动的术语

现在将经常使用的术语总结一下。和在高中时学习的符号可能有所不同，这是为了备齐薛定谔方程式中所使用的符号。

T : 周期

ν : 振动数

$$T\nu=1$$

其中， T （周期）和 ν （振动数）是倒数的关系。

λ : 波长

ν （振动数）和 λ （波长）相乘的话得到 v （波的速度）。

$$v = \nu\lambda, \nu = \frac{v}{\lambda}$$

在这里举个例子，计算一下电视里所使用的 UHF 波的 λ （波长）是 0.5 米时的 ν （振动数）。由于电磁波的速度大约是 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，所以

$$\nu[\text{s}^{-1}] = \frac{3 \times 10^8 [\text{m/s}]}{0.5 [\text{m}]} = 6 \times 10^8 [\text{s}^{-1}] = 600 \times 10^6 [\text{s}^{-1}]$$

振动数为 600 万次 / 秒也就是 600MHz。

ω : 角振动数

这与高中时作为角速度（向量：有方向的量）所学习的内容在数值上是一致的，而薛定谔方程式中是把它作为没有方向的量来使用的。它等于 ν （振动数）乘以 2π 。

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$T\omega = 2\pi$$

它们之间存在上面的式子所表示的关系。由于表示波动的式子中会频繁出现“ 2π ”，所以用 ω 来替代 $2\pi\nu$ 的话能使式子变得简单。

k : 波数

这个术语在高中没有学过，是用 2π 除以 λ 得到的。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$k\lambda = 2\pi$$

通过上面的式子我们可以明白它所表示的是 2π 中含有多少个波长。与 ω (角振动数) 和 T (周期) 的关系一样， k (波数) 和 λ (波长) 通过 2π 而成反比例的关系。

② 振动和波动

作为表示周期性变化的式子，高中时一开始就学习了等速圆运动，然后学习了以此为直径所投影出的单振动。

初始值为 0，投影到 y 轴上 t 秒后的位移可以用

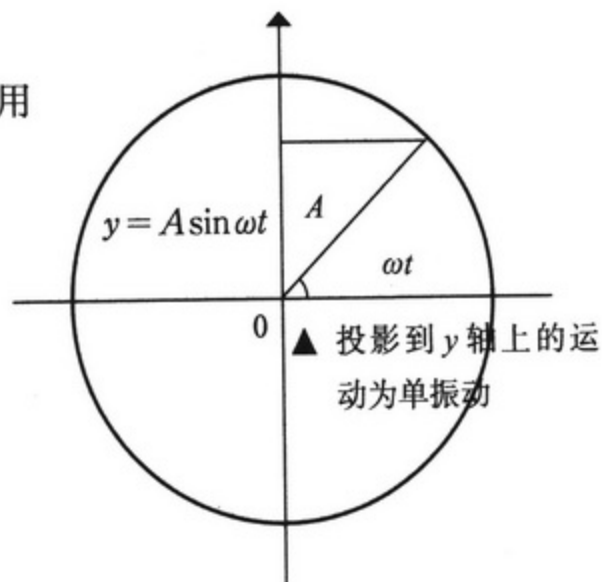
$$y = A \sin \omega t$$

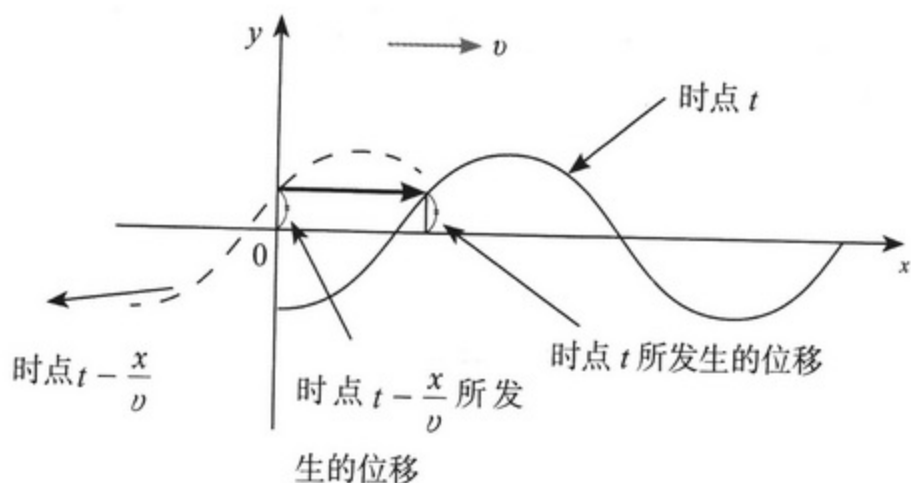
来表示。

这个被称为是步入薛定谔方程式的漫长路程的第一步。

单振动只是在直线上来回运动的周期性的变化，而波动是传递出去的运动。高中时学习的波动方程式是这样表示的。

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (A : \text{振幅}, T : \text{周期}, \lambda : \text{波长})$$





虽然存在 x (位移) 和 t (时间) 两个变量而看起来比较复杂, 但是将 $x=0$ 代入后得到的式子和 y 轴的单振动的式子是一致的。

$$y = A\sin 2\pi \frac{t}{T} = A\sin \omega t$$

在时点 t 地点 x 所发生的位移从时间上来说晚了从原点到 x/v 的时间才到达。所以, 将单振动的式子当中的 t 用 $t-x/v$ 来置换的话就能够导出高中时学的波动方程式。

$$\begin{aligned} y &= A\sin 2\pi \left(\frac{t-x/v}{T} \right) \\ &= A\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \end{aligned}$$

为了使这个式子当中的 2π 消失, 使用 ω 和 k 进行变形, 就能够得到

$$y = A\sin(\omega t - kx)$$

因为 $\sin(-\theta) = -\sin\theta$, 经过变形可以得到以下的式子。

$$y = -A\sin(kx - \omega t)$$

由于薛定谔方程式中出现的波动函数 ψ 是

$$\psi = A\cos(kx - \omega t) + A\sin(kx - \omega t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$$

可以看出, 先不考虑符号, 高中时学的波动方程式也包含在薛定谔方程式的波动函数中。高中时所学的波被认为是在 x 轴的正的方向的正弦(\sin)波, 可是从波性质上来说, 无论是负的方向, 还是余弦(\cos)波, 还是振幅的方向是反向的, 表现出来的都是波。

我们可以想象得出，将高中所学的波动方程式，运用复素数和指数关系，在空间上加以扩充，或进行削减，甚至是增幅等操作之后所表示出来的内容被运用于薛定谔方程式中。

③ 运动量和能量

运动量和能量是极其基本的物理量，为了慎重起见在这里也进行一下复习。高中所学的运动量是质量 \times 速度所表示的向量。

$$p=mv \quad (p: \text{运动量}, m: \text{质量}, v: \text{速度})$$

力学上的能量是运动能量和势能（潜在能量）相加的非向量。

进行等速直线运动的质量为 m 的物体的动能是

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (E: \text{能量}, m: \text{质量}, v: \text{速度})$$

将运动量乘以速度后就能得到能量的单位。

作为势能的一个例子，我们来试着表示一下将弹簧拉长 x 的状态。

$$E = \frac{1}{2}kx^2 \quad (E: \text{能量}, k: \text{弹簧常数}, x: \text{与自然长度的差})$$

除上面的式子以外还有各种各样表示能量的方法。例如粒子的静止能量是

$$E=mc^2 \quad (E: \text{能量}, c: \text{光速})$$

光子的能量是

$$E=hv=pc \quad (E: \text{能量}, h: \text{普朗克常数}, v: \text{振动数}, p: \text{运动量}, c: \text{光速})$$

在高中我想很多人也都学习过光电效应。用振动数大（波长短）的光来照射金属时，从金属中会飞出光电子。这个时候的光电子的动能可以用下面的式子来表示。

$$\frac{1}{2}mv^2 = hv - W \quad (W: \text{让电子从金属中分离出来的工作})$$

这一式子虽然是高中学习的内容，却可以说是通往量子力学的桥梁。

特别讲义

谁都觉得（可能）理解了一点儿的 薛定谔方程式

我是本书的作者石川。正如 P.169 九尾教授所指出的，一开始的时候我也想过，将薛定谔方程式这段敷衍过去。因为虽然原本很喜欢科学，却特别讨厌算式（笑）。

可是在写量子力学这本书时，我也确实产生了这样的想法“应该是可以设法完成的吧”。好像所有的解说书上都是先有波尔的量子条件，然后是德布罗意的物质波，下一页就会突然出现薛定谔的方程式。虽然考虑过“德布罗意和薛定谔之间没发生什么吗”，却最终以“也就是说薛定谔真的是一个天才啊，哈哈……”而结束。这样的话实在是太对不起读者了。虽然这么说，我其实完全不明白。

由于上面的原因，我们专门请来了这本书的主编东京理科大学名誉教授川端洁先生来为我们进行特别讲解，其内容总结如下。

● 从爱因斯坦到德布罗意

为了理解薛定谔的波动方程式，我们有必要再一次回到爱因斯坦所发表的光量子说。

用光照射铯等金属时，就会有电子飞出来。这就是光电效应，可是让人觉得奇怪的是无论用多么强的波长长（振动数小）的光去照射都不会产生电子飞出现象。思考其理由的爱因斯坦认为，光是应该叫做光子（当时叫光粒子）的粒子的流动，并用下面的式子描述了其能量。

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

（ E ：能量， h ：普朗克常数， ν ：振动数， c ：光速， λ ：波长）

这种情况之下，运动量可以表示如下。

$$p = hv \times \frac{1}{c} = \frac{hc}{\lambda} \times \frac{1}{c}$$

$$p = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda} \dots\dots\dots (2)$$

我们已经证明了光是波的一种，于是我们便可以理解根据爱因斯坦的发现而得出的“具有粒子和波两者的性质”的观点。于是，对于波长长的光（振动数少的弱光）来说，由于它的每一个粒子（光子）所具有的能量变小了（参照（1）式），无论如何增加光的量，金属原子都无法得到能让电子飞出来的能量。这样，光电效应的谜也就解开了。

如果原本是波的光具有粒子的性质的话，那么被认为是粒子的电子也是波的说法就没有什么好奇怪的了。德布罗意的物质波的想法的原点也就在于此。

如果电子具有波的性质，那么没有能够表示它的方程式吗？阅读了德布罗意的论文之后产生这一想法的是薛定谔。关于假设光是波（电磁波）时的理论性的计算，麦克斯韦在60年前就已经进行了，他的方程式被认为是电磁学的基础中的基础，关于这一点只要是学习物理的人谁都知道。薛定谔可能也在向往着那样的荣誉吧。

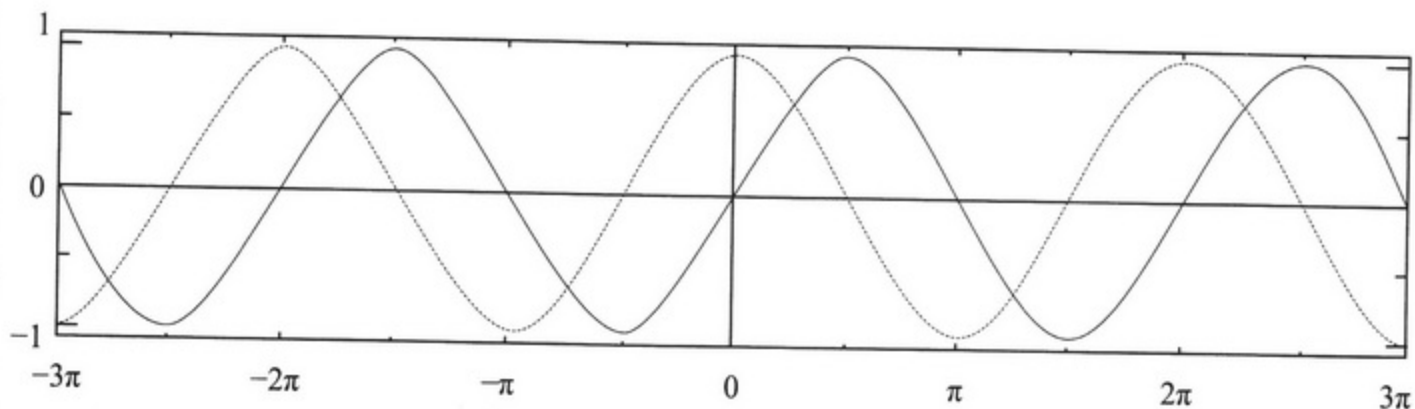
● 用算式来表示“波”

由于波是周期性的反复运动，于是用 sin（正弦）和 cos（余弦）这样的三角函数就可以表示。通过下一页的图也能够明白。

$$\sin x \text{ 或者是 } \cos x \dots\dots\dots (3)$$

在进行理论性的研究或用计算机进行数值计算的情况下，通常，角度 x 并不是以一周 360 度而是 2π 为基础的弧度单位来表示的。

作为总结 sin 和 cos 的表现方式的方法，在这里将运用使用 e （自然对数的底）的指数函数。 e 和 π 一样都是超越数，其定义如下一页所示。



sin 函数 (实线) 与 cos 函数 (虚线)

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2.718281828459045235360287471352 \dots \quad (4)$$

※ $\lim_{n \rightarrow \infty}$ 所表现的是 n 的值无限大时的极限值。

接下来将省去详细的解释，利用理科的学生在大学里将要学习的欧拉公式（参照 P.170）可以得到

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad \dots \quad (5)$$

这样就可以更加简单方便地表示了。

这里出现的 i 是高中时所学的虚数单位，是平方后得 -1 的数。由于在实数的范围内量子力学世界的内容无法全部被表示，所以有必要将数的范围扩展到被认为是想象出来的复素数。

而且，用通常的指数函数来考虑 $y=e^{ax}$ 这样的式子时， a 为正数时， y 随着 x 的增大而增大， a 为负数时， y 随着 x 的增大而减小。也就是说，如果在 e 的指数里使用包含复素数的式子，就可以在增大或者减小的同时，来表示像正弦波或余弦波一样反复的波。

$$i^2 = -1, i = \sqrt{-1} \quad \dots \quad (6)$$

运用这一概念就可以用数学的方法解释各种各样的自然现象，是非常有趣的。

● 将波动和粒子的物理量联系起来

运用这一想法，将表示波动现象的波动函数 ψ 定义为位置 x 和时间 t 的函数的话，可以表示如下。

$$\psi(x, t) = \psi_0 e^{i(kx - \omega t)} \dots\dots\dots (7)$$

(ψ_0 : 波的振幅, k : 波的数量, ω : 角振动数)

先将式 (7) 的右边用三角函数来表示，可以得到下面的式子。

$$\psi(x, t) = \psi_0 \cos(kx - \omega t) + i\psi_0 \sin(kx - \omega t) \dots\dots\dots (8)$$

薛定谔思考着想要将这一式子和最初的表示粒子的能量的式子 (1)，还有表示运动量的式子 (2) 结合起来。为此，将其进行微分之后来观察变化量是最好的方法，可是由于波动函数是根据位置坐标 x 和时间 t 这两个变量来定义的，所以必须使用偏微分的方法，先将时间 t 固定，观察位置坐标 x 的变化，然后将位置坐标 x 固定观察时间 t 的变化。

将时间 t 固定，只移动位置坐标 x 时可以得到下面的式子。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} &= \psi_0 i k e^{i(kx - \omega t)} \\ &= \psi_0 \times i k \times e^{i(kx - \omega t)} \\ &= i k \psi(x, t) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

接下来将 x 固定，只移动时间 t ，根据同样的方法可以得到下面的式子。

$$\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\omega \psi \dots\dots\dots (10)$$

将它们进行整理后寻找其与式 (1)(2) 的关系。在这里薛定谔并没有这么做，而是在上面的式 (9)(10) 的两边同时乘以

$$-i \frac{h}{2\pi}$$

实际上这就是关键。最终可以得到非常简洁明了的式子。

$$-i \frac{h}{2\pi} \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} = -i \frac{h}{2\pi} \times ix \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \psi(x,t) = \frac{h}{\lambda} \psi(x,t) = p \psi(x,t) \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{aligned} -i \frac{h}{2\pi} \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} &= -i \frac{h}{2\pi} \times (-i\omega \psi(x,t)) \\ &= -\frac{h}{2\pi} \times 2\pi\nu \psi(x,t) = -h\nu \psi(x,t) = -E \psi(x,t) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

由于式子中有很多 $\frac{h}{2\pi}$ ，将它用普朗克定数 h 上加横线的被称为 \hbar 的新的常数来替换。

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi} \dots\dots\dots (13)$$

便可以得到

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{h}{2\pi} = k\hbar \dots\dots\dots (14)$$

$$E = h\nu = \frac{h}{2\pi} \cdot 2\pi\nu = \hbar\omega \dots\dots\dots (15)$$

从式 (11) (12) 中便可以得到

$$p\psi(x,t) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \psi(x,t) \dots\dots\dots (16)$$

$$E\psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x,t) \dots\dots\dots (17)$$

于是，对于运动量 p 来说，算符 ※

$$-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \dots\dots\dots (18)$$

对于能量 E 来说，算符





$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \dots\dots\dots (19)$$

是分别与它们相对应的。

※ 算符：表示对某种量或函数进行微分，旋转等数学操作的符号。

● 与三维空间相对应的方程式

到目前为止的算式说到底都只是关于 x 轴方向的式子。在三维空间里，理所当然，由于存在 xyz 三个轴，将运动量沿着各个轴运动的部分结合起来，一般表示成 p (p_x, p_y, p_z) 的形式。在这里假设 e_x, e_y, e_z 分别是 x 轴， y 轴和 z 轴方向的单位向量※，与 p 相对应的算符就是

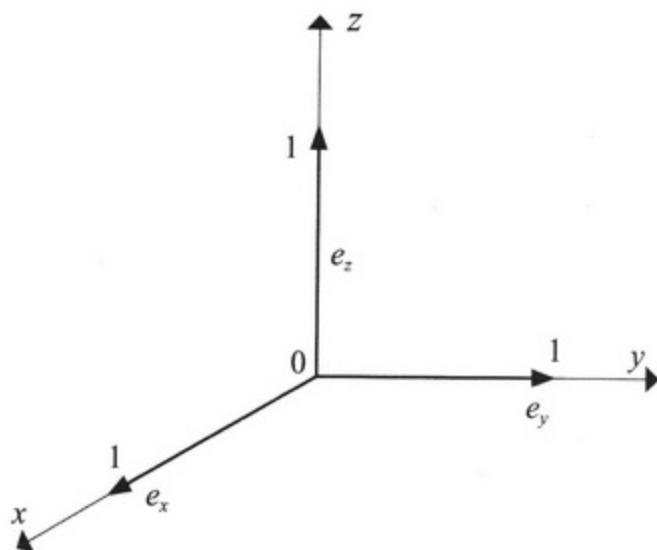
$$\begin{aligned} p &\rightarrow e_x \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}\right) + e_y \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial y}\right) + e_z \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial z}\right) \\ &= -i\hbar \left(e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z}\right) = -i\hbar \nabla \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

最后出现的倒三角形的符号被定义为

$$\nabla \equiv e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \dots\dots\dots (21)$$

将经常使用的算式表示成这种形式就比较易于观察研究了。

※ 单位向量是指单位为 1 的朝向某个特定方向的量。例如 e_x 是与 x 轴平行的方向的单位向量，用 xyz 轴各个方向的坐标成分来表示的话就是 $(1, 0, 0)$ 。



沿着 xyz 轴所得到的基本单位向量 e_x, e_y, e_z

在牛顿力学中,当质量为 m 的质点(只具有质量而不考虑其体积的点)受到潜在(位置)的作用力而运动时,能量 E 和运动量 p 之间,存在着这样的关系。

$$E = \frac{p^2}{2m} + U(x, y, z, t) \dots\dots\dots (22)$$

于是,将它与刚刚求出的算符式(19)(20)相对应,便可以得到,

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{1}{2m} (-i\hbar \nabla)^2 + U(x, y, z, t) \\ &= -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(x, y, z, t) \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

然后将它作用于波动函数 ψ , 运用从式(21)推导出的关系 *

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \dots\dots\dots (24)$$

可以得到

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, y, z, t)}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(x, y, z, t) \right) \psi(x, y, z, t) \dots\dots\dots (25)$$

或者

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, y, z, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x, y, z, t) + U(x, y, z, t) \psi(x, y, z, t) \dots\dots\dots (26)$$

这一关系式就是被称为“薛定谔波动方程式”或“含时间的薛定谔方程式”的算式。

这一式子的表示方法有很多种，使用表示全能量的算符 H ，也就是

$$H \equiv -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(x, y, z, t) \dots\dots\dots (27)$$

就可以得到简单形式的算式

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, y, z, t)}{\partial t} = H\psi(x, y, z, t) \dots\dots\dots (28)$$

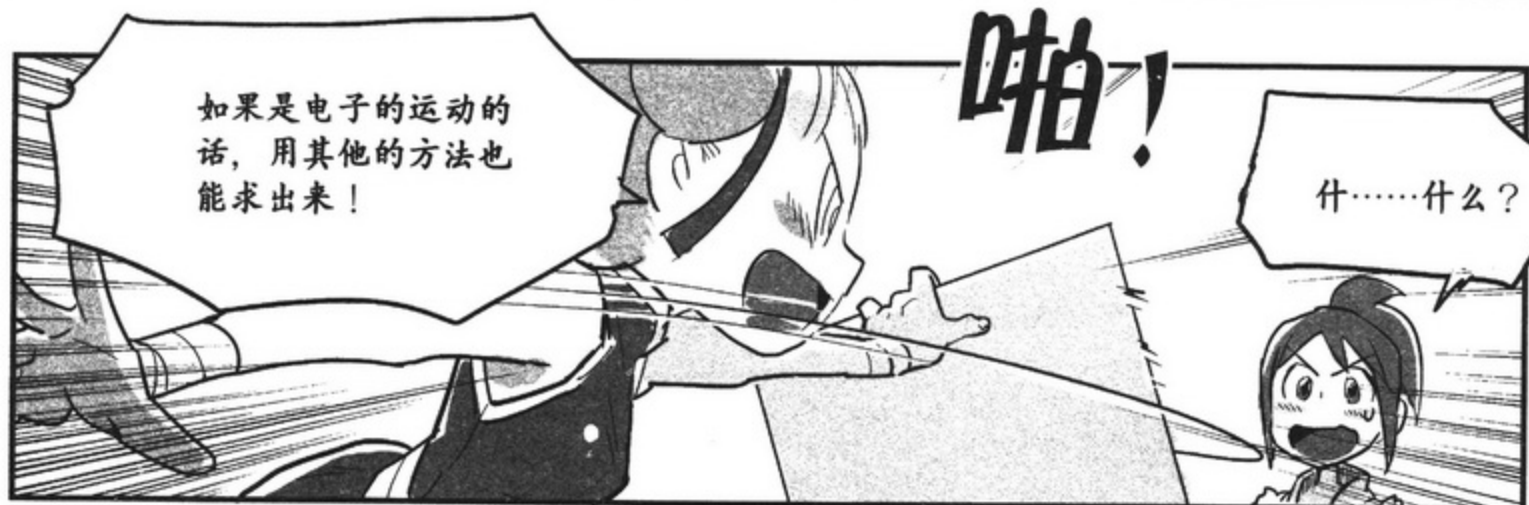
其内容是完全一致的。

※ ∇^2 也被写成 Δ 。

想知道详细解法的读者可以阅读 P.229 的解说。



5.3 “电子存在于哪里”——波的原形



海森堡的运动方程式。

$$i\hbar \frac{dA(t)}{dt} = [A(t), H] = A(t)H - HA(t)$$

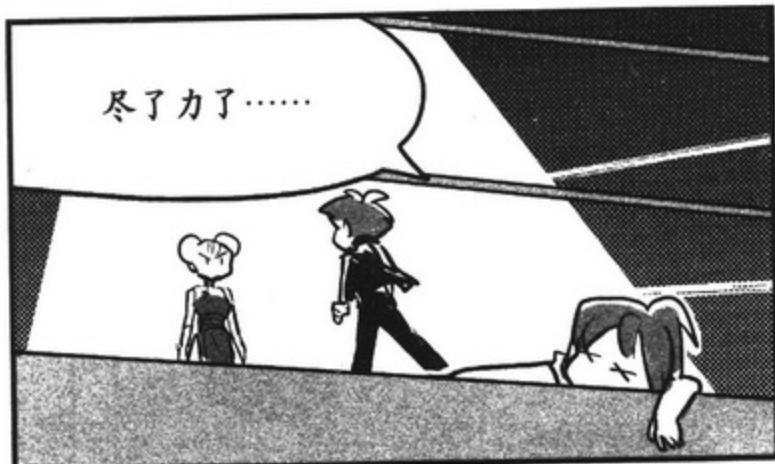
i ：虚数单位 \hbar ：普朗克定数
 d ：微分符号 t ：时间
 A ：由时间 t 所产生变化的物理量
 H ：与能量相对应的算符



替换选手！



尽了力了……



如此不擅长量子力学的你能做什么呢？



嗯——



海森堡想要比薛定谔更早地得出表示原子内电子的

运动的数学式。他的过人之处在于他并没有拘泥于电子是粒子还是波的问题。



不仅如此，他也没有考虑电子轨道的概念，而只是想得出表示原子中电子的振动数和从中放射出的光的光谱的关系的数学算式。





原来薛定谔并不怎么赞同物质波这一观点。而且，对于像海

这个时候，“如果电子是波的话，就一定能够计算出它的运动”，带着这样的想法他推导出了他的方程式。

森堡那样不考虑原子中电子的样子就试图建立方程式的做法也是采取批判的态度的。

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$

反对的反对是赞成……

也就是说？

也有可能
是那样的。

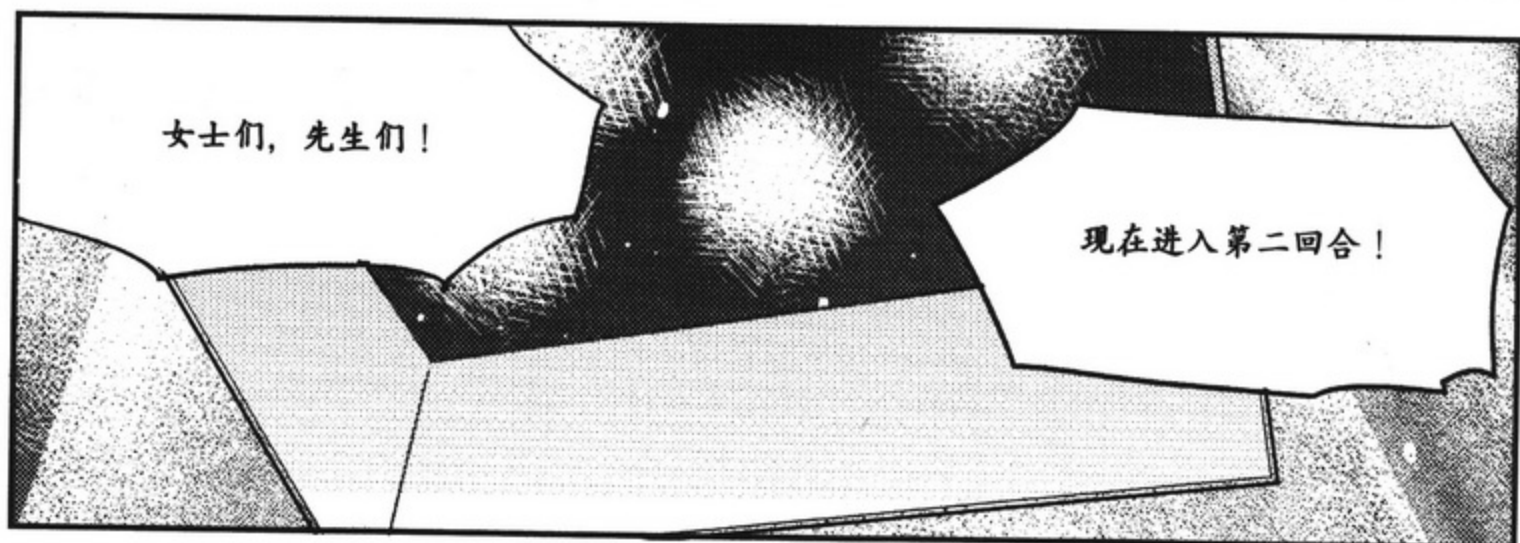
薛定谔证明出海森堡和自己的方程式从数学上来说是等价的。

其结果是，认为物质是波动的薛定谔的方程式成为了主流。

也就是说我胜利了！

哇！

不是，是薛定谔！



另一队，海森堡队！

变成海森堡、波尔、波恩混合队！



波恩是谁啊？

我们这边可有爱因斯坦老师。



出现了新的名字哦。



马克思·波恩是出生在德国的英国理论物理学家。与薛定谔和海森堡相比感觉上有点不太显眼。

可是他却是第一个在量子力学里使用“概率”这一词语的伟大学者。

马克思·波恩
(1882~1970)



概率是非常重要的关键词。

开始！

波恩算个什么呀！

哒哒哒

互相紧逼

薛定谔队会这么认为也是理所应当的。

在他发表方程式后的第二年，电子线（阴极线）也会发生衍射、干扰的现象得到发表，德布罗意所提出的物质波的存在也通过实验得到了证实。

对啊，电子也是波！

薛定谔才是走在时代前面的人。





薛定谔队,有点儿被赶上来了啊!



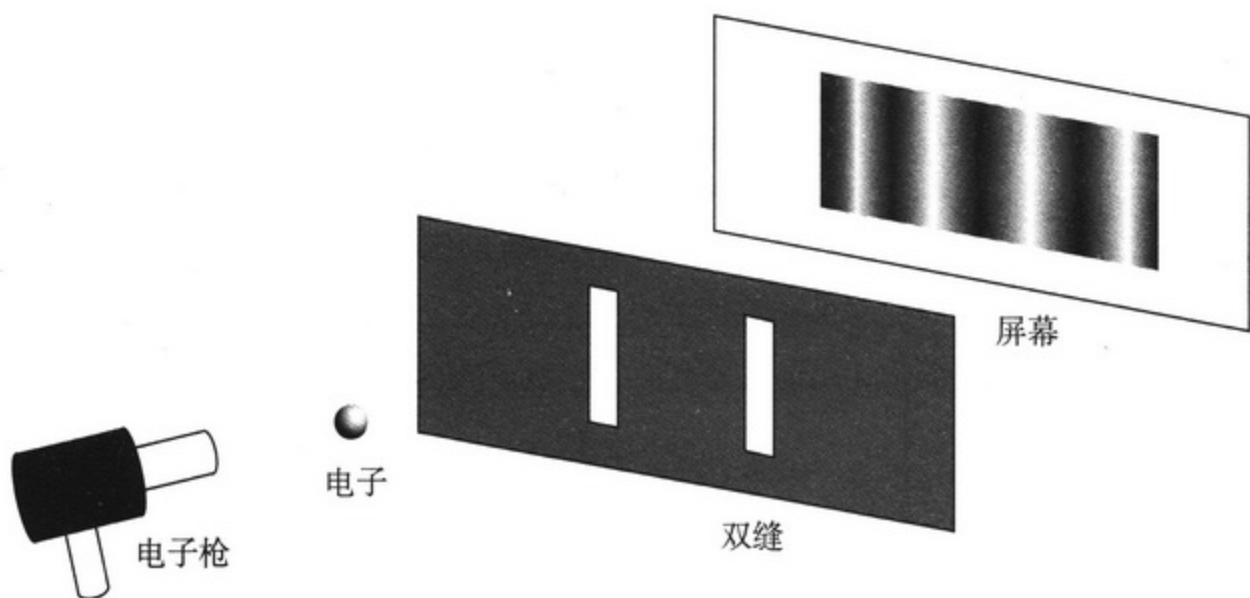
在这里成为关键的是电子线的双缝实验。



让我们先来看一下下面的图吧!

● 电子线的衍射·干涉实验

让从电子枪中发出的电子线穿过双缝,就能够形成证明干涉现象存在的干涉縞。



作为确认光的波动性的方法,自1805年以来一直所做的正是这个双缝实验。将光转变成电子线的就是这个实验。



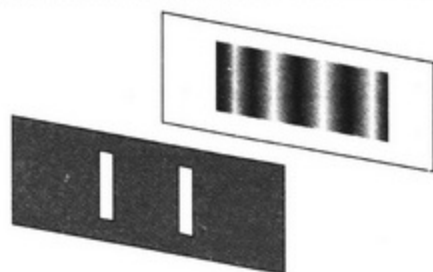
电子线穿过双缝后,在用于检验的屏幕(使用的是拍照用的胶卷等)上会出现波动特有的干涉縞。这一事实,对于发表波动方程式的薛定谔来说,是一位强有力的朋友。



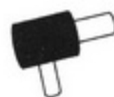
可是,改变条件反复进行实验后,却渐渐对电子是否是波动产生了疑问。那是因为当发射几百万个单位的电子时会产生完整的干涉縞,当电子的数量减少到几千个时,结果有点微妙,而当只有几十个电子的时候根本不会出现干涉縞。



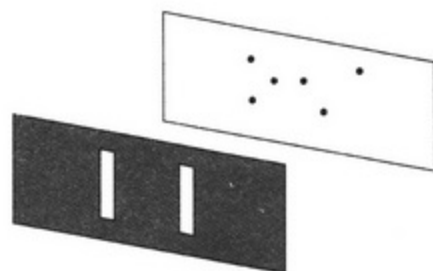
电子枪



发射几百万个单位的电子时能出现完整的干涉縞。



电子枪



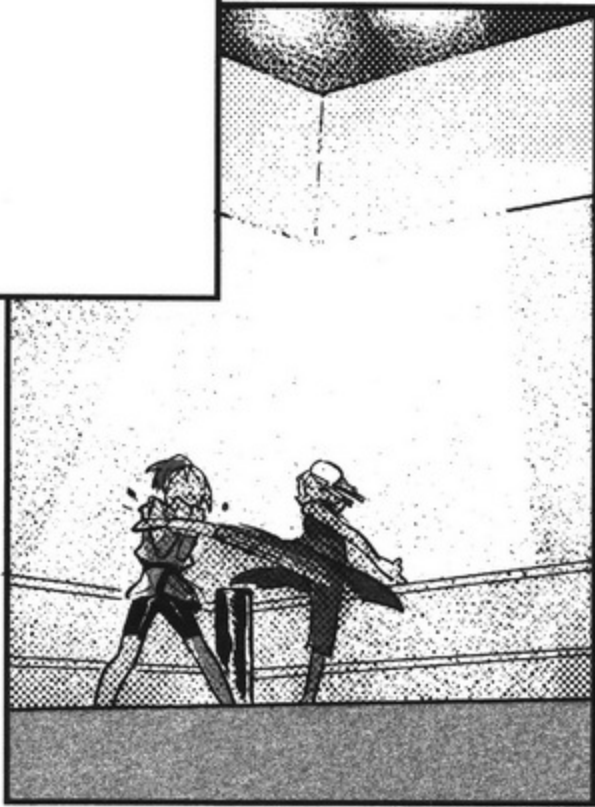
发射几十个电子时不会出现干涉縞。



在这里比较容易产生误解,电子少的时候,并不是说縞的模样变淡了,而是根本就不会产生縞的模样。




也就是说,电子不仅仅是粒子,同时也显示出波动性。关于这一点,有人开始思考其原因,并发表了一个假说,这个人就是波恩。




是粒子却又是波，你明白是什么意思吗？



大吼一声



不明白！




第二回合胜出者拇指姑娘！

很敏捷的

耶！

耶！



现在请选手贯太为我们简单明了的说明一下关于波恩的概率解释。

所谓电子的波是指电子被发现的概率

马克思·波恩

概率波，是什么意思？

薛定谔认为物质波是物质的浓的和淡的波。

这个和声音在空气中传播时的空气的状态是相似的。

可是波恩所认为的概率波是指电子作为粒子只存在于一点。

他认为发现这一点的概率也就是这一点出现的概率像波一样在变化。

发现的概率低

高发现的概率高度低

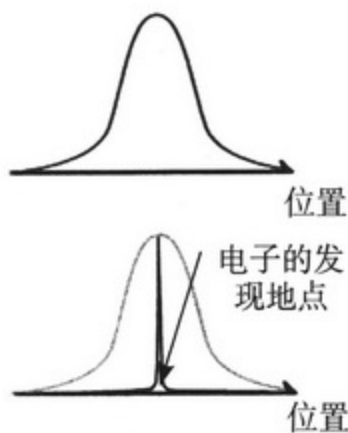
高位置

明白吗？

好像差不多。

用电子枪向涂有感光材料的屏幕上发射电子，电子就要触碰到屏幕之前的状态如上面的图形，有在各个地方出现的可能性。

这时的“能够发现的概率的高低”就是电子所显示的波动性。

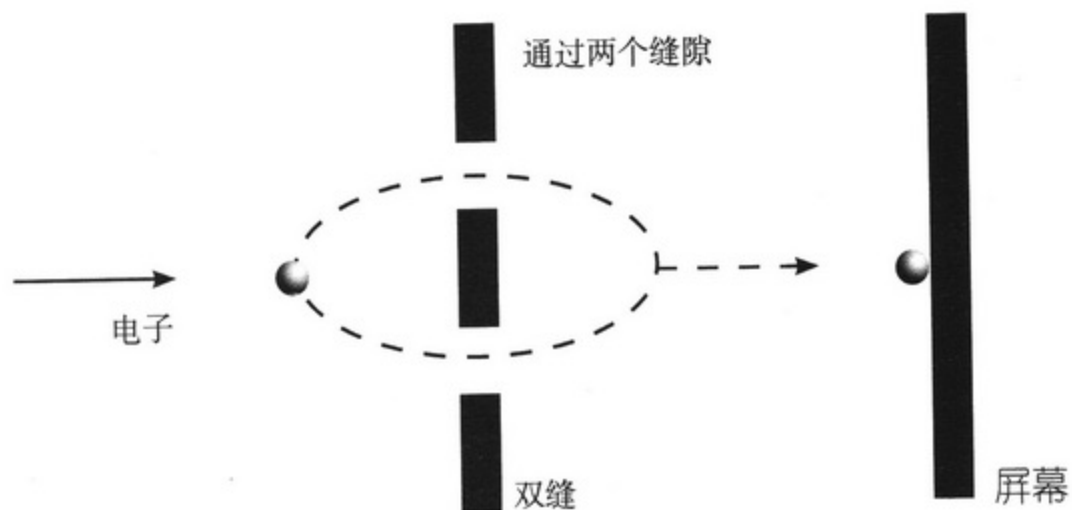


位置

电子的发现地点

位置





那样的话,不是跟妖怪完全一样吗?



可是,多多少少好像有点儿明白了。



为什么呢?



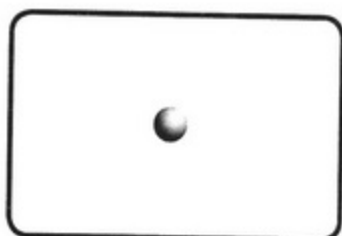
因为将物质分成两半的时候,虽然说“最后就是这种粒子”,可是似乎还可以继续分割,现在听了对电子的形态的解释之后我决定放弃了。布丁的悖论也就此结束吧……



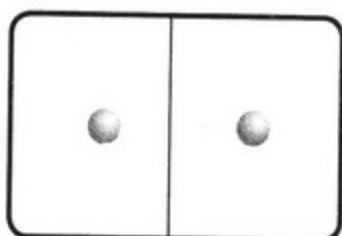
其实不放弃也可以,不过变成波的电子确实无法再继续分割,而且如果构成物质的其他基本粒子的作为波的性质增强的话要继续分割也是很困难的事情。



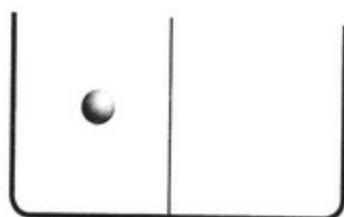
例如在箱子中只放入一个电子,然后在正中间用板隔开。这种情况之下,左右两边存在电子的概率各为50%,并不会偏重于哪一边。



在箱子中放入了一个电子



不事先去确定电子的位置而将箱子隔开,于是各有50%的电子分别存在于左右两边(状态的共存)。



打开箱子,用光照射以确定电子的位置时,这种共存的状态就会消失(也就是发现概率波的范围缩小了),于是只能在左或右的某一边找到电子。



如果粒子只是在旋转的话,将箱子分成两半的时候电子就应该是只存在于左右的某一边,可是电子并不是这样的。



到被发现为止,不能确定是不是只存在于某一边。



什么呀,好像被狐狸迷住了似的。

呵呵!



对于波恩的概率解释，
将物质波的运动总结成
方程式的薛定谔为什么不
赞成呢？

据说他所反对的并不是
计算而是只能从概率上
来求解的这种想法。

而且，爱因斯坦，被称为量子
论之父的普朗克，还有物质波
的提倡者德布罗意等等都慢慢
加入了概率解释的反对派之中。

真是四面
楚歌啊！

没关系，概率解释派也不
会认输的。这边的老大是
“量子力学之父”波尔。

波恩和刚刚说的海森堡也带
着强有力的武器加入了战斗。

这里说的武器就是
不确定性原理！

是啊，本来就是很难的话
题，人物关系还弄得这么
错综复杂！

已经到了最后了，
加油啊！

海森堡的不确定性原理是指“在
两个物理量的组合中，如果不让
测定值具有偏差就无法测定出这
两个物理量”的理论。

接下来我会进行说明，
现在大家先尽量记下
刚刚说的内容。

很难吧！

啊



5.4 无法同时弄清楚“在哪里”与“如何运动”

这就是不确定性原理！

位置和运动量的情况下

$$\Delta x \times \Delta p = h$$

(位置的不确定性的幅度) × (运动量的不确定性的幅度) = 普朗克常数

x : 位置 p : 运动量 Δ : 幅度

h : 普朗克定数 (6.626×10^{-34} (焦耳·秒))

例如在考虑电子位置和运动的情况下，如果能够正确地确定位置的所在（尽量使误差 Δx 接近 0），那么运动的方向和速度就不能确定，如果反过来能够正确地确定运动方向和速度（尽量使误差 Δx 接近 0），现在的位置就无法确定。这样一种理论。

这就是不确定性原理！

知道位置就不知道如何运动，知道如何运动就不知道在哪儿，也就是

说无法正确地确定电子未来的位置。

那儿好像就是和概率解释相联系的地方。

也就是说自然界的所有的事情都是不确定的，将来的事情也只能从概率上来计算其发生的可能性。

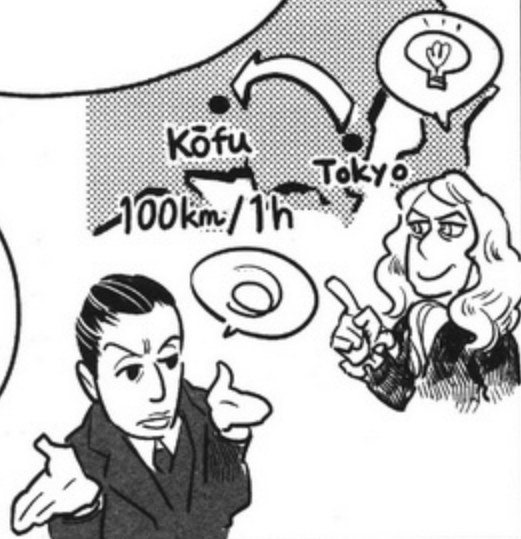
那不是理所当然的吗？谁都不知道明天会发生什么事情……

这里说的可不是命运，是关于物理法则的。

古典物理学认为，如果知道现在的位置和运动，就能够计算出一定时间之后的位置。比如说，

从东京以每小时 100 千米的速度往西飞一个小时就能到达山梨县的甲府附近。

在量子的世界里，由于无法同时正确地确定位置和运动，结果就变得很不确定。



我也不是很讨厌不确定啊！

信步而行



什么都不确定的话多麻烦啊！



爱因斯坦也因为不赞成这一点而引起了很大的争论。争论的结

果是波尔所率领的概率解释派*获胜。

※ 由于波尔研究所里所云集的学者们都坚持概率解释的观点，而称他们为哥本哈根学派，于是概率解释也被叫做哥本哈根解释等。

怎么取胜的啊？



薛定谔为了打倒不确定性原理一直在探索着新的物理学方程式，结果却并没有计算出海森堡所说的位置和运动量。

也就是说到最后，不由得就决定了概率解释派的胜利。



到此为止是量子力学取得巨大进步的20世纪20年代发生的事情。



太好了！现在可以向波尔老师报告了！

耶！



理论物理学研究所

波尔老师！



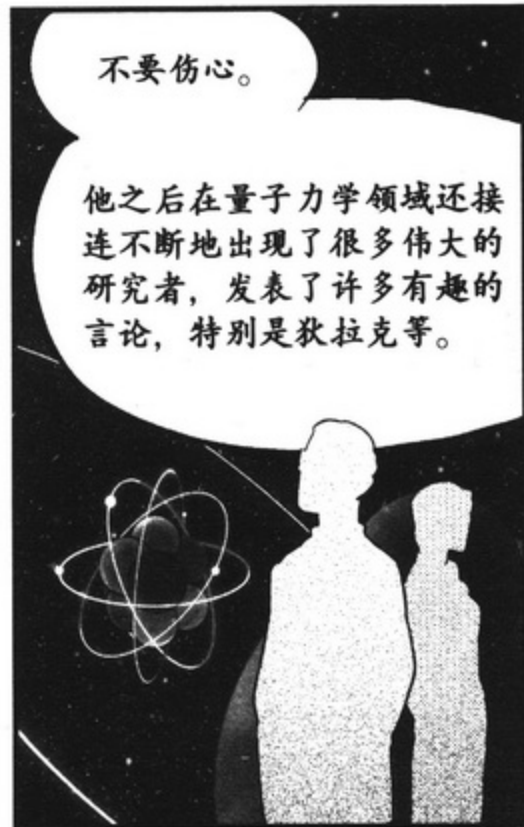
您所说的应该是正确的哦！



怎么回事？

寂静无声



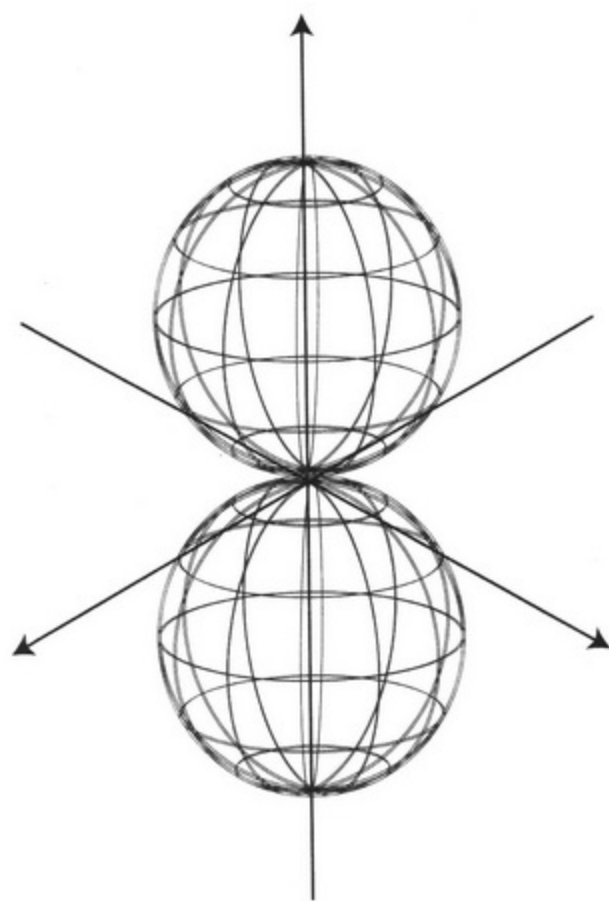




尾 声

量子力学也

涉足“其他世界”





啊！



完成一项工作后的布丁特别的好吃！

这一次是在学校外面的公演，当时好紧张啊！



哥哥的补考也顺利通过了！

真是太好了啊！

放心！



也谢谢老师们！

没什么没什么。



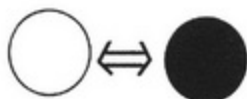


保罗·狄拉克
(1902~1984)

考虑到相对性理论而重新整理了薛定谔方程式，建立了电子在以接近光速的速度运动的情况下成立的狄拉克方程式。可是用这一方程式进行计算的话，带正电的电子的存在也变得不奇怪了。1928年，长时间思考的结果是发表了预言正电子存在的论文。四年之后在从宇宙向地球放射的宇宙线中发现正电子真的存在，由此而证明了他的观点是正确的。之后还陆续发现了与质子相对的反质子，与中子相对的反中子等反粒子。

最后发现所有构成物质的粒子都存在反粒子。

于是便产生了“真空并不是什么都没有的空间”的科幻的说法。



正粒子（通常的粒子）与反粒子相撞的话，会发生互相消失的现象，所有的质量都转变成了能量。

反过来说，也会发生能量转变成正粒子和反粒子的组合的互相生成的现象，在什么都没有的地方生成物质。



什么科幻啊，已经基本上变成推理小说了。

所以很有趣哦！



紧盯着布丁



老师，布丁的悖论最终分割到什么的时候就结束了呢？



现在，超弦理论被认为说明构成物质和能量的最小单位的权威观点。



是说布丁变成弦了吗？



不管是物质还是能量，都是由某种最小单位而构成的说法是没有错误的。



那样的话，就是说阿基里斯也一定能在什么时候追上乌龟。

是阿基里斯和乌龟悖论吧！



由于物质的大小里存在最小单位，所以阿基里斯不断接近乌龟，他们之间的距离最终就会变成0。

而且由于在量子力学里认为时间也是存在最小单位的，所以乌龟和阿基里斯之间的时间差不可能比最小单位小。

也就是说，无论从哪个角度来考虑，最终都是能追上的。

※PET（正电子断层摄影法）是放射出正电子让正电子与人体内的电子相抵消，而产生 γ 射线进行诊断的方法。正在被实际运用中。

可能吧！

可能？

因为不知道，所以才很有趣啊。

现在所进行的说明说到底都只是现阶段的理论和假说。

好像总是弄明白了一个事实之后又出现新的疑问。

科学本身就是无限继续的像悖论一样的存在。

那么咱们就开始咱们的探索悖论之旅吧！

小燕！

来啦！

出发了哦！

妈咪妈咪轰！

喵！

喵！

● 所有的物质都是由“绳子”组成的

一直以来基本粒子都被认为是构成物质的最小单位，可是总觉得这一观点并不是那么清楚。随着研究的深入，新的基本粒子的候补者陆续登场，据说包括被发现的，理论上认为应该存在的在内一共有大约 150 种，如果再加上反粒子有 300 多种之多。这样的话就比元素还要多，好像有点儿不太对劲儿吧。

在这里补充一下，基本粒子的数量根据计算“共振状态的区别”的方法不同而不同。即便如此，作为物质（包括力）的最终单位的基本粒子有多少多少种，这个并不是物理学研究的最终目标。

在这里诞生的是超弦理论。可以简单地将它的内容总结成以下几点。

- 物质的最终的要素不是“粒子”而是“绳子”
- 绳子（超弦）的长度大约是 10^{-35} 米
- 根据绳子的状态的不同，可以形成各种各样的粒子

说起绳子，人们能够想起来的可能是绑东西用的塑料绳或运动鞋的鞋带等，而在这里是指像吉他，小提琴等的弦一样的东西。因此这一理论也被称为“超弦理论”，英语中叫做“superstring theory”。

“绳子的状态”是指由弦的振动而产生波的状态。而且振动数也不是固定的，而是取不同的数值，这样就形成了不同的基本粒子。

（注：日语中绳子和弦是同一个单词）

● “打开的”弦和“关闭的”弦

在这里对于弦的状态再进行一下说明。

根据超弦理论，“弦”有两种，一种是两个端点的，另一种是环状的圈。虽然

说是两种，其实只是形状的差别而已。然后是和弦乐器一样，有整体振动的基本音和产生音调的和声。还有的情况是由相互作用使两种“弦”合并成一种。关于这种情况，用一般的知识是比较难理解的。所以在这里希望大家能记住这一点就可以了。

内容渐渐变难了，还有一点。

由于更多学者的加入，为超弦理论不断添加着新的内容。超弦理论不断地被系统化，现在，这个“弦”的振动被认为是在10维的世界里进行的。我们日常的生活中接触的是三维，加上时间后就是四维，还有六个维！

那么多余的六维是如何形成的呢，实际上由于被“小巧化”了而无法看见。话说到这里，已经完全超越了科幻了。

现在如此高维的物理学成为非常热门的领域，其中美国女物理学家丽莎·兰德尔所写的关于高维物理学的书成为世界上最畅销的书，其热门程度可见一斑。由于其内容涉及量子力学和宇宙论两者，即使不能够理解，作为读物来阅读也非常有意思。希望有兴趣的人可以看一看。

●为什么会产生“超弦理论”

现在说明一下产生超弦理论的背景。

一直以来在基本粒子论中，作为构成物质的基本粒子，有夸克和轻子两种族，而玻色子被认为是作用于两者之间的媒介（可参照P.115的表）。虽然用这一观点从理论上解释了很多实验的结果。但也并不是完全没有问题。

其中之一就是刚刚提到的，在建立基本粒子的体系的过程中，基本粒子的种类却在不断地增加。另外一个，遗留下了“发散困难”的问题。例如虽然基本粒子之间的相互作用会随着距离的接近而变大，但是关于“当距离无限小的时候物理量也会随之变得无限大吗？”的疑问从理论上来说是无法回答的。

无论如何也要建立一个可以说明的模型……于是便有了运用各种各样的数学计算而建立的超弦理论，这也只是在目前的阶段下，暂时没有什么矛盾的理论。由于没有改变这一现状的更加强有力的假说，所以让物理学家们说的话，他们也只能说“好像应该是对的”。

遗憾的是，要想理解超弦理论，不仅需要物理学的知识，高度的数学知识也是必要的，所以只是读一些入门类的书的话，根本不可能明白是对还是错。不过，与“多种类”

基本粒子论相比，这一理论还是相当清楚明了的，我个人认为这一理论的扩展便是量子力学的未来。

●自然界的四大力量和超弦理论

超弦理论诞生的背景中还有一个是试图统一“自然界的四种力量”的统一场理论的尝试。

现代物理学认为基本粒子之间的相互作用力只有四种。即强作用力，弱作用力，电磁力和重力四种。

强作用力和弱作用力（参照 P.115）虽然听起来像是小孩子使用的语言，前者是使原子核成为一体的相互作用力，后者是与基本粒子的衰变有关的相互作用力。弱作用力由于通常情况下比强作用力和电磁力要弱而取了这个名字。中子放出电子后变成质子，质子放出正电子（电子的反粒子）后变成中子的“ β 衰变”等被认为是由于这种弱作用力而发生的因夸克的衰变而产生的现象。而电磁力是电或磁石所产生的力量，重力的相互作用也就是万有引力。按照强弱的顺序来排列的话，是强作用力 > 电磁力 > 弱作用力 > 重力。

可是，认为四种作用力平衡地存在着的说法可能并不能得到大家的认可，如果说“实际上只是不同形态的存在”的话可能会觉得比较合适。因此，试图将这四种力量从理论上进行统一的尝试一直都在进行着。

爱因斯坦也对重力的解释进行了挑战。在一般相对性理论中，他试图将重力和电磁力统一在一起，却没有成功。他继续向这样的难题进行挑战，数十年如一日，终于诞生了认为弱作用力和电磁力可以统一的电弱统一理论，发表这一理论的三位学者于1979年被授予诺贝尔物理学奖。于是，试图将所有力量统一起来的动向越发活跃，现在正处于这一热潮的最中心。

这当中的超弦理论，其最大的特色是没有把物质的基本构成要素“基本粒子”看成是“点”。一直以来，认为无法再继续变小的作为物质的最终存在的基本粒子是一个没有大小的质点（只拥有质量的点）的想法是物理学的常识，而超弦理论却将它假设为“弦”，而且可以根据振动状态的不同而发生变化。这是一种思想的重大转变，于是，曾经停滞不前的统一场理论的尝试有望得到进一步的发展。这是很多学者都期待的事情。

遗憾的是，我们还没有看到什么成果。正因为是打破常规而受人瞩目的超弦理论，它的发展动向更受人瞩目。

♣ 从哥本哈根解释到多世界解释 ♣

♠ 仅仅通过计算就掌握了波的薛定谔 ♠



这本书也渐渐进入了尾声，接下来将要讲解量子力学中最重要的部分。当然，对于难的部分跳过去也没有关系，为了让大家可以享受其中的乐趣我会尽量写得通俗易懂，这一点大家可以放心。

德布罗意所提出的电子的波不知道从什么时候开始被称为了“物质波”，那是因为不仅仅是电子，所有的物质都具有波动的性质。比如我们的身体，就像波一样喧腾腾的朦朦胧胧的。这里的“朦朦胧胧”的幅度是一个原子大小的单位，所以日常生活中并不因为“我是波？”而担心。肉体存在于人眼可以看得见的地方。

可是问题是波的振动会很大的影响物质的位置和运动的电子。而且对于“物质波是发现概率的波”的说法似乎谁都不能立刻明白。

没有关系，即使是爱因斯坦和薛定谔，对于这个“概率解释”最终也没有完全理解。而且对于德布罗意的论文产生兴趣的薛定谔虽然亲手建立了表示物质波的运动方程式，却也没有思考出物质波到底是怎样一种东西。虽然大家都认为只有对它彻底了解的人才可能从数学上推导出那个方程式……

暂不考虑我们并没有薛定谔那么擅长数学的事实，就让我们用我们的想象力去接近物质波的真面目吧。

♠ 发现使得概率波的范围缩小 ♠

在解释量子力学中的“概率”时，关键是观察者的存在。所谓的观察者，也就是指“看的人”，假设这个人存在与否决定了物质的状态。

比如说，一些解释的书里经常出现的“月亮”的话题。悬浮在夜空中的月亮，当观察者抬眼去看的时候它确实存在于那里，而当观察者没有看的时候，它只是在波动的范围内朦朦胧胧的游移不定。在现实生活当中，由于它的振动是非常微小的所以不会产生什么问题，而如果月亮显示出其直径的好几倍的距离的波动性的话，便无法确定它的位置了。

电子所显示的正是这样一种状态。

将电子的“发现概率波”模型化后画成图，通常画出来的都是像云扩散开的样子。接下来让我们将图与坐标图进行对比的同时，了解一下关于物质波的概念的更加详细的内容。

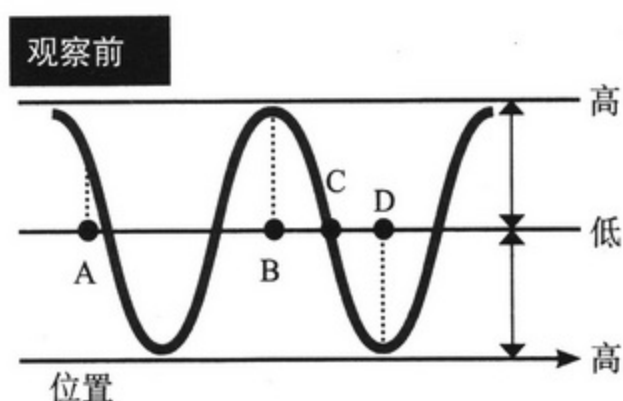
观察者没有看的时候，原子中的电子会按照薛定谔的方程式形成概率分布的波。作为波动的“振动”将它表示出来的是另一个图。

在这一阶段电子的位置是无法确定的。它们在各自的位置上，像云一样扩散成一片。

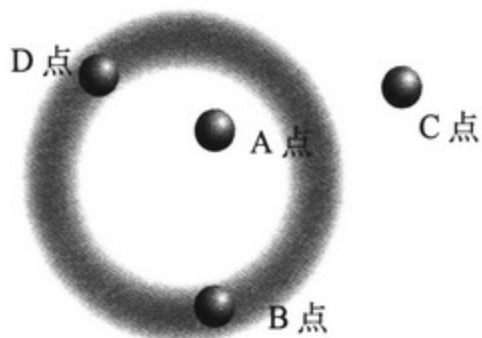
然而这个时候作为粒子的电子并不是像“咖啡中的牛奶”一样薄薄的扩散开的。像“在这里被发现的概率是 50%”，“这里的话是 30%”等各种各样的模式“重叠在一起”的状态才是量子力学的答案。

然后观察的结果是可以确定电子处于 B 的位置。于是就没有可能在别的位置上发现它了，所以波的坐标图就是在某一点的直线。这就是物质波的收缩。

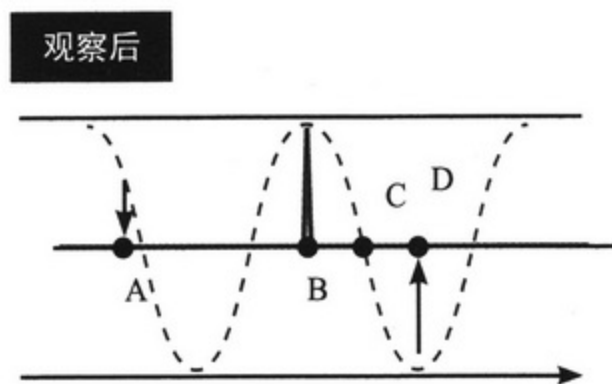
实际上虽然有点奇怪，现如今这被认为是最接近事实的电子（还有所有的物质）的形象。



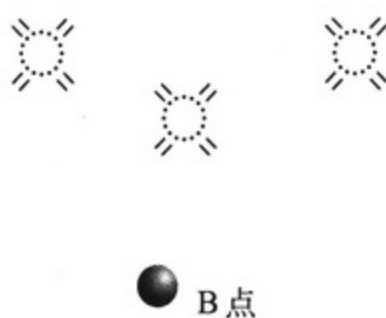
观察者没有看时的概率分布的波



在各自的位置上像云一样扩散成一片



物质波发生收缩在某一个地方被发现的状态



在其他地方被发现的可能性变为 0

♣“分身术”与发现概率的波的大不同♣

在这里还有一个误解必须解开。

说起发现的概率，很容易像小蕉那样认为。

也就是说一个电子在这里那里不停地飞转着。

我刚开始读量子力学的书时也是这么想的。我想这可能跟以前读的关于忍者的漫画有关。

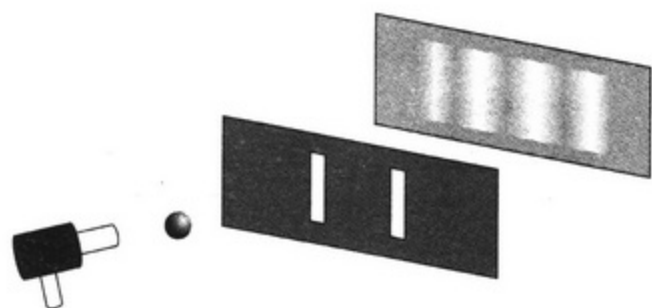
漫画中的忍者（当然真正的忍者是不可能的）为了扰乱敌人的视线会以很快的速度围绕敌人旋转。这个时候，时不时地一点一点地停下来，又移动到别的地方，然后不停地重复着这样的动作，由于只能在某一点看见，于是便完成了分身术。

可是即使能够记住这样高超的技艺，由于分身的时候必然会存在于某个地方，如果敌人的技艺更高超的话也会被他的飞镖击中。然后，就会听着“你所在的地方我看得清楚着呢”这样的台词而倒下。多让人讨厌啊，这样的忍者人生。

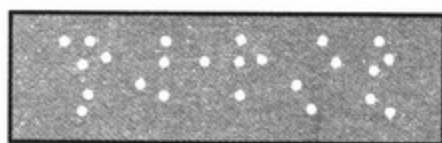
这个时候也是，如果分身为五个的话，每一个位置存在的可能性各为大约20%，这就很容易让人觉得“不就是发现概率的波嘛”，可是量子力学并不是那么肤浅的。

不管怎么样，在被发现之前电子并不是粒子而是波。这里有证明绝不是粒子在飞转的实验。

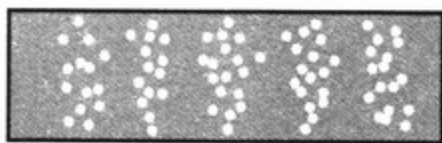
一开始，希望大家可以思考一下证明电子是波的双缝实验的实验装置。让从电子枪里发出来的电子线通过两个接近的缝隙时，对面的屏幕上就会慢慢出现干涉的形状。这正是波动所特有的干涉现象，也成为电子是波的假设的决定性的证据。可是问题是即使是一个一个的，有间隔的发射电子，只要不断增加发射



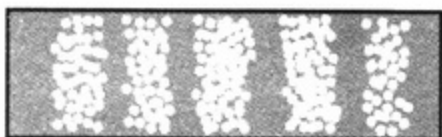
双缝实验中一个一个地发射电子的话……



一开始虽然看不出干涉的形状……



渐渐地干涉的形状出现了……



最后即使是一个一个地发射电子也能够出现干涉的形状。

的电子的数量就能形成干涉縞。

当时，关于电子的波的干涉，科学家们认为“不会是分别通过两个缝隙的电子互相影响的……”。可是，当电子一个一个地按顺序通过缝隙时也会出现同样的现象。这是怎么回事呢？

可以得到的原因只有一个。即使只有一个电子，自己也会发生干涉。也就是说，到触碰到屏幕上的位置被观察到为止，粒子并不是以粒为单位的，而是游移不定朦朦胧胧的波。

这不过是我们的想象，现实中根本没有确定的方法。要想观察触碰到屏幕之前的电子，只能用光来照射，而一旦用光照射了，光（光子）就会撞到电子而改变其轨道，也就得不出什么结论了。

接下来就是海森堡的不确定性原理了。

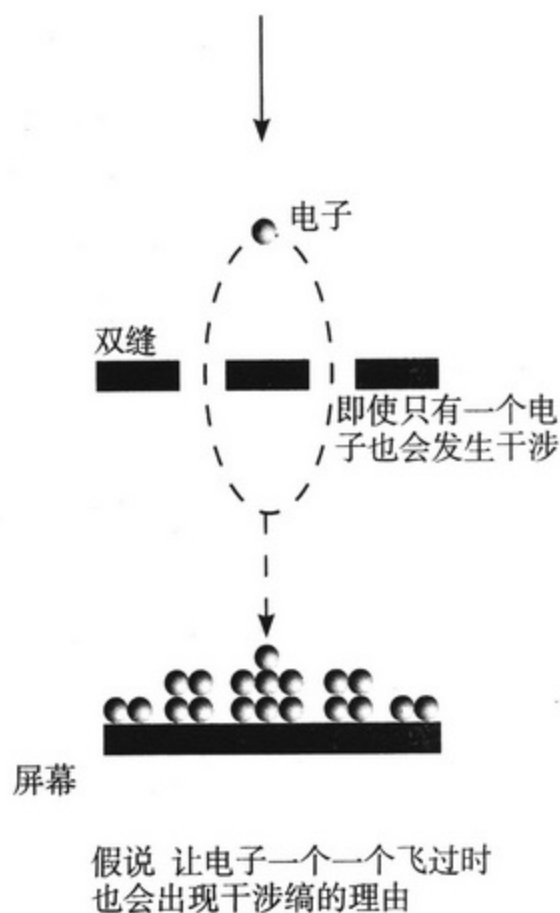
要观察通过缝隙时的电子，虽然可以确定光撞上时的位置，由于之后的运动发生了变化，屏幕上并不会出现縞的形状。所以如果什么都不做的话，电子就会按照我们预测的运动方式来运动于是就能出现縞的形状，只是我们无法确定中途电子的位置。正如下面所说的，“在两个物理量的组合中，如果不让测定值具有偏差就无法测定出这两个物理量”。

◆ 让概率解释派获得胜利的薛定谔的猫 ◆

接下来，我们进入九尾老师曾经说过的“（一开始）还是不要涉及为好”的关于“薛定谔的猫”的故事。

对于量子力学的概率解释怀有疑问的薛定谔，有一次，向大家展示了这样一种思考实验的方法。

1. 准备一个有盖子的箱子，放入一只猫。
2. 在同一个箱子里放入放射性物质镭，放射线检测器和氰酸氢的发生装置。将他们设置成：镭放出 α 粒子时就会被放射线检测器感知到，然后让氰酸氢发生装置运作。



这种情况之下，镭的 α 衰变被认为是应该用量子力学的概率解释来说明的现象。也就是说，在无法观测的状态下，无法确定是否放出了 α 粒子。而在打开盖子的一瞬间，两种状态立刻“收缩”到某一个状态，结果也就很明显了。

在这里，假设产生 α 粒子的概率是50%，在盖上盖子的状态下，猫处于半生半死的奇妙的状态。“会发生这样奇怪的事情，不正说明了概率解释是错误的吗？”这就是薛定谔的观点。

尽量将上面的内容简单明了的用算式来表示的话就是

|原子的状态| = |放出放射线| + |不放出放射线|

右边表示的是两种状态按照发生的概率叠加在一起。薛定谔认为这与下面的状态是一样的。

|箱子中的状态| = |放出放射线猫死亡的状态| + |没有放出放射线猫活着的状态|

大家是怎么认为的呢？

虽然薛定谔认为这是“无法解决的悖论”，而实际上，在量子力学上已经解决了这个问题。

首先是波尔老师所率领的哥本哈根学派的解释。在观察者打开盖子往里看的一瞬间，猫的状态群就会收缩成某一种状态（即波动的收缩）。也就是说，上面的第二个式子说到底只是描述了看不见箱子内部时的状态。在打开盖子的一瞬间也就决定了是其中的哪一种状态。

当然薛定谔并不能接受这种模糊的解释。他在对概率解释开始产生兴趣的物理研究者们面前这样强调道：

“大家无论如何都要注意，有谁会相信如此愚蠢可笑的话呢？”

对于薛定谔来说，他坚信“自然现象的未来是按照自然法则来决定是某一个”的一直以来的物理学的大原则，甚至建立了可以表示物质波的方程式。可是，实际上却是不一定的……难怪薛定谔会一直耿耿于怀了。

对于概率解释，爱因斯坦在给波恩的信中也留下了有名的语句“神是不会通过掷骰子来决定事情的”，还有作为量子论之父的普朗克，物质波的倡导者德布罗意也都不持赞成的态度。在当时的物理学界，寥寥无几的成员当中，主流派都是这个阵营中的。

虽然如此概率解释派也并不畏惧。虽然在两派的激烈争论中有好几次概率解释派都差点儿要输了，每当这个时候，波尔总会说：“让我想一个晚上。”然后将问题带回家，然后总会

在最后的关键时刻反驳成功。在这样的状态一直持续的过程中，关于猫的生死有了下面的被认为是极具理论性的回答。

对于箱子中的猫是死还是活，在打开盖子之前我们并没有确定的方法，所以，说两者的概率各为 50% 并不矛盾。

试图将概率解释派打得落花流水而公布出来的这句话在现在成为了普及量子力学那不可思议的趣味性的宣传工具。在争论中失败的薛定谔甚至说出了“要是不研究物理就好了”的话并转向了生物学。在生物学的领域他创立了分子生物学这一门新的科学，在研究精神世界方面也创造了伟大业绩的薛定谔无疑是一个天才。

于是，“薛定谔的猫”就成了否定现在的量子力学的主流思想时拿出来刁难人的问题，而现在答案已经出来了也就成为不了讨论的对象了。所以大家也许会认为已经没有必要再将它拿出来说了，可是在以初学者为对象的入门书中，一定会出现“薛定谔的猫”，而且在封面或文章里多画有猫的图案。因此很多人会误认为它是量子力学的重要的理论，并得出“量子力学不仅难而且残酷”的结论而开始讨厌量子力学。所以我认为对于“薛定谔的猫”，在使用上一定要特别注意。



◆ 不断增加的“多世界”解释 ◆

认为“薛定谔的猫”有用的是思考下面将要说的“多世界解释”的时候。多世界解释是埃弗雷特（1930~1982）这位美国物理学家于 1957 年提出的，这个时候的他还只是个研究生。物理学的新的理论由像他这样的年轻人提出的事情是经常发生的。

现在在箱子里放入猫，还有和刚刚一样的装置。于是在这一阶段，世界分成了两个。

1. 猫活着的世界
2. 猫死了的世界

然后在将盖子打开的瞬间，第一个世界的观察者发现猫是活着的，而第二个世界的观察者发现猫是死的。当然观察者在打开盒子之前是不可能知道自己到底是哪个世界的居民的。

虽然听着有点恐怖，然而按照这一解释，世界就在胡乱的不断增加着。

猫的比喻似乎有点复杂，让我们用别的东西来说明吧。

现在假设这里有一个内部被分成两半的箱子，而箱子里只有一个电子，我们并不知道它是在左边的格子里还是在右边的格子里。从量子力学的角度来考虑的话，现在箱子里左右两边的状态是共存的。

这时候打开盖子，让光射进去后观察电子。在那一瞬间便明确了电子的位置。如果在左边的话，按照哥本哈根解释就是“从两者的叠加状态收缩到某一个状态”，而多世界解释却认为既存在电子在右边的世界，也存在电子在左边的世界，两个世界是共存的。也就是说在盖子被打开的瞬间，世界增加了。

波尔所率领的哥本哈根学派从 20 世纪 20 年代开始处于一种无敌的活跃状态下，在争论中击败了爱因斯坦，将薛定谔逼进了生物学界（并不是有企图的而是从结果上来看……），作为量子力学的主流，哥本哈根学派不断建立了很多新的理论。然而从与它相对抗的多世界解释的出现开始，形势就有点不妙了。

当然，到底谁对谁错一直也都没有科学的证明方法，因此还没有结论。可是如果读物理学家们写的书的话就会发现，“可能多世界解释会获胜”是现在的趋势。

虽然不是像我这样的门外汉能够说出口的问题，但是在努力去理解多世界解释的过程中，我明白了一点。

哥本哈根解释所设定的虽然是只能通过概率来确定的“模糊的量子世界”，而观察者却是格外明确的存在。对于“只要观测到了电子的位置，在那一瞬间，概率的波就收缩了”的说明产生不协调的感觉也正因为此。

而多世界解释却把观察者也假设成是像量子一样的存在。不是绝对的存在，而只是按照概率分开的多个世界当中的“一部分世界”中的居民。不由得觉得这种解释还算贴切的是只有我一个人吗？

◆ 能量也好，物质也好，时间也好，都是由量子构成的 ◆

刚刚在说明多世界解释时我只是说世界增加了，而没敢使用“无限的”这样的文学表现手法。这种想法认为实际上世界是无以计数的在不断增加的，然而在相对论和量子力学出现以后无限这种想法就变得不合适了。与布丁无法无限的对半分下去一样，所有的东西都只有有限的单位。这就是数学和现实的差距。

成为最小单位候补的是在马克思·普朗克解说时出现的被列入普朗克单位系列的几个单位。普朗克单位系列是以普朗克定数 h ，牛顿的重力常数（万有引力常数） G ，真空中的光速度 c 等基本的物理定数为基础定义的自然单位系列。在这里我们先来了解一下其中之一的普朗克长。

对，不可能一直持续地吃着布丁！

在终于得出结论的时候，量子力学的话题也要就此结束了。虽然不知道大家理解了多少，但是我相信大家一定从中得到了应有的乐趣。

现在，如果这里有一个时光机器，我希望可以给紧握着勺子苦恼着的儿童时代的自己送去这本书。这样的话，在按照概率分开的别的世界里，我一定可以成为一名优秀的物理学家……可能哦。

● 补 充

关于上面的解释，我从监修川端老师那里得到了这样的回答。

不可能这么简单。分裂数按几何级数不断增加的基础上，分裂的时点也因运动状态的不同而有所差别。所以，可以说有无限个世界存在着。

嗯，是这样的吧。物理的世界还是非常非常深奥的啊！

● 球穿墙而过

证明量子力学的正确性的具有代表性的现象中有一种叫穿隧效应。

把球扔向远处的时候，如果面前有一堵很高的墙，就必须把球扔的高于墙的高度。从物理学的角度来说的话，就是“给予球的动能必须大于与墙的高度相当的势能”。没有如此大力气的人，无论什么时候都不可能把球扔过墙壁。

一直以来的物理学认为，能量如果不可以超过这种“势能的障碍”，就不可能越过去。用通常的思维方式来思考的话这样的结论是理所当然的。动物园里的猛兽如果可以随意的爬过栏杆的话，可就不得了了。

而实际上，这样奇怪的自然现象是在发生着的。其中的一个例子就是 α 衰变。

α 衰变是指从原子核中放出有两个质子和两个中子的 α 粒子（与氦的原子核相同）而发生衰变的现象。让夜光涂料发光的能量就是利用了这个。附带说一下，虽然由 α 粒子的流动而形成的 α 线是放射线的一种，但是由于其粒子比较大用一张纸就可以截住。

在物理学上原子核是由被称为“强作用力”的强大的核力量而形成的，那为什么 α 粒子可以从原子核里摇摇晃晃的飞出来呢？古典物理学没能解释这一现象。

由质子和中子构成的原子核和 α 粒子之间是由电磁力所产生的排斥力（使分开的力）在起作用的，但是核力（强作用力） $>$ 电磁力的强度的级别是绝对性的。

● 即使粒子不可以，只要变成波就可以越过墙壁

清楚明了的解释了困扰科学家们很长时间的这个问题的是，出生在俄国的美国理论物理学家乔治·伽莫夫（1904~1968）。1928年，他应用量子力学将 α 衰变定义为“ α 粒子运用穿隧效应穿过原子核周围的势能的墙壁的现象”。以两年前薛定谔所发表的波动方程式为基础来考虑的话，他的观点是 α 粒子（ α 粒子的存在概率）渗透到了势能

障碍的对面。

没有必要赘述，量子力学认为物质既是粒子又是波。如果是波的话，即使有墙壁也可以通过衍射到达目的地。

要把球扔过高高的墙壁，需要很大的能量，如果是声音的话即使声音很小在对面也可以听见。这就是衍射现象。

具有显著波动性的小的粒子会以简单的形状产生这种穿隧效应。

可是，物质变成波然后穿过墙壁，听起来好像是魔术。

● 半导体所进行的正是量子力学上的运动

20世纪50年代末，有一位在索尼的前身东京通信工业有限公司的半导体研究室里工作的男子。他的名字叫江崎玲於奈。当时的研究课题是提高刚刚开始实用化的晶体管的性能。

他将作为半导体材料的锗弄薄后进行实验。于是从某个时间开始出现了计算以外的举动。通常情况下增大电压的话电流应该也是增加的，可是却出现了减少的现象。原因是由穿隧效应产生的影响越来越大，他们发现普通的固体物质也会产生这样的现象，这可是一个划时代的发现。由于这一发现，江崎于1973年获得了诺贝尔物理学奖。

由于当时的半导体开发，对于材料的加工并没有那么“薄，细，小”，因此利用这一现象的江崎二极管并没有得到普及。然而，随着运用了集成电路的半导体的微小化的发展，如果计算中不考虑穿隧效应的话，设计是无法进行的。于是，人们开始预见这一效应来开发新的装置（电子零件），反过来，在原来希望绝缘的地方却漏电时需要应付泄露电流的方法。不管怎么样，现在的半导体是在量子力学的计算的基础上形成的，利用它而制成的家用电器，情报通信机器，汽车，飞机，火箭等，这一切的一切如果没有量子力学都是无法制造出来的。

专栏 量子通信、量子计算机、量子密码……全都是量子

● 量子以比光还要快的速度进行着瞬间移动

作为利用量子力学的技术的最前沿，有量子通信，量子计算机，量子密码等。为了说明这些需要一定的知识基础。

使某个地方出现两个基本粒子。例如，由 π 介子分解成光子这样的单独的行为而产生的基本粒子具有双子的关系，可以用同样的波函数来表示……这些内容都是我现学现卖的，简单地说就是希望大家明白现实世界中是存在成对的基本粒子的。由于这样的双子共有着某种状态，所以只要知道一方的状态就能够知道另一方的状态。只是这种状态在观察到之前是无法确定的。

因此在远离这两个成对的基本粒子的地方观察其中一个然后确定其状态的话，另外一个的状态也可以在这一时点得到确定。由于这一现象如同在很远的地方出现了相同状态的基本粒子一样，而被称为量子心灵运输。

然而直截了当地提出反对的正是那个讨厌量子力学的爱因斯坦。按照他的相对性理论是不存在比光还要快的物质的，不可能以超越光速的速度来传递信息。这是物理的原则。可是量子态隐形传输却犹如思想感应一样能在一瞬间得到相同的信息。这是爱因斯坦所无法认同的内容吧。

1997年潘建伟等人成功地进行了量子态隐形传输实验。运用量子构筑超高速的信息通信网络也因此成为可能。

● 极大提高计算机性能的技术

量子计算机是利用了量子力学中的某种“模糊性”。

过去的计算机是以“0或1”的1比特作为最小的信息单位来进行计算的。也就是二进制。而量子计算机却是在0和1之间建立了很多重叠的状态，以增加数值的数量。这个被称为量子比特，它甚至可以识别2的几千次方的完全不同的状态。也就是说可以同时很多计算。

像这样的并列处理也可以通过将好几个现在的普通计算机的 CPU 排列起来，然后让它们同时运转来实现。被称为超级计算机的就是这种东西。最近也有将很多计算机通过网络连接起来进行复合使用的格网计算技术。能够同时计算的并列度可以达到 2 的 20 次方左右，能量的差异可想而知。

据说量子计算机的实用化有望在 2020 年得以实现。虽然还不知道它可以应用于哪一方面，我想对于与我们切身相关的需要进行复杂计算的天气预报一定会有很大的帮助。将来也许可以完全准确的判断台风等的线路。

● 终极的密码也是从量子力学中产生出来的

量子计算机的出现为信息通信世界带来了一场巨大的革新，这不仅仅是一件好事。例如，现在在计算机的世界里所使用的很多密码，被认为是“不是解不开，而是即使使用超级计算机也要花上数千年的时间”。然而，据说使用量子计算机只需数十秒的时间就可以完成，这样的话所谓的公开键密码方式就有可能没用了。

虽然并不是说量子时代就必须使用量子密码，然而现在量子密码这一新技术的开发却异常的盛行。

量子密码的最大特征就是利用了量子状态可以根据观测而发生变化的性质，也就是能够察觉到窃听这一点。

在量子心灵运输中所说明的量子状态，在观察之前是无法确定的，比如通过用光照射来查看时，这个时候它的状态实际上已经发生了变化。所以，在利用密码的通信中即使被第三方盗取，立刻就可以有应对的措施，因而可以显著降低内容被窃取的可能性。

量子密码已经在被进行着实验研究，它的实用化可能比我们想象的还要快。

专栏 不为人所知的量子力学的英雄 提出电子旋转的泡利

● 放入磁场中光谱就会变乱

J.J. 汤姆逊从阴极线的研究中发现电子是 1897 年的事情，而实际上在前一年已经有人发现了“像电子一样的东西”的存在。他就是荷兰物理学家彼得·塞曼（1865~1943）。

通过火焰的颜色反应实验等，很多人都知道加热钠会发出橘黄色的光。对，就是高速公路的隧道里所使用的钠灯的颜色。用棱镜来进行分光的话可以得到一个很漂亮的光谱，然而有一次，塞曼在钠的旁边放了一个具有很强吸引力的磁石然后让钠发色，结果光谱分裂成了好几个（塞曼效应）。

在这里能够想象到的是，原子当中存在着带有电荷的“更小的粒子”。然后由于这种小粒子的振动。光谱被打乱了。

一直以来原子都被认为是一个单一的粒子，塞曼的这个实验却让人们开始思考，原子“可能也具有内部结构”，而且塞曼的这个实验被认为是让人们对原子结构产生怀疑的最早的例子。虽然第二年电子就被发现了，可是关于其如何振动的探明却是很久之后的事情。

● 解开周期表之谜的泡利的不相容理论

1913 年，尼尔斯·波尔发表了原子模型，于是氢的光谱得到了大概的解释，人们开始热衷于寻求另一个疑问塞曼效应的答案。关于这一点，一开始也没能逃脱宇宙模型的影响。虽然很多学者都认为“电子或许也像地球一样进行着公转和自转……”瑞士物理学家泡利（1900~1958）却持坚决反对的态度。

他是这么认为的。如果电子像天体一样在旋转的话，从光谱的状态推测出来的旋转速度（表面的移动速度）就会超过光速。由于这违背了相对性理论，所以进行的应该是别的什么不同的运动……

以这一想法为基础，进一步对原子内的电子状态进行详细的研究后，泡利于 1925

年发表了后来被叫做泡利不相容的原理。其内容的一部分可以概括如下。

- 电子进行着自转，有向上和向下两种。
- 原子内的同一个轨道上只能容下进行着不同自转的两个电子。

由于电子是无法测定其大小的微小的点粒子，所以无论它以怎样快的速度自转，都不可能和相对性理论发生矛盾。因此由自转所产生的电子的角运动量与物体的旋转运动是不同的，它不带有向量。

在这里省略详细的内容，以泡利不相容为基础来思考原子的电子配置的话，就可以明白为什么会发生元素周期率的物理理论上的理由。比如说，有很多原子，为了保持平衡，每个原子的轨道上都存在着相同数量的向上和向下自转的电子，而铁原子的第三轨道上却缺少四个向相同方向自转的电子。其结果是产生了强烈的磁场，这就是磁性。

● 请注意“泡利效应”

虽然泡利对之后的物理，化学，电子·电力技术等带来很大的影响，可能是因为同一时期的杰出学者太多，关于他人们却并不了解。

泡利大学毕业后就走上了研究者的道路，做过马克思·波恩的助手，最后在哥本哈根的波尔研究室里工作，可见他的优秀是毋庸置疑的。实际上，由于爱因斯坦的推荐，他于1945年获得了诺贝尔物理学奖。

然而，除去学生时代，他基本上没写什么论文。所以，他的研究成果只能通过他与波尔等众多学者交流的长信的书面内容来推测。

虽然作为物理学家他留下了伟大的成就，却没有成为伟大的人物，其理由可能就在于此吧。

而且他非常不擅长做实验，由于经常会弄坏实验装置，最后甚至出现了这样的说法，“只要泡利来到身边，试验装置就会坏”，“只要泡利从外面经过，实验装置就会变得不好用”等等。由于这样的谈论传播得很广，即使是在现在当不知道是什么原因装置出现故障时，有的学者还会说“这是泡利效应”。

附录 试解薛定谔方程式

我们请作为监修的川端老师亲自给我们解了 P.176~183 得到的薛定谔方程式。

■ 不包含时间的薛定谔方程式

由于薛定谔方程式是包含位置坐标和关于时间的微分的所谓微分方程式，解这个微分方程式就是求满足这个微分方程式的函数。在薛定谔方程式中就是波函数。为了解这个方程式，需要想各种各样的方法。

在这里为了简单，假设波函数 Ψ 只是关于 x 和 t 的函数，势能 U 只是关于 x 的函数，也就是 $\Psi = \Psi(x, t)$, $U = U(x)$ 。于是薛定谔方程式就从 P.183 的式 (26) 变成

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x, t) \quad \dots\dots\dots (29)$$

这时候的标准解法是

$$\Psi(x, t) = \psi(x) \phi(t) \quad \dots\dots\dots (30)$$

的“变量分离”型的解法，也就是寻找变量 (x, t) 在各自的函数里的分开的解。这在高中数学里应该学过。然后将式 (29) 代入式 (30)，就可以得到

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x) \phi(t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x) \phi(t)}{\partial x^2} + U(x) \psi(x) \phi(t) \quad \dots\dots\dots (31)$$

在这里，注意

$$\frac{\partial^2 \psi(x) \phi(t)}{\partial x^2} = \phi(t) \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} \quad \dots\dots\dots (32) *$$

※ 关于单变量函数 $\psi(x)$ 的微分，通常写成 $\frac{d\psi(x)}{dx}$ 或 $\psi'(x)$ ，通过 $\frac{d\psi(x)}{dx} = \psi'(x)$ =

$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\psi(x+h) - \psi(x)}{h}$ 可以求出。

再对 $\frac{d\psi(x)}{dx}$ 进行 x 微分时写成 $\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2}$ 或 $\psi''(x)$ 。

和

$$\frac{\partial \psi(x) \phi(t)}{\partial t} = \psi(x) \frac{d\phi(t)}{dt} \dots\dots\dots (33)$$

(在这里认为是如此即可), 方程式(31)就变成

$$i\hbar \psi(x) \frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \phi(t) \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + U(x) \psi(x) \phi(t) \dots\dots\dots (34)$$

然后将两边同时除以 $\psi(x) \phi(t)$, 变形后就可以得到

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{\psi(x)} \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + U(x) \psi(x) \right\} \dots\dots\dots (35)$$

这个式子的左边是随 t 的变化而变化的量, 右边是随着 x 的变化而变化的量。由于 t 发生变化后的值与 x 发生变化后的值是相等的, 所以只能是既不含有 x 也不含有 t 的常数值 C , 也就是

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} = C \dots\dots\dots (36)$$

$$\frac{1}{\psi(x)} \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + U(x) \psi(x) \right\} = C \dots\dots\dots (37)$$

由于这两个式子中都只有一个变量, 因此不是偏微分方程式, 而是被称为常微分方程式。于是式(36)的解就是

$$\phi(t) = \phi_0 e^{-\frac{iCt}{\hbar}} \dots\dots\dots (38)$$

此时的 ϕ_0 是 $t=0$ 时 ϕ 的值(初期值)。而在最终求解波动函数时, 由于 ϕ_0 与另一个函数 $\psi(x)$ 里所含有的系数必定会以积的形式出现, ϕ_0 变成为后者的一部分, 于是我们假设 $\phi_0=1$ 。

将(38)式写成我们比较熟悉的三角函数的形式的话就是

$$\phi(t) = \cos\left(\frac{Ct}{\hbar}\right) - i \sin\left(\frac{Ct}{\hbar}\right) \dots\dots\dots (39)$$

然而从(8)式可以看出, t 的系数必须是角振动数 $\omega (=2\pi\nu)$, 于是就可以得到

$$\left(\frac{C}{\hbar}\right) = \omega = 2\pi\nu \dots\dots\dots (36)$$

也可以写成

$$\nu = \frac{C}{2\pi\hbar} = \frac{C}{h} \quad \dots\dots\dots(41)$$

另一方面, 如式(1)所示, 可以得到

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \dots\dots\dots(42)$$

从式(41)(42)的比较中可以得出

$$C = E \quad \dots\dots\dots(43)$$

也就是说常数 C 实际上就是能量 E 。于是式(36)的解式(38)就是

$$\phi(t) = e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \quad \dots\dots\dots(44)$$

只是由于上一页所叙述的理由, 此时已假设 $\phi_0=1$ 。

于是, 式(37)就可以写成

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad \dots\dots\dots(45)$$

这就是被叫做“不含有时间的薛定谔方程式”或“定常状态下的薛定谔方程式”的式子。

然后将左边的 $\psi(x)$ 提出后就可以得到

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + U(x)\right)\psi(x) = E\psi(x) \quad \dots\dots\dots(46)$$

其中的

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + U(x) \quad \dots\dots\dots(47)$$

就是 P.183 出现的能量的算符 H 。而且 E 是势能 U 的“特征值”, 于是与这个特征值相对应, $\psi(x)$ 被称为“特征函数”。式(29)的解的波函数可以表示成将式(44)的右边代入式(30)中的 $\phi(t)$ 里的变量分离型的

$$\Psi(x,t) = e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \psi(x) \quad \dots\dots\dots (48)$$

要想知道 $\psi(x)$ ，必须赋予 $U(x)$ 具体的内容。

在这里我们再次确认一下 $\psi(x,t)$ 的物理意义。按照 1926 年波恩提出的解释，

$$P(x,t)dx = \Psi^*(x,t) \Psi(x,t)dx \quad \dots\dots\dots(49)$$

是指“假设已经测定出某一时刻的波函数所记述的粒子的位置时，这一粒子在 x 和 $x+t$ 之间的某一位置出现的概率”。在这里， $P(x,t)$ 是“概率密度”， $\psi^*(x,t)$ 是 $\psi(x,t)$ 的复素共轭，意思也就是用 $-i$ 来代替 $\psi(x,t)$ 里所包含的虚数单位 i 后的函数。于是，这一粒子在某一位置出现的概率一定是一，因此必须满足下列条件。

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(x,t)dx = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x,t) \Psi(x,t)dx = 1 \quad \dots\dots\dots (50)$$

这一条件被称为波函数的“正规化条件”。

■ 具有无限高障壁的井型势能

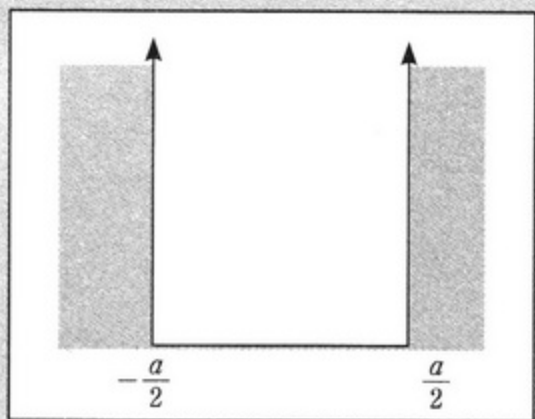


图1 具有无限高障壁的井型势能

非常简单且从物理学上来说富有启发性的 $U(x)$ 的例子之一，就是在有 x 的范围内是 0，而在范围之外是无限大的值被称为“井型势能”的例子。想象一下被封闭在由极其坚固的材料建成的箱子里，在箱子的相对的面之间存在着来回运动的分子。

在这里，能够想象到的是下面的势能。

$$U(x) = \begin{cases} 0 & \left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}\right) \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(51)$$

于是，由于粒子绝不可能从势能井里跑出来，不用解方程式 (45) 就可以知道，当 $x < -\frac{a}{2}$ 或 $x > \frac{a}{2}$ 时， $\psi(x) = 0$ 。

另一方面, 在 $-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$ 的范围内, 由于 $U(x) = 0$, 式 (45) 就变成

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi(x) = 0 \quad (E \geq 0) \quad \dots\dots\dots (52)$$

于是, 这个方程式的解就是

$$\psi(x) = A \sin(Kx) + B \cos(Kx), \quad K = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \quad \dots\dots\dots (53)$$

(实际上, 将式 (51) 代入式 (50) 的左边后可以发现其结果为 0)。从势能墙壁的位置 $x = \pm \frac{a}{2}$ 时, 特征函数 $U(x) = 0$, 可以得出

$$\psi\left(-\frac{a}{2}\right) = -A \sin\left(\frac{Ka}{2}\right) + B \cos\left(\frac{Ka}{2}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (54)$$

$$\psi\left(\frac{a}{2}\right) = A \sin\left(\frac{Ka}{2}\right) + B \cos\left(\frac{Ka}{2}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (55)$$

于是就能够得到 $A=0$, 或者 $B=0$ 。于是与它们相对应的特征函数就是

$$\psi(x) = B \cos(Kx), \quad A = 0 \quad \left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (56)$$

$$\psi(x) = A \sin(Kx), \quad B = 0 \quad \left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (57)$$

式 (56) 的情况下, 特征函数是 x 的偶函数, 也就是由于 $\psi(-x) = \psi(x)$, 于是它的偶奇性为偶。式 (57) 的情况下, 特征函数为 x 的奇函数, 也就是由于 $\psi(-x) = -\psi(x)$, 所以它的偶奇性为奇。偶函数是像 $y = \cos x$ 这样关于 y 轴对称的函数, 于是 $f(-x) = f(x)$ 。奇函数是像 $y = \sin x$ 这样关于原点对称的函数, 于是 $f(-x) = -f(x)$ 。

式 (56) 的情况下, 设 $x = \frac{a}{2}$, 于是

$$B \cos\left(\frac{Ka}{2}\right) = 0, \quad (B \neq 0) \quad \dots\dots\dots (58)$$

加上条件式 (54), 可以得到

$$\frac{Ka}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad \dots\dots\dots (59)$$

于是, 特征函数的奇偶性为偶的时候,

$$K = \frac{\pi}{a}, \frac{3\pi}{a}, \frac{5\pi}{a}, \dots = \frac{n\pi}{a} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (60)$$

另一方面, 式(57)的情况下, 假设 $x = \frac{a}{2}$, 于是从条件式(55)可以得到

$$A \sin\left(\frac{Ka}{2}\right) = 0 \quad (A \neq 0) \quad (61)$$

加上条件

$$\frac{Ka}{2} = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (62)$$

便可以得到, 在特征函数的奇偶性为奇的时候,

$$K = \frac{2\pi}{a}, \frac{4\pi}{a}, \frac{6\pi}{a}, \dots = \frac{n\pi}{a} \quad (n = 2, 4, 6, \dots) \quad (63)$$

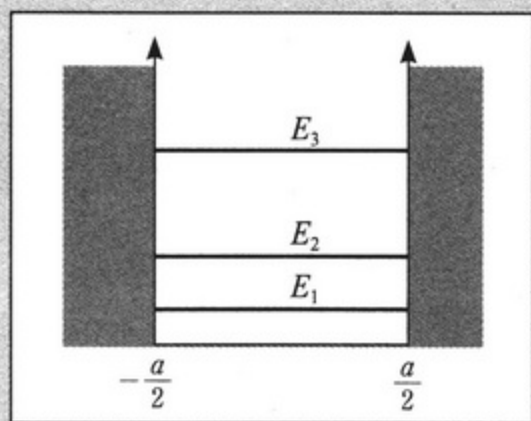


图2 无限井型势能的最初的3个特征值

式(60)(63)里出现的 n 就是这个问题里的所谓“量子数”。虽然 $n=0$ 也满足式(61)的条件能得到式(57)这种形式的解, 但是由于 $K=0$, 无论 x 取什么值, $\psi(x)=0$, 而这一解在物理上是没有意义的, 所以排除在外。

将正规化条件式(50)应用于式(48)的话, 就必须先将正规函数自身正规化。也就是,

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{iEt}{\hbar}} \psi^*(x) e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \psi(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x) \psi(x) dx = 1 \quad (64)$$

于是, 在特征函数式(56)的奇偶性为偶的时候, 利用式(60), 就可以得到

$$B^2 \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \cos^2(Kx) dx = B^2 \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{1 + \cos(2Kx)}{2} dx = B^2 \frac{a}{2} = 1 \quad (65)$$

然后可以得到

$$B = \sqrt{\frac{2}{a}} \quad \dots\dots\dots (66)$$

特征函数的奇偶性为奇的时候也是一样，可以导出

$$A = \sqrt{\frac{2}{a}} \quad \dots\dots\dots (67)$$

从以上内容可以得出，正规化后的特征函数内容如下。

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{a}{2}} \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right), \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad \left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (68)$$

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{a}{2}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right), \quad n = 2, 4, 6, \dots \quad \left(-\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (69)$$

总结式(60)和式(63)，可以得到，特征值 E 并不是连续的值，而只是由量子数 n 所决定的离散的值 E_n 。也就是

$$E_n = \frac{K^2 \hbar^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2}, \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots) \quad \dots\dots\dots (69)$$

特别是最初的特征值，

$$E_1 \left(= \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} \right)$$

由于在这里被束缚在势能内的粒子是可以得到的最小的能量值，于是被称为“零点能量”。

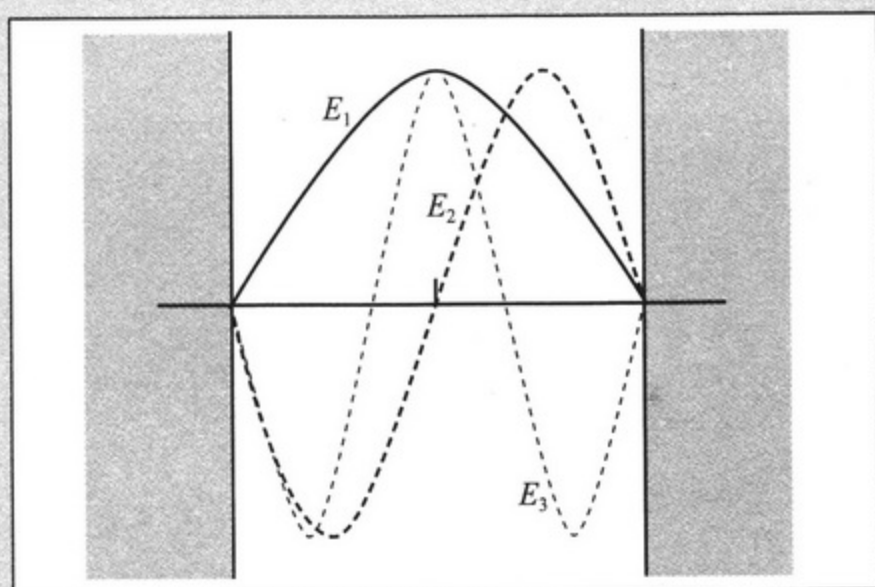
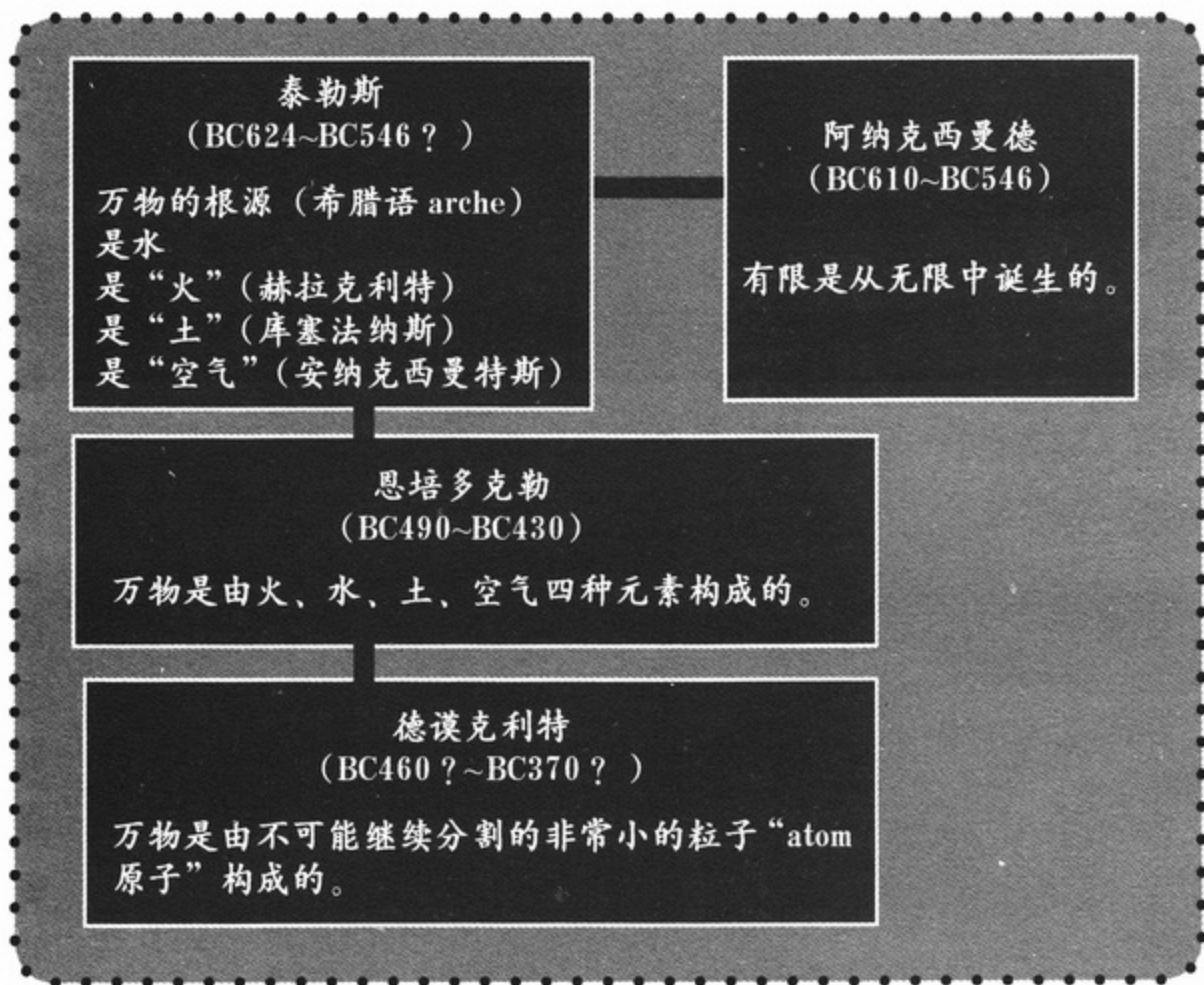


图3 特征值的最初的3个值

量子论·量子力学系谱

哲学原子论

※ 哲学 = 通过理性的思考来探索宇宙及人生的根本问题的科学

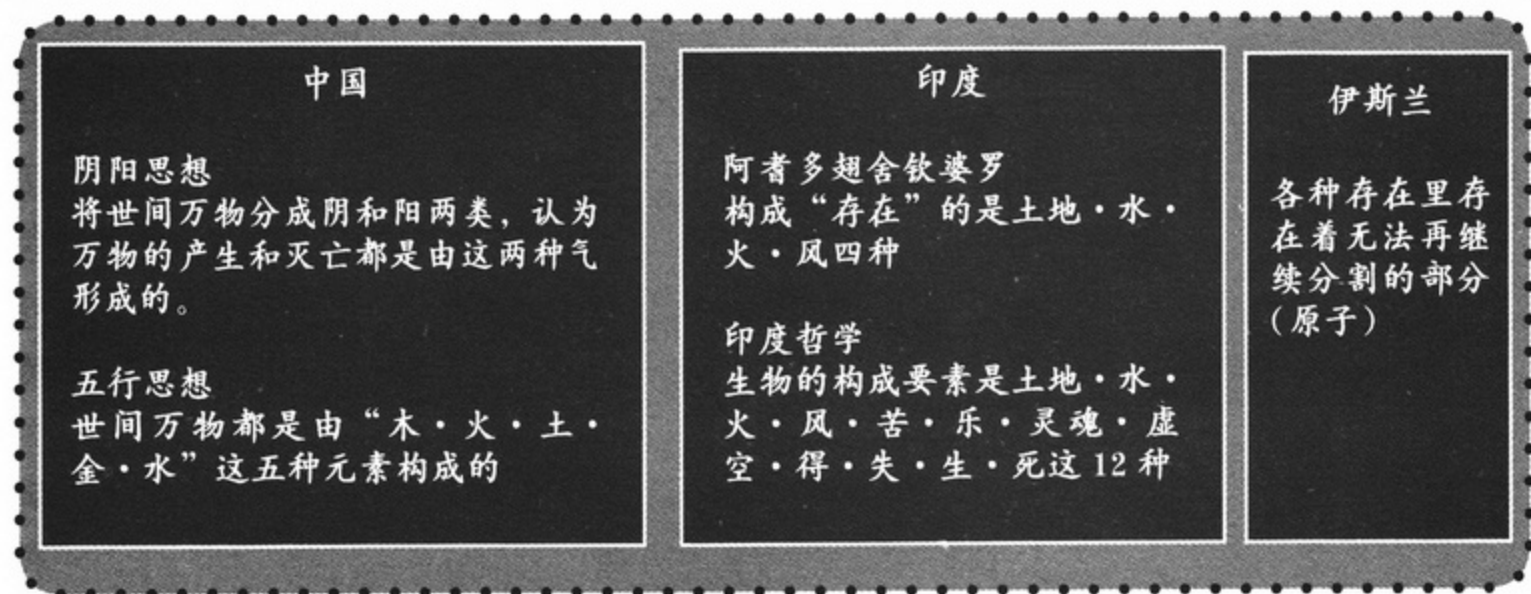


大约 2000 年的空白

还没有通过科学的证实就被忘却了

观念原子论

※ 观念 = 通过经验的累积而形成的固定的想法。



科学原子论

物质的研究（化学 + 物理）

原子研究的复活！

玻意耳

(1627~1691)

对古希腊的“火·水·土·空气”四元素说产生怀疑，元素应该是在实验中无法再继续分割的“物质”

开始元素发现的热潮！

拉瓦锡

(1743~1794)

发表了通过化学实验所发现的 33 种元素。也包括一部分化合物（1789）

原子得到了定义！

道尔顿

(1766~1844)

原子说（1803 年）

1. 相同元素的原子具有相同的大小，质量和性质。
2. 化合物是由不同的原子按照一定的比例化合而成的。
3. 化学反应只是原子和原子结合方式的变化，并不是新的原子的产生或原子的消失。

倍数比例的法则（1804 年）

原子的特性是？

门捷列夫

(1834~1907)

提出了以周期率为基础的元素周期表（1869）

原子并不是最小的粒子！

巴尔末

(1825~1898)

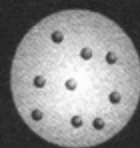
发现氢原子的线状光谱是由四种波长的光形成的→巴尔末系（1885 年）

量子论

电是由电子的移动而产生的!

J.J. 汤姆逊
(1856~1940)

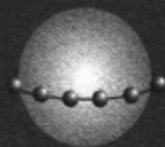
电子的发现 (1897) 西瓜型原子模型 (1904)



西瓜型原子模型

长冈半太郎
(1865~1950)

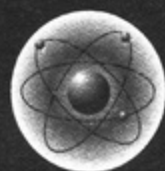
土星型原子模型 (1904)



土星型原子模型

卢瑟福
(1871~1937)

特别规定了原子大小的改良土星型原子模型 (1911)



改良土星型
原子模型

在卢瑟福的原子模型中，电子会被原子核吸引而使原子产生衰变!

量子论之父

普朗克
(1858~1947)

在光能等物理量中存在最小单位→量子假说 (1900)

爱因斯坦
(1879~1955)

由于光具有粒子的性质，所以其能量是呈离散状的
→光量子假说 (1905)
特殊相对性理论 (1905) 一般相对性理论 (1916)

基本粒子

泡利	电子中存在两种自转，一个轨道上只有一个相同的电子→泡利不相容 (1924)
狄拉克	从波动力学和矩阵力学的计算中预言反物质的存在 (1928)
查德威克	发现中子 (1932)
汤川秀树	介子理论 (1935)
盖尔曼	夸克理论 (1963)

量子力学

微观物质的行为只能通过概率计算出来！

波尔

(1885~1962)

量子力学之父，哥本哈根派

即使电子的能量是离散的也没有关系→以波尔的量子条件，波动条件为基础的原子模型 (1913)

海森堡

(1901~1976)

在两种物理量的组合中，如果不让测定值具有偏差就无法测定出这两个物理量→不确定性原理 (1927)

通过矩阵将电子的振动数和光谱的关系算式化→波动方程式 (1925)

波恩

(1882~1970)

物质波是一种概率的波，而且在被看见的瞬间收缩成一个点→物质波的概率解释 (1926)

量子力学的解释

VS

对立

古典物理学的解释

德布罗意

(1892~1987)

因为电子是波 (1923) →所有的物质都是波 (物质波)

1927年通过实验得到证明

薛定谔

(1887~1961)

用算式证明如果电子和物质是波的话其能量就会呈离散状→薛定谔方程式 (1926)
→波动力学

根据自然法则自然现象的未来理所应当只有一个

现代的理论 and 假说

多世界解释 超弦理论 电弱统一理论

大统一理论 超重力理论 重力量子理论

图书杂志

- 『原子（アトム）への不思議な旅 人はいかにしてアトムにたどりついたか』三田誠広／著（ソフトバンククリエイティブ）2009
- 『〈図解〉量子論がみるみるわかる本』佐藤勝彦／監修（PHP 研究所）2009
- 『みるみる理解できる量子論 改訂版』和田純夫／監修（Newton ムック）2009
- 『シルヴィアの量子力学』シルヴィア・アローヨ・カメホ／著、小谷正博／訳（岩波書店）2009
- 『ねこ耳少女の量子論 萌える最新物理学』竹内薫／著（PHP 研究所）2009
- 『量子力学の解釈問題 実験が示唆する「多世界」の实在』コリン・ブルース／著、和田純夫／訳（講談社ブルーバックス）2008
- 『マンガでわかる「超ひも理論」』白石拓／著、工藤六助／画（宝島社）2008
- 『ノーベル賞理論! 図解「素粒子」入門』（別冊宝島）2008
- 『図解 相対性理論と量子論』佐藤勝彦／監修（PHP 研究所）2006
- 『量子力学とはなんだろう』長岡洋介／著（岩波ジュニア新書）2003
- 『真空とはなんだろう—無限に豊かなその素顔』広瀬立成／著（講談社ブルーバックス）2003
- 『科学史年表』小山慶太／著（中公新書）2003
- 『不確定性原理 運命への挑戦』都筑卓司／著（講談社ブルーバックス）2002
- 『「量子論」を楽しむ本 ミクロの世界から宇宙まで最先端物理学が図解でわかる!』佐藤勝彦／監修（PHP 文庫）2000
- 『ニールス・ボーア論文集2 量子力学の誕生』ニールス・ボーア／著、山本義隆／編訳（岩波文庫）
- 『ニールス・ボーア論文集1 因果性と相補性』ニールス・ボーア／著、山本義隆／編訳（岩波文庫）1999
- 『相対論対量子論—徹底討論—根本的な世界観の違い』メンデル・サククス／著、原田稔／訳（講談社ブルーバックス）1999
- 『量子力学 図解雑学』佐藤健二／監修（ナツメ社）1995
- 『量子力学が語る世界像 重なり合う複数の過去と未来』和田純夫／著（講談社ブルーバックス）1994
- 『10歳からの量子論—現代物理をつくった巨人たち』都筑卓司／著（講談社ブルーバックス）1987
- 『アラビア科学の話』矢島祐利／著（岩波新書）1965
- 『日本童話宝玉選』佐藤春夫ほか／監修（小学館）1961
- 『高校数学でわかるシュレディンガー方程式 量子力学を学びたい人、ほんとうに理解したい人へ』竹内淳／著（講談社ブルーバックス）2005

网址

- ・マルチメディアで見る原子・分子の世界（科学技術振興機構）：http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0030/atom_top.html
- ・科学の歩みとところどころ（啓林館）：http://www.shinko-keirin.co.jp/kori/science/sci_index.html#ayumi
- ・ミクロの世界（インターネット・セミナー）：<http://www.kutlkyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/>
- ・キッズサイエンティスト（高エネルギー加速器研究機構）：<http://www.kek.jp/kids/index.html>
- ・EMANの物理学：<http://homepage2.nifty.com/eman/index.html>
- ・電気の歴史イラスト館：<http://www.geocities.jp/hiroyuki0620785/index.htm>
- ・量子論の不思議な世界：http://www.geocities.jp/x_seek/index.html
- ・アインシュタインの科学と生涯：<http://homepage2.nifty.com/einstein/einstein.html>
- ・物理のかぎしっぽ：<http://www12.plala.or.jp/ksp/index.html>
- ・放射線のはなし（環境科学技術研究所）：http://www.ies.or.jp/ri_online/index.html
- ・化学と独り言：http://www.geocities.jp/amy_chemistry/index.html
- ・ikuro's-homepage：http://www.geocities.jp/ikuro_kotaro/index.htm
- ・青空文庫：<http://www.aozora.gr.jp/>
- ・夏梅誠のホームページ：<http://research.kek.jp/people/natsuume/index.html>
- ・宇宙・物理研究室：<http://laboratory.sub.jp/index.html>

そのほか『ウィキペディア フリー百科事典』の関連項目を参考にさせていただきました。

电视节目

- 『 $E=mc^2$ ～アインシュタインと世界一美しい方程式～（Einstein's Big Idea）』Nova, Darlow Smithsonian Productions／制作 2005

(O-4098.0102)

责任编辑：王 炜 赵丽艳

责任制作：董立颖 魏 谨

封面制作：许思麒

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社 社长 总编
“希望杯”全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》原副总编辑
中华炎黄文化研究会 常务副会长

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。



中国人民大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士

科学出版社 东方科龙

<http://www.okbook.com.cn>
zhaoliyan@mail.sciencep.com

上架建议：科普/漫画

ISBN 978-7-03-029192-9



9 787030 291929 >

定价：32.00元