

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中国古代科学技术史纲：

理化卷



前 言

现在，人们已经越来越广泛地认识到，科学史是人类文明中一个头等重要的组成部分。

这是科学史巨匠李约瑟先生之大作《中国科学技术史》第一章的第一句话。的确，当人类社会发展到以科学技术为第一生产力的今天，几乎每个人的日常生活都与高度发达的现代科技具有千丝万缕的联系。由此，古代科技文明的发展过程，也已经成为史学、哲学、教育等许多领域研究者所瞩目的课题。

然而无论是中国，还是世界上其他一些地方，在古代社会中都存在着科学与哲学难于区分、科学与技术相互脱离，或某一学科尚未形成自身的独立体系等诸多问题，因而使得按照现代自然科学的分科，去追溯其古代发展历程的研究方法遇到了许多困难。对于许多关心与研究中国传统文化的人来说，中国古代究竟有没有科学，中国古代科学与西方近代科学的差别何在等，均是极具吸引力的问题。实际上，如同科学思想本身就是按照人们所能具有的理性认识，去描绘一幅自然界的图画并对其各部分的相互关系与运动规律作出尽量符合客观的解释一样，科学史研究也是在努力揭示古代认识自然的方式、思想体系形成的过程，以及改造与利用自然的技术成果等等。但是，两者均不可能绝对与客观事实完全一致。

“科学”一词的本意是学问或知识的意思。尽管在英语中已被作为“自然科学”的简称，但仍旧是指关于自然现象的有条理的知识，“可以说是对于表达自然现象各种概念之间的关系的研究”，而不应被理解为仅仅是专指西方近代兴起的“实证”性研究方法，或误以为只有“正确的”才是“科学的”。衡量“科学”或某一学科的建立，关键应该是看有关自然的经验性的零散知识，是否被系统地集中到一起，构成了认识上的体系，而不在于这个体系的正确与否。只有当这个认识的体系逐渐形成时，人们才会有目的地去研究某一学科的理论、方法；才会从发展这一学科的角度去提出新的问题，并寻求解决的方法，从而推动这一学科不断向前发展。

正是基于有关这些问题的思考，一些尚属年轻的科技史专业研究者在深入考察中国古代科技发展史实，并努力探寻其思维方式的基础上，共同撰写了《中国古代科学技术史纲》一书，意在尽量忠实地向广大读者介绍中国古代科学技术所包含的具体内容，以及构成中国传统文化的重要组成部分——中国传统科学技术的特点。

廖育群

1993年底于北京

W. C. 丹皮尔：《科学史》，商务印书馆，1975年，第9页。

《中国古代科学技术史纲》

总主编序

路甬祥

中国已有五千年以上的文明史，它以源远流长、连绵不断以及光辉灿烂为显著特征，著称于世界民族之林。在繁花似锦的中国文明史中，科学技术的成就则以其特有的光芒，熠熠生辉，是为中国文明史的重要组成部分，同时又是世界科学技术发展史不可或缺的重要篇章。

中国古代科学技术的发生、发展，是与中华民族的生息、繁衍密切相关的，两者之间存在相互依存、互为因果的关系。中国古代社会的持续发展与进步，为中国古代科学技术的进展奠定了基石，而中国古代科学技术的进展，则是中国古代社会持续发展与进步的重要杠杆。诚然，中国古代科学技术的进步同社会的发展一样，并不是一帆风顺的，其间的高低起伏、顺逆迅速，自有一部令人惊叹（有时也令人哀叹）的历史。理清其发展的脉络，吸取其精华，并从中总结出经验教训，是一项十分有意义的工作。

中国古代科学技术是在特定的自然环境、社会状况、文化氛围以及思维和生活方式等条件下形成的知识系统。这个知识系统有自己的内部结构，有别具一格的科学技术内涵和描述表现方式。农学、医药学、数学与天文学是中国古代发展较为成熟的四大学科，地学、生物学、物理与化学也积累了许多宝贵的知识，众多的技术门类更素称发达。它们均有专门的著述传世，还有不少散见于浩如烟海的史籍里，或以物化的形式寓寄于有关文物之中。它们各有杰出的代表人物，构成群星闪烁的科学家与技术专门家群体。各学科门类又均有自己的理论学说，当然更多的是经验性的认识，共同组构成中国古代科学技术的宏伟画卷。《中国古代科学技术史纲》正是为试图简明地勾画这幅画卷而作，共分为数学、物理与化学、天文学、地学、生物学、农学、医学、技术 8 卷，又大体从其主要著作、重要人物、理论学说、经验知识、工艺器具、机构制度以及中外交流诸层面加以描述，希望能给读者展示一个较清晰、全面的中国古代科学技术的总体面貌。

本书的作者都是年富力强的青年科学史工作者。他们多是科学史博士或硕士，已从事科学史研究多年，学有所成。他们中的大多数是中国科学院和有关高等院校科研、教学工作的骨干，在辽宁教育出版社的大力支持下，各展所长，合力撰成此书。他们用新一代科学技术史工作者的学识与眼光，对中国古代科学技术作一次新的探索与总结。应该说，这同时又是一个新的起点，在倾听广大读者意见与自我锤炼的基础上，相信将来会有更深入、更全面的研究成果问世。

今天是昨天的继续，明天是今天的延伸。整理、研究、总结丰厚的中国古代科学技术的遗产，以史为鉴，在梳理中国古代科学技术发展道路与辉煌成就的基础上，从过去科学技术发展的历程中吸取经验教训，从昔日取得的科学技术成就中提炼有益的思想与方法，对于我们更自觉、更清醒地认识与把握今天以至将来科学技术发展的方向，以及更主动、更有效地从事科学技术活动，推动中国四个现代化建设，有着重要的意义与价值。对于广大读者特别是青年读者而言，了解中国古代科学技术发展的状况，尤其是了解中国古代科学技术曾经在相当长的历史时期中居于世界的前列，并为世界文明的发展作出过重要贡献的事实，无疑将有助于提高民族自尊心与自信心，以期同心同德，再创中华民族新的辉煌。我们向广大读者恭敬地献上《中国古代科学技术史纲》，希望

它能对您有所助益。

中国古代科学技术史纲理化卷

有关著作

《墨经》

《墨经》是先秦古籍《墨子》的一部分。《墨子》在《汉书·艺文志》里，记有七十一篇，《隋书·经籍志》里记有十五卷，目一卷。宋时亡去十八篇，现存十五卷五十三篇。在现存的五十三篇中，包括有《经》上、《经》下、《经说》上、《经说》下四篇，这四篇，晋朝鲁胜称它为《墨辩》，又名《墨经》。后来人们又加上相邻的《大取》、《小取》，将这六篇合称《墨辩》。不过，科学史界所说的《墨经》，一般是指《经》上下、《经说》上下这四篇。这里也主要讨论这四篇。

《墨子》的作者及成书年代，历来众说纷纭。《墨经》是《墨子》的一部分，其编排体例及内容与《墨子》它篇又有明显不同，这样，关于《墨经》的著作年代，说法就更多。有人认为《墨经》是墨子自著；也有人认为《经》上下是墨子自著，《经说》上下是述墨子口说，有后学增补；更多的人则认为，《墨经》是墨家后学所作，是后期墨家在与别家争辩过程中，为总结论辩经验而编定的。综合这些说法，倘若《墨经》确为墨子手笔，那么它的成书年代当在公元前5世纪后半叶；倘若它是墨家后学所为，它的成书时间最晚也不会晚于战国末年，因为战国以降，墨学衰落，作为一个学派，墨家已不复存在。这样，《墨经》是公元前5世纪后半叶与前3世纪中叶之间我国先秦时代的著作，是可以肯定的。

《墨经》是中国学术史上的一大奇书，这既由于它的编排形式，更在于它的学说内容。

在形式上，《墨经》由多条组成，《经》与《说》虽然别为两篇，但内容上则一一对应，《说》对《经》逐条加以解释、阐发。因为每条经文与其相应的经说编在不同篇里，所以为便于检索阅读，经说开头标出其相应的经文中开头或关键处的一至四字，梁启超称其为“牒经标题”。标题与经说不连读。这种“牒经标题”，在古籍中唯此一家。非但如此，古人在抄写《墨经》时，因其有些条目甚短，为节约篇幅，就将帛书《墨经》分上下栏直行书写，每栏一条，先在上栏自右至左抄写到末端，再回到始端在下栏自右至左继续抄写。为防止阅读时发生混乱，在《经上》上栏末端注明“读此书旁行”（此五字在今本《墨经》中误入正文）。《墨经》问世以后，鲜有注者，直到西晋，鲁胜才首次为其作注。在注解过程中，鲁胜嫌原来的《经》、《说》分列，阅读不便，于是将《墨经》“引说就经，各附其章，疑者阙之”。可是，鲁胜的调整又引起后人不满，认为它打乱了《墨经》先秦时期分《经》上下和《经说》上下四篇的旧观，要将其重新恢复过来。在恢复过程中，抄写人不明书例，没有遵守上下栏“旁行”书写体例，而是上下栏插花抄写，抄完上栏一条，紧接着抄正对着的下栏一条。这样一来，书的内容完全打乱，鲁胜的注也佚失无存，《墨经》成了一部天书，“历千年而不能句读”。一直到了清朝，毕沅从“读此书旁行”中悟到了此书的独特编写体例，《墨经》内容才逐渐为人们所了解。后来，梁启超又指出了“牒经标题”的规律，《墨经》才慢慢为人们所读懂。之后，注者蜂起，《墨经》研究出现热潮。但由于《墨经》言辞简约，加上错乱已久，学界对《墨经》具体文字的解释，至今尚未能统一。不过，对于《墨经》的基本内容，也已经有了大致的了解。

在内容上，鲁胜曾指出：“墨子著书，作辩经以立名。”（《晋书·鲁胜传》）这是说，《墨经》主要是一本关于论辩的著作。这一评论是正确的。《墨经》的编写，主要是为了总结墨家谈辩派的论辩实践，升华他们的论辩经验，为其提供论辩武器和指导方针。在现存《墨经》中，逻辑学和认识论方面内容占比重最大，就充分体现了这一指导思想。墨家要提高论辩艺术，就不得不在名辞、概念、逻辑等方面下功夫，这样做的结果，自然就促进了科学进步。这在《墨经》中也有明显表现。另外，《墨经》还把在论辩中为阐释墨家学说而作的譬喻扩大到对自然和社会事物的定义。为在争辩中取胜，对所涉及自然现象就要有所研究，甚至要进行观察和实验。这样，《墨经》不仅包括了墨家关于认识论和逻辑学方面的研究成果，而且包含了大量自然科学知识，在先秦诸子的著作中，它在这方面表现得很突出。

对于《墨经》富含科学精神这一点，近、现代学者有比较一致的看法。梁启超在其《墨经校释·自序》中说：“在吾国古籍中，欲求与今世所谓科学精神相悬契者，《墨经》而已矣！”钱临照也说：“观《墨经》之作，《经》上乃定义(Definition)之文，……《经》下为定律(Proposition)之文，……集数百条自然现象与思想之定义与定律于一书，先秦诸子之著述中惟此《墨经》而已矣；求诸世界并世之古籍中，亦惟古希腊之少数著述始足以相埒，吁，亦盛矣。”（钱临照，“释墨经中光学力学诸条”，始发于1943年，重载于《科学史论集》，中国科技大学出版社，1987年版）

《墨经》中的科学知识，主要集中于数学、力学、光学诸方面。

《墨经》中的数学知识，充分表现了墨家高度的抽象思维能力。这里有对数学一些基本概念的定义，如对于“中”的定义，《经》上谓：“中，同长也。”《经说》上解释道：“中，自是往相若也。”这一定义适合于各类几何形体，非常准确。再如，“同长，以正相尽也。”这是对两线段相等所作的定义，十分贴切。又如对于圆的定义，《经》上定义道：“圆，一中同长也。”圆只有一个圆心，从圆心起到圆周上任何一点长度都相等。这样的定义，即使在今天看来，也无可挑剔。《墨经》的数学，主要集中于几何方面，涉及到点、线、面、方、圆等几何概念，以及几何体彼此间相互关系问题。此外，也涉及到数学其他分支，例如《经》下提到，“一少于二而多于五，说在建位。”这是对十进制值制的强调，在数学史上具有重要地位。

在力学方面，《墨经》中相关条目更多，涉及的内容也更广泛。《墨经》讨论了力的定义，讨论了运动的分类、运动和时空的关系、物质结构、应力和应变等。对圆球的运动和它的随遇平衡、轮轴和斜面的受力等都有扼要论述。书中记述了浮力，对浮体沉浸在水中的部分和浮力的关系，有大致正确的认识。该书还探讨了一些简单机械的工作原理，反映了古人在长期实践中，在应用简单机械如杠杆、滑车、轮轴、桔槔、辘轳等的过程中发展起来的力学知识。在一本书中集中讨论这么多的纯粹力学知识，这在古籍中是不多见的。

尤为值得一提的是《墨经》中的光学知识。《墨经》中涉及光学的一共有八条，对这八条，钱临照有精辟论述，他说：“这八条光学文字虽为经下八十余条中的一小部分，但八条文字的本身是经过作者缜密的考虑，把它排成一个很合乎科学意义的次序，这决不是偶然的事。这八条中第一条是述影的定义与生成。第二条说明光与影的关系。第三条则畅言光是具有直线进行的性质的，并且描写一个针孔照像匣的实验来说明它。第四条说光有反射的

性能。第五条论光和光源的关系而定影的大小。这五条论光和物和阴影的关系。从第一条影的定义起到第五条的光、物、影三者间复杂的关系为止，物理学中光学的论影的部分已完备了。从此以下就是论物和像的关系了。第六条述平面镜中物和像的关系。第七条进而述凹球面镜中物与像的关系。第八条则述凸球面镜中物与像的关系。这样光学中论像的部分也就完毕了。影论、像论有了，几何光学的基础打下了，首尾具备了。这样有条理的、完整的记载，文虽前后仅八条，寥寥数百字，确乎可称二千多年前世界上伟大光学著作。”（钱临照，“论墨经中关于形学力学和光学的知识”，《科学通报》，2卷8期，1951）

除此之外，《墨经》还包括了其他一些有关科学内容，反映了我国先秦时期所达到的科学水平，是一份研究我国古代科学，特别是物理学方面的宝贵遗产。

《淮南万毕术》

《淮南万毕术》大约成书于公元前2世纪，是我国古代有关物理、化学的重要文献。

《淮南万毕术》的作者是西汉淮南王刘安（前179—前122）所招致的淮南学派。《汉书》本传说刘安“为人好书、鼓、琴”，“辩博善为文辞”。又说他曾“招致宾客方术之士数千人，作为《内书》二十一篇，《外书》甚众，又有《中篇》八卷，言神仙、黄白之术，亦二十余万言。”这里所谓的《内书》，就是现今传世的《淮南子》（亦称《淮南鸿烈》）二十一卷。晋朝葛洪《神仙传》说淮南王“养士数千人，皆天下俊士，作《内书》二十二篇。又中篇八章，言神仙黄白之事，名为鸿宝；万毕三章，论变化之道，凡十万言。”将此与《汉书》本传对比，可见《淮南鸿宝》八卷，就是淮南王书的《中篇》，谈论的是炼丹及长生等内容。而《淮南万毕术》则是所谓的《外书》，讲谈变化之道，鲜涉神仙黄白之事。

那么，为什么要叫《万毕术》呢？“万毕”二字是什么意思？有人释为人名，不确。方以智《通雅》卷三说：“万毕，言万法毕于此也。”清儒王仁俊作《玉函山房辑佚书续编》则认为，“毕、变音近，犹言万变术耳。”这些说法，均可作为备解。

《淮南万毕术》已经失传，现存只有辑本。据《隋书·经籍志》记载，梁代有《淮南万毕经》和《淮南变化术》各一卷，这些书至隋而亡。《旧唐书·经籍志》“五行类”记有《淮南万毕术》一卷。这本书后来也散佚了。自宋以后，完整的《淮南万毕术》已不复存在，存在的只有失传前它被别的书所引用的那些内容。

有散失就有辑佚。唐代马总撰有《意林》一书，内容各版本不尽相同，在身价颇高的“聚珍版”中收有《淮南万毕术》一卷，这大概是现在所能见到的最早的该书了。不过，名为一卷，也只得一百多字，辑得很不完全。元末陶宗仪依据大量材料，编成《说郛》一书，其中也收有《淮南万毕术》，但篇幅也不长，大概只有二十余条。到了清代，出现了由孙冯翼、茆泮林、黄奭、王仁俊、叶德辉等人整理的各种辑本的《淮南万毕术》。经过这些学问家的一番爬梳，《淮南万毕术》散布在其他书籍中的一些片言只语，大致被搜罗得差不多了。即使如此，现在的辑本也不过百把条几千字，与原来十万言的篇幅，相去甚远。

从现存内容来看，《淮南万毕术》主要是谈论各种各样的变化，包括人为的和自然的变化。该书在谈论这些变化时有一种倾向，它力图通过人为的努力，实现那些看上去与常情相悖的变化。这是人类求知心理的自然表现。正是这一表现，使我们对于淮南学派所做过的一些科学探索能够有所了解。

例如，该书关于冰透镜取火的记载：“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”要取火，习惯上用加热法，这里却偏偏通过冰来实现。这一记载并非异想天开，清代光学家郑复光已经用模拟实验证明，用冰透镜取火是可行的。而且这一条明确提及了透镜聚焦性质，这也是有价值的。

再如，该书提到了人工制冰实验：“取沸汤置瓮中，密以新缣，沈中三日成冰。”沈中，指沉于井中。制冰需要低温，但淮南学派却偏要“以沸汤置瓮中”，用热水造冰，这是与常识相悖的。那么，这条记载究竟有没有一点道理呢？李志超对之做过分析（参见李志超的文章：“《淮南万毕术》的

物理学史价值”，全国物理学史、冶金史讨论会论文，1993年10月，南阳）。他认为，缣是细密的丝织品，沾足了水有一定的隔气性。一个细口大腹的瓶（瓮），里面盛水不多，煮沸一段时间，水蒸汽充满全瓶，原来的空气基本上被挤了出去，烧到水量所剩无几，立即用细密的织物封口并沉入深井。瓶子一凉，水汽凝结，瓶内气压大降。待瓶温与井水近于平衡，立即取出，则缣开始透气（水膜逐渐晾干，加之内外压力悬殊）。这可近似视为一种绝热膨胀过程，根据焦耳—汤姆孙效应，气体绝热膨胀要吸收热量，这样，瓶温将因此下降。即是说，根据《淮南万毕术》的记载，是可以实现使瓶内温度低于环境温度的。据此，李志超指导研究生赵虹君作了粗略的模拟实验，实验中用玻璃球形瓶代替了瓮，瓶口用橡皮塞密封，塞上穿有直到瓶底的玻璃管，瓶内放温度计，管外端用橡胶软管接长，软管上装一可调松紧的夹子。实验时，放松夹子，加热球瓶使水沸腾，直到所剩刚好没过管口，然后夹紧胶管，将瓶子放入水中冷却。在冷却到接近水温时，把瓶子拿出，然后缓缓放松夹子放气入瓶。放气结束时，虽然没有得到冰，瓶内水温却较冷水温度下降了1—2度。这表明《淮南万毕术》的记载并非一无所据。他们是否制得了冰，还难以断定，但他们应该有做过实验，而且收到了降温效果。

古人在谈论磁现象时，一般重视的是磁石相引，《淮南万毕术》却别出心裁设计了一套磁石相拒的实验。该书记载说：“取鸡血与作针磨铁捣之，以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相拒不休。”这一条的价值在于，在此之前人们只发现磁的相吸，而本条则明确提到磁的相斥，这显然是一个进步。另外，这条记载也反映了当时人们制作人工磁体的尝试。对此，李志超认为（参考文献同上）：“作针磨铁”，即磨针铁，经常在一个方向上磨，就有磁化。这种铁硬度高，质脆，易捣碎。捣碎后形成人工永磁体细粒，将其和在鸡血中，涂在天然磁石外面，开始时粘度不大，颗粒可以自动取向，互相的磁矩平行加强，总体成一大磁体。过一段时间鸡血凝固，就不会变回去了。多次涂抹令其近于完善的球形，这就有点像当时的弹棋了。把很多这种棋子一下子撒开在棋局上，形成多体相互作用，棋子间彼此牵制，“相拒不休”，要经历一段比较长的时间才能稳定下来。这种情形，也已经被现代所制的塑料磁性球模拟实验所证实。

钢铁质重，入水即沉，这在汉代已是常识，但《淮南万毕术》作者却敏锐地发现了一种让铁针漂浮在水面上的方法，这就是该书“首泽浮针”条的记载。该条说：“取头中垢，塞针孔，置水中，则浮。以肥膩故也。”这一条，是对水的表面张力的巧妙应用。这种实验在今天已经不新鲜了。

具有类似性质的条目还有一些，这里姑且从略。

除了这些具有科学探索性质的条目以外，《淮南万毕术》中还有一些条目属于对当时已知科技知识的记载。例如关于丹砂升炼水银的记述：“朱沙为瀕”，朱沙即丹砂，瀕为汞的异体字；关于油类自燃：“积油满万石，则自然生火”；关于透镜取火：“取火法，如用珠取火，多有说，此未试”；对于化学上置换反应的涉及：“白青得铁，即化为铜”。如此等等，不一而足。

《淮南万毕术》中还有一些记载，具有一定的实用价值。例如该书关于酿酒过程中提高发酵温度技术的记述即是如此。该条说：“凡冬月酿酒，中冷不发者，以瓦瓶盛热汤，坚塞口，又于釜汤中煮瓶，令极热，引出著酒瓮中，须臾即发。”这一条所含的道理，是显而易见的。

必须指出的是，《淮南万毕术》决非一部严格意义上的科学著作，它包含了古人的观察实验所得，更采纳了他们的想象推理所及。而且淮南学派在撰写这部书时，并没有对这二者进行明确区分，他们往往将其想象描写成为真实，这就带来了混乱。在前引诸条目中，我们对《淮南万毕术》的这种风格，已经有所窥及了。

更突出的是，《淮南万毕术》把这种想象推向了社会生活的诸多方面，从而出现了让现代人看上去感觉荒唐的条目。例如它写道：“蜘蛛涂足，不用桥梁。”这是说将蜘蛛打死后，以其汁涂足，就可以涉水不没。又说，“磁石悬入井，亡人自归”；“埋石四堦，家无鬼”；“蟹漆相合，成为神仙”；“滕蛇听而有孕，白鹭视而有胎”，等等。这类东西，在《淮南万毕术》中所占比重并不小。

对《淮南万毕术》中的不实之处，人们很早就有所发现。据《汉书·刘向传》记载，“淮南有枕中、鸿宝、苑秘书，言神仙使鬼物为黄金之术及邹衍重道延命方，世人莫见。”“枕中”，指《淮南枕中记》；“鸿宝”已有提及，为淮南王书的中篇；“苑秘”即“万毕”，乃为一音之转。这三种书世上少见，刘向的父亲“治淮南狱，得其书”，刘向“幼而诵读，以为奇”，后来他把它献给皇帝，以为进身之阶。皇帝“令典尚方铸作，事费甚多，方不验。”这里的“不验”，除了人工制作黄金之术以外，也包括《淮南万毕术》的有关记载。为了这件事，刘向差点掉了脑袋。可见，对于这类书籍中的虚幻成分，人们当时已经有所检验。我们今天使用这部书时，同样需要以科学的态度，经过充分的分析、甄别，发掘其科学内容，抛弃其荒唐成分，才能真正发挥它的史料作用。

《论衡》

《论衡》是东汉学者王充（27—97年）撰写的一部重要著作。

王充字仲任，会稽上虞人。他出身“细族孤门”，自幼好学，成年后曾赴京师洛阳，入太学，拜儒学大家班彪为师。中年在县、郡皆任功曹小吏，入州为从事、治中诸官。晚年辞官居家，专门从事著述。他的家境清寒，辞官后竟至“贫无供养”。在这种情况下，他仍然著述不辍，“居贫贱而志不倦”，追求“声与日月并彰”，“文与扬雄为双”。他一生撰写了《论衡》、《讥俗节义》、《政务》、《养性》等著作。《论衡》是其代表作，其余皆已失传。

王充生活的东汉时期，社会上讖纬盛行，人们利用图讖决定一切。思想界则流行神学目的论，认为地上万事万物都是上天有意识创造安排的。王充对这些社会思潮进行了认真的思考，认为它们都是一些“虚妄之言”，需要予以揭露、批判。在《论衡》书中，他介绍自己的写作动机道：“伤伪书俗文，多不实诚，故为《论衡》之书。”（《自纪篇》）“是故《论衡》之造也，起众书并失实、虚妄之言，胜真美也。”（《对作篇》）正是在这一思想指导下，他撰写了《论衡》这一不朽著作。

《论衡》现存目八十五篇，其中《招致》有目无书，实为八十四篇。因此，它已非完书。而且，据学者研究，《论衡》原来的篇目恐还不止这八十五篇。不过，现存的八十四篇涵括了《论衡》的主要内容，这是可以肯定的。

从《论衡》现存内容来看，王充很好地实现了他的写作目的。他在书中对讖纬迷信及神学目的论等虚妄失实之言，做了痛快淋漓的批判。《论衡》的问世，为东汉思想界吹进了一股清新之风。

由于家境贫寒，地位不高，加上《论衡》所具有的尖锐批判精神，王充在世时，这部书并未在社会上广泛流行，它只是在江南一些士大夫手中传阅。据《后汉书·王充传》注语所载，“充所作《论衡》，中土未有传者。蔡邕入吴始得之，恒秘玩以为谈助。其后王朗为会稽太守，又得其书，及还许下，时人称其才进。或曰：不见异人，当得异书。问之，果以《论衡》之益。由是遂见传焉。”中土，指中原地区。这段话告诉我们，《论衡》以其本身的价值，终于传入中原地区，进入了当时社会的政治、文化中心。该段注文接下去的一段话，更是绘声绘色描写了《论衡》刚被中原地区文人所接触的情形：“时人嫌蔡邕得异书，或搜求其帐中隐处，果得《论衡》，抱数卷持去。邕丁宁之曰：唯我与尔共之，勿广也。”透过这些描写，我们可以窥见《论衡》在当时知识分子心目中的地位。

不过，由于《论衡》中有《问孔》、《刺孟》诸篇，加之《论衡》中一些内容也对统治阶级表现得颇为不敬，在长达近两千年的封建社会，《论衡》一直处于被冷落状态。它所具有的极大价值，也只有到了今天，才获得了比较清晰的认识。

《论衡》在哲学史、思想史、文化史等诸多领域中，都具有重要地位。在科学史上，它也同样据有自己应有的一席之地。

王充要“疾虚妄”、“扬真美”，而展现在他面前的众多的“伪书俗文”、“虚妄之言”，有许多是对自然现象的解说。当时自然科学不发达，这使得神学目的论容易在这一领域泛滥。王充要对之加以批驳，就必须钻研有关自然科学问题，这使得《论衡》一书包含了大量自然科学知识，为后人了解汉

代人们科学思维水平，提供了珍贵的史料依据。

《论衡》中的科学知识范围很广，天文、数学、农学、生物、地理、医学、物理、化学等诸多学科均有涉及。中国科学史上一些重要发明，就是赖《论衡》的记述才为今人所知。例如，关于司南的描写，即是如此。在中国古籍中，“司南”这一名词出现时间很早，在战国末年成书的《韩非子·有度》中，即有“故先王立司南，以端朝夕”的记载。但司南究竟是什么，如何使用，这句话并未告诉我们。而在《论衡》的《是应篇》中，我们却可以找到相应的解答：“司南之杓，投之于地，其柢指南。”“杓”是勺子，“地”指中央光滑的地盘，“柢”指勺的长柄。做成勺子式样的司南，放置在坚硬光滑的“地盘”上，它的长柄会自动指向南方。这样的“司南”，只能是一种磁性指向器。这种解说，已为学界大多数人所接受。而正是由于《论衡》的记载，人们对司南的本质才能做出自己的判断。

再如，《率性篇》中关于人工珠玉熔炼的记载：“道人消炼五石，作五色之玉，比之真玉，光不殊别。”“随侯以药作珠，精耀如真。”很多人认为这是中国冶炼玻璃的最早文献记载，此说虽不可必，但至少我们可以说它是中国最早有关人工冶炼珠玉的清晰记载，即此已弥足珍贵。

又如，《率性篇》中还提到：阳燧“磨砺生光，仰以向日，则火来至”，而“刀剑之钩月，摩拭朗白，仰以向日，亦得火焉”。这一记述反映了当时人们的认识：不仅仅是阳燧可以向日取火，具有一定形状和光亮度的反射曲面，也可以向日取火。这在某种程度上打破了古人赋予阳燧取火的神秘性。

《论衡》中这类记述很多，但它的成就并不仅仅表现在这些记述上，王充自己关于自然科学一些问题的见解，也同样十分精彩。例如，在《书虚篇》中，他关于潮汐现象的解释，就是如此。在王充以前，人们已经注意到潮汐的周期性涨落现象，而王充的贡献则在于他明确把这一周期性同月亮的盈亏变化相联系，提出“涛之起也，随月盛衰，大小满损不齐同。”这一天才的猜测，开了后世月生潮汐论的发展的先声。

除此之外，他对钱塘江大潮形成原因的解说、对云雨形成的自然机制的探索、对声音波动性的认识、对雷电成因的猜测、对日出入和日中时日轮大小差异的说明，乃至对天雨谷现象的阐发、对昆虫生长条件和生活史的考察、……等等，都是富有独创性的。

《论衡》也充分表现了王充的哲学思想，他用元气自然论来说明世界万事万物的存在及有关自然现象，对神学目的论做了有力批驳。当然，元气自然论只是一种思辨的、朴素的科学形态，它比起王充的一些具体科学见解，还有些粗疏。但无论如何，它比之神学目的论是一种历史进步，这是应予承认的。

《论衡》不是一本纯粹的科学著作，这使得它所包含的科学知识显得比较分散，不成体系。另外，王充的思想方法也有一定的片面性，这使得他在一些科学问题上也有错误，甚至落后于同时代人的见解。例如，他认为地是有形质的实体，天也应该如此；地是平正的，天也应该平正。他甚至认为“日月不圆”，反对“日食，月掩日光”这样的正确认识，等等。不过，这些内容在《论衡》中只占很小比重，就总体而言，《论衡》作为一本反映汉代科学思维水平的著作，是有其不朽的历史价值的。

《周易参同契》

《周易参同契》，炼丹著作，旧题东汉魏伯阳撰。魏伯阳为会稽上虞（今属浙江）人，生平不详，所有正史均未提及。葛洪《神仙传》载有他进山修炼、服丹成仙的传说，并说他“作《参同契》、《五相类》凡三卷”，可见魏伯阳是以炼丹家身分显现于历史上的。在《周易参同契》末尾，魏伯阳以自叙口气略述了他的生平：“邕国鄙夫，幽谷朽生。挟怀朴素，不落权荣。栖迟僻陋，忽略令名。执守恬淡，希时安平。远客燕闲，乃撰斯文。”寥寥数语，反映了他淡泊名利、不爱荣耀、隐居从道、潜默修真的形象。正是这样一位甘于淡泊的炼丹家，对于写作《周易参同契》这一不朽的炼丹名著作出了卓越贡献。

魏伯阳并非《周易参同契》的唯一作者。《参同契》一书由四言句、五言句、散文体等不同的文体组成，各文体在内容上有相互矛盾之处，这不像是一人所为。《参同契》原书已佚，在现存各种注本中，以五代后蜀彭晓的《周易参同契通真义》最为流行。彭本的序言说：“真人魏伯阳者，会稽上虞人也。……得古文《龙虎经》，尽获妙旨，乃约《周易》，撰《参同契》三篇。……密示青州徐从事，徐乃隐名而注之。至东汉孝桓帝时，公复传授于同郡淳于叔通，遂行于世。”这个序言告诉我们魏伯阳的生活年代，认为他活动于汉桓帝时期，大致是公元2世纪左右的一位炼丹家。他以《周易》为指导，撰《周易参同契》一书，并把它传授给青州徐从事、会稽淳于叔通。该书由此流布于世。

但是，今人陈国符、孟乃昌以不同的方法，分别考证出容字号无名氏注及署名阴长生注的两种《周易参同契》文本为唐本，比彭晓本更早。而容、阴本的序言都肯定徐从事的年代早于魏伯阳。例如阴本之序云：“盖闻《参同契》者，是古《龙虎上经》，本出徐真人。徐真人，青州从事，北海人也。后因越上虞人魏伯阳造《五相类》以解前篇，遂改为《参同契》。更有淳于叔通，补续其类，取象三才，乃为三卷。叔通亲事徐君。”这是说，《周易参同契》本出于徐从事之手，魏伯阳、淳于叔通又分别对之做了增改。即徐从事在前，魏伯阳和淳于叔通在后。因为在《周易参同契》通行本正文最后“委时去害，依托丘山”以下共六十六字组成一隐语，内隐“魏伯阳著”四字，可知四言句为魏伯阳著无疑。因魏晚于徐，故五言句应为徐从事所著。五言句为原出，为经；四言句属释义，为传注。这种理解与彭晓本的说法显然不同。不管哪种说法成立，《周易参同契》成书于东汉年间，这是可以肯定的。魏伯阳对于本书的写作作出了很大贡献，这也是可以肯定的。

《周易参同契》是世界现存最早的炼丹著作之一。自唐宋以来，深受道家重视。被称为南宋初祖的张伯端在《悟真篇》誉其为“万古丹经王”。该书的注解本多达二十余种，在《四库全书》中就收入了六种，在《道藏》中则收入了十一种。在这些注本中，最流行的是彭晓的《周易参同契通真义》，最详尽的是宋末元初俞琰的《周易参同契发挥》，而最有名的则首推理学家朱熹的《周易参同契考异》。正是因为朱熹的注解校勘，再加上名炼丹家陈致虚、陈显微等人的推荐，《周易参同契》终于登上了道家“圣经”的宝座。

那么，书名为什么叫“周易参同契”呢？历史上众说纷纭。容字号无名氏注本的序言解释说：“周者，乃常道也；易者，变改之义。言造大还丹、运火皆用一周天，故曰周易者。……参者，杂也；杂其水、土、金三物也。

同为一家，如符若契，契其一体，故曰参同契。”对“周易”二字作如此解释，令人难以接受。而后三字之释却为彭晓、朱熹所用，已成定论。虽然如此，与何相“参”？与谁相“同”？与什么相“契”？后世学者对之依然争论不休，每人都有自己的理解。这些理解究竟哪一个更准确，恐怕谁也说不清。

其实，要理解一本书，除了看它的名称以外，更重要的是看它的内容。

《周易参同契》是炼丹著作，从化学史角度来看，我们更关心的是它所反映的当时人们发现的化学现象和掌握的化学知识。这方面《周易参同契》确有不少值得称道之处，举例如下：

1. 黄金性质稳定，不易氧化，《参同契》中描述，“金入于猛火，色不夺精光。”“金性不败朽，故为万物宝”。

2. 关于铅的化学反应，《参同契》中有这样的记载，“胡粉投火中，色坏还为铅。”胡粉是指碱性碳酸铅，在火中先分解成氧化铅，然后被还原成金属铅。

3. 关于汞的化学性质，《参同契》中有十分精彩的描述：“河上姹女，灵而最神，得火则飞，不见埃尘，鬼隐龙匿，莫知所存。将欲制之，黄芽为根。”将水银比喻为活泼而又神秘的少女，用火加热就会“飞”走，不留痕迹。可见，东汉时期的魏伯阳不仅知道水银沸点低、易挥发成气体，而且已经掌握了用黄芽来制服会飞的水银。什么是黄芽呢？张子高、曹元宇、袁翰青及大多数化学史家认为是硫黄；孟乃昌认为是金属铅；黄素封认为是黄金。赵匡华则通过相应的模拟实验认为黄芽应是氧化铅。

4. 关于汞齐，《周易参同契》中有详尽的描述，“太阳流珠，常欲去人。卒得金华，转而相因，化为白液，凝而至坚。金华先唱，有倾之间，解化为水。”这里的太阳流珠显然是指具有耀眼光泽、易形成流动珠子的水银，而“金华”是何物？黄素封认为是泛指金属，冯家昇认为是指银，孟乃昌则认为是指铅。《参同契》还记载了丹砂与金属共同加热时的变化，“丹砂木精，得金乃并，金水相处。”这就是说，硫化汞加热分解后产生的汞，与金属化合生成汞齐。

5. 魏伯阳已经初步认识到物质间的化合反应是按一定的比例进行的。《周易参同契》是这样写的，“以金为提防，水入乃优游。金计有十五，水数亦如之。临炉定铢两，五分水有余，二者以为真，金重如本初。其三遂不入，火二与之俱。三物相含受，变化状若神，下有太阳气，伏蒸须臾间，先液而后凝。”孟乃昌认为，这里的金是指铅，水是指水银，铅与汞形成汞齐的比例是5:2。黄素封认为，汞齐的成分是黄金与水银，其比例是2:3。而李俊甫则认为，金是指铅，水是指水银，铅与水银形成的汞齐比例是1:2。

《周易参同契》还对炼丹使用的设备进行了描述，如“旁有垣阙，状似蓬壶，环匝关闭，四通蜘蛛，守御密固，阙绝奸邪，曲阁相通，以戒不虞。”孟乃昌认为，“这种仪器很像后来的蒸馏器的雏型，或者就是一种蒸馏器的改装。”

《周易参同契》书末载有一首“鼎器歌”，以诗歌的形式描述了鼎器的形状和尺寸，“圆三五，寸一分，口四八，两寸唇，长尺二，厚薄均，腹齐三，坐垂温，阴在上，阳下奔。”这是一种上大下小、底部圆形的三脚丹鼎器，顶部可冷却，而使炼丹升华物遇冷凝结，成珠下滴。

出于保密的缘故，《周易参同契》中有不少隐语，令人费解，直到今天，

还有很多问题需要进一步的研究和考证。但不管怎样，《周易参同契》中蕴含的化学知识及其化学成就是举世公认的。早在 1932 年，《周易参同契》一书就被全部译成英文，刊登在最权威的科学史杂志《Isis》上。

（孙毅霖）

《物理论》

《物理论》为三国时期吴国杨泉所著，是中国历史上第一部以“物理”作为书名的学术著作。

杨泉字德渊，他的生卒年代，已无明文可查。关于他的事迹，记载的也很少，只知道他是吴国的处士，晋太康元年（280年）吴国灭亡，入晋，会稽相朱则曾推荐他为官，征为侍中，但未就职。他是吴、晋间一位隐士，可能是终身从事著述。

杨泉著作大都散佚。据史志记载，他有《物理论》十六卷、《太元经》十四卷、《杨泉集》二卷。在这几种著作中，《物理论》仅存几种辑本，是原书的一小部分。《太元经》亦称《太玄经》，新旧《唐书·艺文志》记载曾有刘辑为之作注，唐以后佚失。《杨泉集》也早已佚失，所剩仅有《五湖赋》和《织机赋》两篇。

关于《物理论》，清孙星衍有辑本。不过，该辑本把晋代傅玄所著《傅子》的某些佚文也收进去了。这个错误被严可均发现了。清儒黄奭、严可均、王仁俊、叶德辉等均有辑本。这些辑本，是了解杨泉思想的主要依据。

从现存辑本来看，《物理论》是杨泉研究和评论当时有关天文、地理、工艺、农业、医学等知识的一部著作。古人对“物理”这一概念的理解，本来也就包含了如此诸多内容，我们不可以今天“物理学”的概念去理解杨泉的《物理论》。

《物理论》的主要价值在于它的科学思想。从自然观角度来看，杨泉是气一元论者，他主张元气弥漫宇宙之间，说“元气皓大，则称皓天。皓天，元气也，皓然而已，无他物也。”弥漫天地间的元气构成了宇宙万物，例如冬夏昼夜长短变化，是气的阴阳推移所致：“夏则阳盛阴衰，故昼长夜短；冬则阴盛阳衰，故昼短夜长：气之引也。”狂风怒号，是气的激发运动：“气积自然，怒则飞沙扬砾，发屋拔树；喜则不摇枝动草，顺物布气；天下之性，自然之理也。”山川陵岳，则因气而成体：“地形有高下，气有刚柔，物有巨细，味有甘苦，镇之以五岳，积之以丘陵，播之以四渎，流之以四川，盖气自然之体也。”总而言之，气构成了天地间的一切。气本身具有刚柔阴阳等不同性质，由此导致了千变万化的自然现象。自然现象的形成和变化是元气自然积聚运动的结果，没有超自然的东西使它们如此。这种观点，是继王充之后对神学目的论的又一次冲击，对于人们解放思想很有裨益。

元气是构成宇宙万物的基本材料，那么，元气本身又是从哪里来的？杨泉认为，元气来源于水，水是万物之源。他说：

“所以立天地者，水也。夫水，地之本也，吐元气，发日月，经星辰，皆由水而兴。”

这是继《管子》之后，水为万物之原思想的再度出现。

《物理论》中还含有很强的无神论思想。杨泉明确反对神鬼之说，他认为：

“人含气而生，精尽而死。死，犹渐也，灭也。譬如火焉，薪尽而火灭，则无光矣。”

这种主张是神灭论的先驱，对后世范缜的神灭论有很大影响。

除了科学思想方面的见解以外，对于一些具体科学问题，杨泉也表达了自己的意见。例如，在他生活的时代，天文学上盖天说和浑天说正处于激烈

的论争之中，盖天说认为天在上，地在下，天似盖笠，在地上旋转；浑天说则主张天似圆球，天包着地，绕地旋转。杨泉也投入了这场关于天体论的争论，他认为浑盖两说都不能成立，他说：

“夫地有形而天无体，譬如灰焉，烟在上，灰在下也。浑天说天，言天如车轮，而日月旦从上过，夜从下过，故得出卯入酉；或以斗极难之，故作盖天，言天左转，日月不行，皆缘边为道。就浑天之说，则斗极不正；若用盖天，则日月出入不定。夫天，元气也，皓然而已，无他物焉。”

杨泉的主张可归为宣夜说范围。他提出的“地有形而天无体”，“夫天，元气也，皓然而已，无他物焉”，比之浑天说和盖天说，更接近于现代科学的认识。

其他方面，他也有自己明确的见解，例如关于脑力劳动与寿命之关系：

“智慧多则引血气，如灯火之于脂膏。炷大而明，明则膏消；炷小而暗，暗则膏息，息则能长久也。”

这种观点，有些片面，不过，它也包含了某种合理成分。

再如，关于饮食与养生关系，他说：

“谷气胜元气，其人肥而不寿；元气胜谷气，其人瘦而寿。养生之术，常使谷气少，则病不生矣。”

这段话，现代养生家们还是比较赞成的。

在讨论科学问题时，《物理论》也有不可取之处。例如它在谈论天体时说：

“斗极，天之中也。言天者必拟之人，故自脐以下，人之阴也；自极以北，天之阴也。”

把人和天进行简单机械比附，是传统天人相应学说向庸俗化方向的发展。杨泉没有摆脱这一学说的影响。

《物理论》原有十六卷，现仅存辑本一卷，使我们难以窥见杨泉思想的全部面貌。不过，仅从现存内容来看，杨泉也当之无愧是当时一位重要思想家。

《抱朴子》

《抱朴子》，西晋葛洪所著，是中国炼丹史上一部承前启后的重要著作。

葛洪（283—363年），字稚川，号抱朴子，丹阳句容（今属江苏省）人，出身于官宦之家。他十三岁丧父，家境衰落，仍不废诵读。十六岁开始博览经史、老庄诸子之书，探求“神仙导养之法”及“三元”、“遁甲”之术。二十岁以后，曾任参军事小官。石冰起义后，葛洪被荐为将兵都尉，随军征伐。东晋王朝建立后，追叙军功，封葛洪为关内侯。此后朝廷一再封赐，但他志在炼丹求道，皆辞而不受。葛洪曾拜炼丹家郑隐、鲍玄为师，学得炼丹之术，晚年于罗浮山炼丹著述，成为当时金丹道的始祖，81岁无疾而终。

葛洪一生著述很多，《晋书》本传说他“博闻深洽，江左绝伦，著述篇章，富于班马。”认为他的著作比班固和司马迁还要多。此并非虚言，据史志著录，他的著作约七十余种，他在其《抱朴子·自序》中说：“凡著《内篇》二十卷，《外篇》五十卷，碑颂诗赋百卷，军书檄移章表笺记三十卷，又撰俗所不列者为《神仙传》十卷，又撰高尚不仕者为《隐逸传》十卷，又抄五经、七史、百家之言，兵事方伎短杂奇要三百一十卷，别有目录。”他的著作之多，由此可见一斑。

在葛洪众多著述之中，《抱朴子》是其流传至今的代表作之一。该书由《内篇》二十卷、《外篇》五十卷两部分组成。《内篇》主要论述战国以来神仙家的理论、炼丹方法，阐释他自己关于长生术的见解和实践等，是我国现存年代较早而又比较完整的一部炼丹术著作。《外篇》则为政论性著作，表达的是葛洪的社会政治主张和思想。科学史界一般对《内篇》要更重视些。

炼丹术的发展，到葛洪时，已经有了几百年的历史。当时的炼丹术，以追求长生为目的。人们追求长生成仙，最早是在自然界寻找所谓的长生不老药，后来演化成为人工冶炼金丹，希望通过服食丹药达到长生成仙之目的。可是，服食丹药能否长生？仙人究竟是否存在？对于这些问题，炼丹家们虽然也曾有人谈论，但这些谈论从来都缺乏系统性和理论性，是葛洪在《抱朴子》中首次对长生成仙的可能性和现实性作了认真系统的“论证”。他的论证当然不能成立，但透过他的论证，我们可以窥见道家在这一问题上的思维方式。另外，葛洪在论证过程中，记述了一些具体的炼丹方法，他对金银和丹药炼制的记述，集汉、魏以来炼丹术之大成。这些记述，对于我们了解当时人们所具有的化学知识，是十分有益的。

《抱朴子》对长生成仙可能性的论证，在方法上并非全属荒唐不稽。葛洪虽然认为仙人可成，但他在论证过程中，并没有借助所谓至高无上造物主的作用。他认为，万物在其形成过程中，并没有所谓一成不变的先天命定。

《抱朴子·内篇·论仙》指出：

“若谓受气皆有一定，则雉之为蜃，雀之为蛤，壤虫假翼，川蛙翻飞，水蛭为蛤，苻苓为蛆，田鼠为鴛，腐草为萤，鼯之为虎，蛇之为龙，皆不然乎？”这里所列举的这些物种转化例子，基本上不能成立。但在当时，人们是普遍相信这套学说的，这是由于受到当时科学发展水平的限制的缘故。

对于一般物种，没有一成不变，对于人，也同样如此：

“若谓人禀正性，不同凡物，皇天赋命，无有彼此，则牛哀成虎，楚姬为鼯，枝离为柳，秦女为石，死而更生，男女易形。老彭之寿，殇子之夭，其何故哉？苟有不同，则其异有何限乎？”

这里也是以传闻为立论依据。不过这些传闻，在当时人看来，是实有其事的。由这段话可知，人既然不是先天命定，而是后天可变的，那么，就有可能通过后天的修炼，延长寿命，乃至长生：

“若夫仙人，以药物养身，以求数延命，使内疾不生，外患不入，虽久视不死，而旧身不改。苟有其道，无以为难也。”

显然，《抱朴子》的这种论证，完全是从物质变化角度出发，认为人通过自己的后天努力，可以养身延命，进而达到长生。这一论证过程，没有为上帝留下位置。这一论证过程的内核是合理的，科学进步已经越来越证实了这一点。葛洪的错误在于对之作无限外推，由人可以通过自己努力延长寿命推出了长生可得的结论，这就不能成立了。

那么，如何才能做到长生不老呢？按葛洪的说法是要“以药物养身，以术数延命”。问题的关键在于要服用什么样的药物，《抱朴子·内篇·金丹》指出，只有服食金丹、黄金才能成仙，达到长生不老之目的。原因在于：

“夫金丹之为物，烧之愈久，变化愈妙。黄金入火，百炼不消，埋之毕天不朽。服此二物，炼人身体，故能令人不老不死。此盖假求于外物以自坚固。”

这段话表明，葛洪长生术的理论依据可以归结为“物性转移”说。金丹在烧炼过程中会有变化，其特点是“烧之愈久，变化愈妙”，而黄金则性能稳定，“百炼不消”，与天地同寿。人如果服食这两种东西，吸取其精华，把它们的这些性能转移到自己身上，就能做到不老不死。

这段话，是炼丹家的基本思想，它有其一定的物质基础。因为在自然界以及人为的化学反应中，物性的确会发生变化、转移。但这些变化、转移需要一定条件，葛洪的错误在于他忽略了条件和可能性，进行了不恰当的类比，从而得出了服食金丹、黄金即可长生这一错误结论。

葛洪认为，要想长生，除了服食丹药以外，还要“以术数延命”。他在其《抱朴子·内篇·至理》卷中说：

“服药虽为长生之本，若能兼行气者，其益甚速。若不能得药，但行气而尽其理者，亦得数百岁。然又宜知房中之术，所以尔者，不知阴阳之术，屡为劳损，则行气难得力也。”他把服食金丹、导引行气、房中之术列为长生之道的三大要素，这对后世影响很大，中国古代长生术的诸多流派，几乎都可以归结于这三者之中。《抱朴子》的地位，由此可见一斑。

《抱朴子》的价值并不仅仅在于它从理论上“论证”了长生术的可能性，它记载的炼丹术中所反映的化学知识，是中国化学史的重要研究对象。另外，《抱朴子》还广泛涉及到药物学和医学，记录了大量矿物、植物药，它对一些疾病成因和治疗的论述，也非常深刻。《抱朴子》对于研究葛洪的哲学思想、社会政治思想等，也都具有极为重要的参考价值。这本书受到学术界的重视，是理所当然的。

《化书》

《化书》，亦名《谭子化书》，是五代时期南唐（937—975年）道士谭峭所著的一部谈论万事万物变化的书。

谭峭，字景升，福建泉州人，大约生活于唐朝末年（860—907年）至五代（907—990年）期间。其父名洙，曾任唐朝国子司业。谭峭自幼聪敏，博涉经史，又喜爱道术，曾拜嵩山道士为师，得所谓辟谷养气之术，道家称其为紫霄真人。谭峭颇有道术，在福建时，闽王王昶尊他为正一先生。闽亡后，他隐居庐山栖隐洞，从学者百余人。南唐政权对他也很器重，赐号金门羽客，并欲授予官职，他推辞不受，隐居而终。

《化书》是谭峭在终南山修道时所著。谭峭游历建康（今江苏南京）时，见到南唐大臣宋齐丘，将此书传授于他。宋齐丘遂窃为己作，并对之有所增改。故该书又名《齐丘子》。后来此事得到甄别，本书才恢复它应有的名字《谭子化书》，亦名《谭峭化书》，简称《化书》。

《化书》一共六卷，依次为道化、术化、德化、仁化、食化、俭化，主要内容为讲论万事万物的变化之道，其中包含有相当丰富的科技知识和十分杰出的科学见解。下面我们略举数例以为说明。

卷一“环舞”条：

“作环舞者，宫室皆转；瞰回流者，头目自旋：非宫室之幻惑也，而人自惑之；非回流之改变也，而人自变之。”

这条涉及力学上运动相对性问题。要判定物体的运动状态，必须首先选定所用的参照系，对于不同的参照系，同一物体有不同的运动状态。本条谈论的就是这一原理的一些具体例子。

卷二“转舟”条：

“转万斛之舟者，由一寻之木；发千钧之弩者，由一寸之机；一目可以观大天，一人可以君兆民，太虚茫茫而有涯，太上浩浩而有家，得天地之纲，知阴阳之房，见精神之藏，则数可以夺，命可以活，天地可以反覆。”

这一条在科学思想史上十分重要，它反映了一种机发思想，认为在事物运动过程中，有一种微小而居于枢要位置的因素，操纵这个因素，就可以控制整个物体的运动。这段话表现了道士们面对自然奋发有为的进取精神。

卷二“声气”条：

“气由声也，声由气也，气动则声发，声发则气振，气振则风行而万物变化也。”

这一条讨论声音的发生和传播，明确提出声音的发生和传播与空气的振动分不开。这是中国声学史应予重视的一条史料。

卷一“大含”：

“形气相乖而成声。耳非听声也，而声自投之；谷非应响也，而响自满之。耳，小窍也；谷，大窍也；山泽，小谷也；天地，大谷也。一窍鸣，万窍皆鸣；一谷闻，万谷皆闻：声导气，气导神，神导虚，虚含神，神含气，气含声，相导相含，虽秋蚊之翾翾，苍蝇之营营，无所不至也。”

这一条谈论声音信息分布的弥散性，以为“声导气”，“气含声，相导相含”，因此声音信息弥散分布于天地之间。这种认识有一定道理，因为声音的本质是一种波动，波的衍射特性决定了它的分布必然是弥散的。当然，这种弥散分布不是平均分布，它存在量上的非均衡衰减。谭峭能提出声音的弥散分布

特征，亦属难得。他在卷一“游云”条中提出：“太虚之中，无所不有；万跃之内，无所不见”，则又涉及到了形象信息的弥散分布特征。

在光学方面，《化书》多有可提及之处。例如卷一“形影”条说：

“以一镜照形，以余镜照影，镜镜相照，影影相传，不变冠剑之状，不夺黼黻之色。是形也，与影无殊；是影也，与形无异。”这一条记述几何光学复镜成像，且明确指出后面的镜子是以前面镜子中的像作为物来成像的。

卷一“四镜”：

“小人常有四镜，一名圭，一名珠，一名砥，一名孟。圭视者大，珠视者小，砥视者正，孟视者倒。”

这一条记述了谭峭的四种镜子，它们各有其不同成像特点。这四种镜具体形制，今人之说多有分歧，有学者认为它们属于透镜，也有学者指出反射镜亦可造成上述成像效果。不管哪种说法成立，我们都可以说，本条的记述表明，当时人们对镜子形状与其成像特征已经有了某种初步认识。

卷五“战欲”条：

“食之欲也，思盐梅之状，则辄有所吐而不能禁；见盘飧之盛，则若有所吞而不能遏。”

这一条是对司空见惯的条件反射现象的描述。非但如此，谭峭在本卷的“庚辛”条，还记述了人工养鱼过程中在鱼群中形成条件反射的两个例子：

“庚氏穴池，构竹为凭槛，登之者，其声策策焉。辛氏穴池，构木为凭槛，登之者，其声堂堂焉。二氏俱牧鱼于池中，每凭槛投饵，鱼必踊跃而出。他日但闻策策堂堂之声，不投饵亦踊跃而出。则是庚氏之鱼可名策策，辛氏之鱼可名堂堂，食之化也。”这段话，把条件反射形成过程中条件刺激的作用特别提了出来，这在生物学史上，具有十分珍贵的史料价值。

《化书》不是一本纯粹的科技著作，谭峭在这本书中，通过论述万事万物的“变化之道”，阐释他自己对自然、对社会、对人生的一些看法，故本书对于全面研究谭峭学术思想，也有很高的参考价值。

应予指出的是，由于当时科学发展水平的限制，《化书》所记载的一些变化实际上并不存在。例如卷一“蛇雀”条所谓“蛇化为龟，雀化为蛤”，“老枫”条所云“老枫化为羽人，朽麦化为蝴蝶”，“贤女化为贞石，山蚯化为百合”等，皆属子虚乌有。这是时代使之然，并非谭峭本人的荒唐。

《化书》流传至今，被分别收入《四库全书》和《道藏》，另有《墨海金壶》、《宝颜堂秘籍》等刊本印行。

《梦溪笔谈》

北宋沈括（1033—1097年）所著《梦溪笔谈》一书，是我国举世闻名的11世纪一部科学巨著。

沈括，字存中，钱塘（今浙江杭州）人，北宋著名科学家、政治家。他出身于官宦之家，仁宗嘉佑年间中进士，任扬州司理参军。后又被推荐到京师昭文馆，负责编校书籍。神宗时，他积极参与王安石变法，多次被委以重任，曾提举司天监，任翰林学士、权三司使等，亦曾出使辽国，谈判边界划分问题。后知延州（治所在今陕西延安），因他人兵败受牵连，坐贬。晚年居润州（今江苏镇江），筑梦溪园闲居。这期间，据其科学实践与平生见闻，著成本书。

《梦溪笔谈》包括《笔谈》、《补笔谈》、《续笔谈》三部分。《笔谈》二十六卷，分为十七门，依次为“故事、辩证、乐律、象数、人事、官政、机智、艺文、书画、技艺、器用、神奇、异事、谬误、讥谑、杂志、药议”。

《补笔谈》三卷，包括上述内容中十一门。《续笔谈》一卷，不分门。全书共六百零九条（不同版本稍有出入），内容涉及天文、历法、气象、地质、地理、物理、化学、生物、农业、水利、建筑、医药、历史、文学、艺术、人事、军事、法律等诸多领域。在这些条目中，属于人文科学例如人类学、考古学、语言学、音乐等方面的，约占全部条目的18%；属于自然科学方面的，约占总数的36%，其余的则为人事资料、军事、法律及杂闻轶事等约占全书的46%。

就性质而言，《梦溪笔谈》属于笔记类。从内容上说，它以多于三分之一的篇幅记述并阐发自然科学知识，这在笔记类著述中是少见的。因为沈括本人具有很高的科学素养，他所记述的科技知识，也就具有极高价值，基本上反映了北宋的科学发展水平和他自己的研究心得，因而被现代人誉为“中国科学史上的坐标”。

例如，《梦溪笔谈》正确而详细记载了“布衣毕升”发明的泥活字印刷术，这是世界上最早的关于活字印刷的可靠史料，深受国际文化史界重视。此外，北宋其他一些重大科技发明和科技人物，也赖本书之记载而得以传世。如记载喻皓《木经》及其建筑成就、水工高超的三节合龙巧封龙门的堵缺方法、淮南布衣卫朴的精通历法、登州人孙思恭释虹及陆龙卷、河北“团钢”“灌钢”技术，羌人冷作冶炼中对“瘵子”的应用、“浸铜”的生产等，均属科技史上珍贵史料。

《梦溪笔谈》上述对北宋科技成就的记述，已足以使其名垂青史。非但如此，该书还记录了沈括自己的许多创见，这进一步推进了北宋的科学发展。

例如，在天文学方面，《梦溪笔谈》阐释了沈括自己对浑仪、漏刻、圭表等天文仪器研制方面的许多创见，记述了他的“日有盈缩”这一重要发现以及他关于实行阳历“十二气历”的建议。书中还准确描述了五星运行轨迹，计算出月道与黄道交角每月后退度数更为精确的数值，正确说明月亮的盈亏生光现象，发明准确测定极星位置的方法，详细记录并描述陨石特征及陨落过程，指出了铁陨石的存在，等等。这些均系天文学史上值得一提的重要成就。

在物理学方面，《梦溪笔谈》记述了算家所谓的“格术”，沈括以之解释小孔和凹面镜成像，开辟了“格术光学”这一光学新领域。沈括对透光镜

的研究，思考缜密，多有可采之处。另外，沈括还讨论了指南针的不同安装方法，记录了“以磁石磨针锋”的指南针人工磁化方法及指南针“常微偏东，不全南也”的现象，从而肯定了地磁偏角的存在。在声学方面，《梦溪笔谈》记述的沈括在琴弦上贴小纸人，以验证声音共振现象的发明，比欧洲类似的发明要早约七百年。

在数学上，《梦溪笔谈》讨论了垛积问题，建立了隙积术，其实质是解决了高阶等差级数的求和问题。书中还探讨了会圆术，沈括从计算田亩出发，考察了圆弓形中弧、弦和矢之间的关系，得出了新的弓形面积的近似公式。隙积术和会圆术的建立，为中国古代数学的发展开辟了新的方向。

在地质地理方面，《梦溪笔谈》记述了沈括对浙江雁荡山、陕北黄土高原地貌地质的考察，明确提出了流水侵蚀作用说。该书还通过对化石的讨论来论证古今气候变化，对矿石资源亦有涉及，指出江西铅山山涧水中有胆矾，可以炼铜；发现陕北的石油可以用于照明和制墨。在地图制作方面，记述了沈括以熔蜡和木屑制作立体地图的发明，这一发明早于欧洲约七百余年。书中对地图制做中州县相对方位的描述，由传统 8 个方位增至 24 个方位，同时特别重视对两地间直线距离——“鸟飞之数”的测量，使州县相对位置更为可靠。

在生物医学方面，《梦溪笔谈》也多有记述，且大都观察准确，记录翔实，能够从实际出发，辨别真伪，补正古书之不足。

《梦溪笔谈》对沈括的治学思想和方法也多有反映，是研究沈括科学思想的主要参考材料。

此外，《梦溪笔谈》还以大量篇幅记述了当时的政治、军事、法律、人事以及一些传闻轶事、艺文掌故等。对赋役扰民、西北与北方军事利弊及典礼礼仪和古代音乐演进，均有翔实记载。该书对于研究北宋社会、政治、科技、经济诸方面有重要参考价值。

《梦溪笔谈》问世后，受到学界重视，不久即被刊刻印行。此书现知最早有南宋乾道二年本，今仅存元、明覆刻乾道本。通行的正、补、续三编本首出《稗海》。1956 年，上海出版公司出版了胡道静的《梦溪笔谈校证》，考据精详。1957 年，中华书局又出版了胡道静的《新校正梦溪笔谈》，很便于阅读。《梦溪笔谈》在国外也很有影响，早在 19 世纪，它就因为其活字印刷术的记载而闻名于世。本世纪以来，法、德、英、美、意等国都有人对《梦溪笔谈》进行系统而又深入的研究，并向社会公众加以介绍。我们的近邻日本，早在 19 世纪中期，就用活字版排印了沈括的这部名著，是世界上最早用活字版排印《梦溪笔谈》的国家。从 1978 年起，日本又分三册陆续出版了《梦溪笔谈》的日文译本。这些情况表明，《梦溪笔谈》不愧为一本有国际影响的中国古代科技典籍。

《墨娥小录》

《墨娥小录》是一部杂录性质的著作。《明史·艺文志》载有“吴继《墨娥小录》四卷”，实则吴继并非作者而是刻印者，该书是十四卷，亦非四卷，其作者及成书时间不详，吴继在该书引言中说：“余暇日检篋藏书，偶及是集，名《墨娥小录》，……不知辑于何许人，并无脱稿行世。晦且湮者，亦既久矣。”这一引言即表明了这一情况。

不过，《墨娥小录》的取材地区、成书年代以至辑录者，并非完全无迹可寻。今人郭正谊对《墨娥小录》辑录情况做了考察，认为它成书于元末明初，书中材料主要采自江浙一带，辑录者有可能是元末学者、《辍耕录》的作者陶宗仪（郭正谊，《墨娥小录》辑录考略，《文物》，1979年第8期）。这当可备为一解。

《墨娥小录》涉及内容甚为广泛，正如吴继在引言中所说：“自文艺、种植、服食、治生以至诸般怡玩，一切不废。”具体说来，该书十四卷，卷目依次是：文府清事、博古绪余、饮膳集珍、汤茗品胜、医方捷法、艺术戏剧、推测历命、种植怡情、方外修真、房中秘药、丹方烧炼、香谱修制、禽畜宜忌、市语声嗽。从内容来看，卷三、卷四、卷八、卷十三等农学条目，较为实用，有一定科学价值。卷五、卷九、卷十等医学部分，亦多可采之处。卷十四“市语声嗽”，则辑录了大量的当时民间流传的歇后语和江湖切口，为研究方言和曲语保存了不可多得的材料。

但是，《墨娥小录》的重要性并不仅仅在于这些方面，它的更大价值是在化学方面。英国学者李约瑟博士在其《中国科学技术史》第五卷中称誉《墨娥小录》是一部“关于炼丹操作和设备的通俗百科全书”。这殆非虚言，《墨娥小录》确实收录有大量值得称道的化学知识（参见郭正谊，“明代《墨娥小录》一书中的化学知识”。《化学通报》，1978年第4期）。

例如，《墨娥小录》一书最早记述了各种烟火的科学配方，其卷六列举了“金盏银台”、“金丝柳”、“赛明月”、“紫葡萄”等二十二种烟火配方，这在其前的古书中是不多见的。根据该书的记载，当时人们在配制烟火时，首先利用不同比例的硝、硫磺和炭配制成烟火用的不同的基础药，这些药共有八类，其燃烧速度和爆炸性能各不相同。然后依据不同的需要，在其中加入相应金属，使其燃烧时呈现预期颜色。这些记载表明，当时人们对于火药成分与其性能的关系，已经有了比较清楚的了解，对于金属的焰色及反应也有了比较正确的认识，这样他们才能制作出不同的彩色焰火来。这些，在化学史上都是比较大的进步。

在卷十一“丹房烧炼”这一部分，《墨娥小录》记录了两种抽炼丹砂的方法，第一种是传统方法，将丹砂装在反应器上部加热，生成的汞落到冷却的反应器的下部或落入放在反应器下部的盛水容器中。第二种方法则对传统方法做了很大改进，具体为：

“朱砂不拘分两，为末，安铁锅内。上覆乌盆一个，于肩边取孔一个，插入竹筒固济，口缝合牢固，竹筒口垂入水盆水内，锅底用火。其汞有在乌盆上者，扫取之。亦有自竹筒流下者。”这种方法的最大特点是将冷凝器与反应器分开，从而提高了冷凝效率，增加了汞的产出率。《墨娥小录》对这两种方法做了比较，指出前者“大抵朱砂一两止有真汞三钱”，而后者“每两可取七钱”。孰优孰劣，一目了然。这种方法，并非《墨娥小录》首创，

南宋炼丹术著作《丹房须知》中的炼丹炉插图，有一幅与此法十分类似，也是反应器与冷凝器分开了的。《墨娥小录》对此的贡献在于，它首先从定量角度考察了两种方法汞的不同产出率，从而科学地证明了新方法的优越性。

《天工开物》中记载的大规模抽炼丹砂的方法，基本上就是这一方法的放大。

《墨娥小录》卷二记载的“铜上镀金”法，则介绍了一种用汞剂镀金的新工艺。传统汞剂镀金方法是首先使金和汞相互作用，制得金汞剂，然后将金汞剂直接涂抹到铜器上，再加热使汞蒸发即可。现在，《墨娥小录》记载的新方法则是首先将铜表面用酸处理干净，然后涂上一层汞，使其生成铜汞剂，然后在铜汞剂表面上贴金箔，贴金后生成的金汞剂和铜汞剂互相渗透，在火上加热蒸发掉汞，就形成牢固的镀金膜。用这种方法制金膜，镀金层均匀而且牢固，也不浪费，确实是有价值的新工艺。

在“卷六”中，《墨娥小录》还记载了铜青的制造方法。铜青又名铜绿，在元明以前《本草》中的铜青是铜器上的锈，即碱式碳酸铜。元明以来开始有人造的铜青，主要作颜料用。在《本草纲目》卷八，李时珍曾简略提及此事。宋应星《天工开物》则对其制作方法做了简单介绍。相比之下，《墨娥小录》对铜青制造方法的介绍要详细得多，时间上也要早一些。

另外，在卷六，《墨娥小录》还介绍了一种分离金银合金的方法。具体过程是，首先对金银合金加热，使其处于熔融状态，然后加入硫黄。硫与银在熔融状态时很快反应，生成硫化银（ Ag_2S ），而金则不参与反应，利用这一特点，把银从金中分离出来，然后再用碳将硫化银还原成银。这就实现了金银的定量分离。这种方法合乎科学道理。

轻粉（氯化亚汞， Hg_2Cl_2 ）是中国古代重要的化学药品，《本草品汇精要》、《本草纲目》中都记载了轻粉制法，而《墨娥小录》卷十一的记载更富特色，它从设备装置、原料处理到操作要点，都做了极为详细的叙述，还增加了许多改进之处，例如将反应物分为四份研磨混匀，增开视察孔以观测反应是否完全，强调加热是从文至武，并明确指出加热程度对 Hg_2Cl_2 升华结晶颗粒大小的影响等等。这些记载表明，《墨娥小录》的作者对之是作过多次实践的，本条是其实践经验的总结。

在卷十一中，《墨娥小录》还记载了造粉霜（氯化高汞， HgCl_2 ）法。《本草纲目》引用的造粉霜法原载于唐代《外台秘要》，该法利用硫化汞与过量食盐通过多次复分解升华（每次补充盐）使反应完成，手续繁复。而《墨娥小录》的记载造粉霜法则在原料中增加了硝（ KNO_3 或 NaNO_3 ）、赤石脂（ Fe_2O_3 ）和无名异（ MnO_2 ）。这样，在硝石和二氧化锰两种氧化剂的作用下，可以直接生成氯化高汞，一步升华取得产品。这种用硝石氧化制氯化高汞的方法，是《本草》中没有记载的新方法。

在《墨娥小录》卷十二中，还载有取百花香水法：“采百花头，满甌装之，上以盆合盖，周回络以竹筒半破，就取蒸下倒流香水，贮用为之花香。此乃广南真法，极妙。”这是用蒸馏法蒸取香露，切实可用。本条的记载在时间上也是早的。

上面的介绍，仅是《墨娥小录》的一部分。从全书内容来看，《墨娥小录》的作者引录前人材料时，实用的多，荒诞的少。而其中自行采访记录的内容则更为细致，这反映了作者的求实精神。《墨娥小录》由吴继刊刻于明隆庆五年（1571年），比宋应星的《天工开物》（1637年刊刻）早66年，

比李时珍的《本草纲目》（1578年编成，1596年刊印）也略早一些。因此，尽管它不是一本科技专著，但其中有相当多的资料对于研究我国化工、医药以及轻工业技术发展等都有相当大的价值。本书除明刻本外，尚有《格致丛书》本和光绪九年（1883年）刻本。1959年，北京中国书店依明刻本将其影印出版，为进一步研究提供了有利条件。

《论气》

《论气》是明末学者宋应星（1587年—？）所著的一本自然哲学方面的书籍。

宋应星，字长庚，江西奉新人，万历举人，曾任江西分宜县教谕、福建汀州府推官、南京亳州知州等职。崇祯十七年（1644年）弃官回乡，后曾仕南明，约死于清顺治年间。在任职分宜县教谕期间，他完成了其不朽著作《天工开物》，该书是汇集古代科技成就之名著，享誉天下。除《天工开物》外，他另有著作数种，《论气》为其中之一。

《论气》是宋应星关于自然哲学与科学方面的著作。全书共分二十三章，每章长度不等，一般为数百字左右。其中包括“形气化”五章，“气声”九章，“水非胜火说”四章，“水尘”三章，“水风归藏”一章，“寒热”一章。书中提出物质性的“气”化成天地万物、万物复归于气的观点，表现了作者的唯物主义思想倾向。本书所有内容，都围绕着这一命题展开。

在本书《形气化》部分的开篇伊始，宋应星就明确提出：

“天地间非形即气，非气即形，杂于形与气之间者，水火是也。由气而化形，形复返于气，百姓日习而不知也。”

这段话，鲜明地表现了本书的中心思想：万物皆气之所为，并以气为其归宿。从这一观点出发，他对常见自然现象做了自己的解释。

在运用气的观点解说自然时，宋应星有一独特之处，他认为气本身又可分为水火二气，即所谓“杂于形与气之间者，水火是也”。水火二气都是实实在在的客观存在。他举例说，一株大树，生于地下，长于空中，“当其斧斤未伐，霜雪未残之时，所谓木之本来面目也。二气附丽其中，铢两分毫，无偏重也。取青叶而绞之，水重如许；取枯叶而燃之，火重亦如许也。”（《论气·水火三》）这表明，水火二气不仅等量存在于自然界，而且它们都有重量，是一种客观物质。从这种认识出发，《论气》一书在解释自然现象时，有时用单一的气或元气概念，有时又用水、火二气概念去做解说，由此出发构绘了一套自己的理论体系。

宋应星用气的概念去解说自然，有时也能得出一些十分精彩的见解，这特别表现在他对声音现象的解说上。因为声音的产生，确实与空气的运动分不开，而宋应星对“气”这一概念的理解，又包含了我们今天所谓“空气”的某些性能在内，这就使得他的解释，在某种程度上得以揭示声音的一些本质。

例如，他在讨论人的发音过程时说：

“人物之声，即出由脏腑，调由唇舌，然必取虚空之气参和而能成。”

（《论气·气声一》）这就是说，人之发声，虽然是出于喉舌，但必须有空气的参与。非但人发声如此，自然界所有声音，无一不是空气运动的结果，他说：

“气本浑沦之物，分寸之间，亦具生声之理，然而不能自为生。是故听其静满，群籁息焉。及夫冲之有声焉，飞矢是也；界之有声焉，跃鞭是也；振之有声焉，弹弦是也；……当其射，声不在矢；当其跃，声不在鞭；当其弹，声不在弦；……微芒之间一动，气之征也。”（《论气·气声二》）

这段话，列举各种情况，说明声音的本质是气的运动。导致声音产生的各种物体运动，其作用仅仅在于激发空气的相应运动而已。这种对声音本质的认

识，是正确而且深刻的。

非但如此，宋应星对声音的波动传播方式也有所认识，他说：

“物之冲气也，如其激水然。气与水，同一易动之物。以石投水，水面迎石之位，一拳而止，而气文浪以次而开，至纵横寻丈而犹未歇，其荡气也亦犹是焉，特微渺而不得闻耳。”（《论气·气声七》）

他把空气的受激发声向外传播过程，与水面受激波纹向外传播过程相提并论，认为二者传播方式是相同的，这可以称之为一种朴素的声波概念。

《论气》直接用气的概念解说各种自然现象，表现的是自然哲学倾向，尚未进入到科学阶段。自然界是复杂的，不同的自然现象有其不同的具体形成原因，不做具体分析，一概用气去做解说，虽然在某些问题上也能得到正确认识，但在另外一些问题上，则难免要犯错误。

例如，本书的《形气化》第一章在讨论植物的生长时，说：

“气从地下催腾一粒种，性小者为蓬，大者为蔽牛干霄之木，此一粒原本几何，其余则皆气所化也。”

这是说，树木种子虽小，但可以长成参天大树，参天大树除原来种子之外，其余都是气转化成的。这些话在哲学上也许是成立的，但在自然科学上它并没有为我们增添多少关于植物生长过程的具体知识。

再如，《论气》的《水尘》篇第三章在讨论黄河水混浊的原因时说：

“黄河水浊，说者曰：其源长而流急，刷土扬泥之所为也。”

这种观点虽然不够完善，但也有其一定的合理之处。可是宋应星反对这一学说，他用气的学说解释黄河水之所以混浊的原因，说：

“此亦气之所为，而泥土因之。水生于气，气从其朔。……河源初出，涌从地中，历乱七八十泓而后成巨泽，其气混洪激烈，不与他川同，至入海而此气方散。凡其所经，泥沙举不得静焉。”这一问题，本来简单，只需考虑一下黄河的冲刷力及其流经区域的地质地貌即可。现在宋应星用气的概念进行解说，反而使问题复杂化了。

无论如何，《论气》一书所表现的思想方法，在中国古代有一定的代表性。研究这本书，对于了解古人在面对自然时所形成的思维方式，是有价值的。

《论气》原刊于明崇祯丁丑年（1637年），后长期失传，海内仅存孤本，世人罕得一见。1976年，上海人民出版社据明刊本将此书与宋应星其他三种著作一道以铅字本出版，于是始广为流传，成为研究宋应星思想的重要资料之一。

《远镜说》

《远镜说》是把欧洲光学知识介绍给中国的第一本专书，其主要内容系介绍望远镜的制法和用法。作者是德国传教士汤若望（Johann Adam Schall von Bell，1591—1666年）和中国学者李祖白。由汤若望口述，李祖白笔录而成。

望远镜在欧洲出现于16世纪下半叶。17世纪初期，伽利略（Galileo Galilei，1564—1642年）也独立研制出了望远镜，并把它指向天空，得到了一些重要发现，引起欧洲轰动。伽利略的发现很快也传入中国。1615年，葡萄牙传教士阳玛诺（Emmanuel Diaz，1574—1659年）撰写《天问略》，书中说，“近世西洋精于历法一名士，务测日月星辰奥理而衰其目力尪羸，则造创一巧器以助之。”此处的“一名士”，即指伽利略；“一巧器”，即指望远镜。书中接着介绍了伽利略用望远镜观天取得的一系列成果，但对于望远镜的具体制法和用法，则没有加以说明。

《远镜说》最早介绍了望远镜的制法和用法。该书有可能是参考吉罗拉莫·西尔图里（Girolamo Sirturi）所著的《望远镜，新的方法，伽利略观察星际的仪器》（*Telescopium, sive ars perficiendi novum illud Galilaei Visorium Instrumentum ad Sidera*）（1618年，法兰克福）写成的。书中附有一幅整架望远镜的外形图。在该书“自序”之后的“利用”一节，作者开篇伊始就说：“夫远镜何昉乎？昉于大西洋天文士也。”这指的就是伽利略。书中对伽利略观天成果的介绍，比《天问略》更详尽。该书列举了用望远镜仰观太阳、金星、木星、土星和宿天诸星，及直视远处山川江河、树林村落、海上行舟和室中诸远物的情形，并介绍了透镜的“分利之用”，指出远视眼“不耐三角形射线（案：指发散光束）而耐平行射线”，使用“中高镜”（案：即凸透镜）则可使发散光束“从镜平行入目，巧合其习性”。对于“中洼镜”（案：即凹透镜），该书也通过类似讨论，指出其“利于苦远视者用之”。这些描述，对于望远镜和透镜知识的普及，有一定作用。

《远镜说》的第二部分“原由”，主要讲望远镜的光学原理。在这一部分，作者先定性描述了折射现象，然后说明一凸一凹两透镜组合使用，“则彼此相济，视物至大而且明也。”

本书的第三部分“造法用法”，讲望远镜的制作和使用方法。它所介绍的，是伽利略式望远镜，不是开普勒式。书中指出：以凸透镜为“筒口镜”（案：即物镜），凹透镜为“靠眼镜”（即目镜），镜筒则由数筒套合，用时伸缩调节。“镜只两面，但筒可随意增加，筒筒相套，可以伸缩。又以螺丝钉拧住，即可上下左右。”

书中还涉及到观察太阳及金星时对眼睛的防护问题；“视太阳及金星时，则加青绿镜，或置白纸于眼镜下观太阳。”望远镜最初问世时，并未虑及强光时对眼睛的防护，等到有了惨痛教训之后，人们才开始注意这一问题。所采取的方法，也就是《远镜说》中的这两条。即一是加置色片，使光线减弱；另一是在目镜下放置像屏，观察太阳光通过望远镜后在像屏上成的像。由此可见，《远镜说》的介绍还是比较全面的。

《远镜说》的内容比较简略，全书不过五千余字，而且书中的光路图也是错的。但书中介绍的望远镜的制法和用法都是切实可行的，因此，它对我国后来的光学研究和望远镜的研制很有启发。明末清初我国曾涌现出一批光

学仪器制造家，《远镜说》在这其中的作用，不可忽视。

《远镜说》著成于 1626 年，刊行于 1630 年，有《艺海珠尘》等本传世，《丛书集成初编》本较为通行。

《物理小识》

《物理小识》是明末学者方以智所著的一部百科全书式的学术著作。

方以智（1611—1671年），字密之，号曼公，安徽桐城人，是我国明末清初一位重要的启蒙思想家、哲学家和科学家。他对天文、地理、物理、医药、生物、历史、文学、音训等均有研究，《物理小识》是他研究科学的代表作。所谓“物理”，概指世界上一切事物之理，与我们今天所说物理学之“物理”涵义不同。“识”通“志”，即记。即《物理小识》是一部全面记述万事万物道理的著作。

《物理小识》全书共十二卷，分为十五类，依次为天类、历类、风雷雨•D类、地类、占候类、人身类、医药类、饮食类、衣服类、金石类、器用类、草木类、鸟兽类、鬼神方术类、异事类。从内容来看，它广泛涉及天文、地理、物理、化学、生物、医药、农学、工艺、哲学、艺术等诸多方面。清儒于藻称赞说：“天道律历之符、山解五行之蕴、礼乐制作之矩、人间日用之宜，因物付物，得此条理；群疑立决，享其不欺：岂不快哉！”（《物理小识序》）这一评论，对于了解《物理小识》的价值，是有益的。

但是，《物理小识》的价值并不仅仅表现在它的实用性方面，也表现在它的科学见解方面。方以智在该书中提出的许多真知灼见，在当时是领先于那个时代的。

例如，在卷首的“自序”和“总论”中，方以智提出：

“寂感之蕴，深究其所自来，是曰通几；物有其故，实考究之，大而元

会，小而草木蠹蠕，类其性情，征其好恶，推其常变，是曰质测。”

这就是在哲学史上有名的“通几”与“质测”之说，是方以智从研究目的和研究方法着眼对学术活动所做的分类。方以智认为，“通几”与“质测”，是两类不同的学术活动，它们各有其不同的研究目的和研究方法。通几以事物运动缘由及征兆为研究对象，质测则旨在探讨事物运动规律。对学术活动做这样的思考和分类，这是方以智的独创。

在天文学方面，《物理小识》继承了中国传统天文学的优秀成果，并且吸取了当时西方传入的先进知识。例如该书介绍西方的地圆说，认为：

“地体实圆，在天之中。……相传地浮水上，天包水外，谬矣。地形如

胡桃肉，凸山凹海。”（《卷一·历类》）

中国传统上一直认为天圆地平。明末，传教士来华，带来了地圆学说，为一部分中国知识分子所接受，方以智是其中之一。他所说的“地形如胡桃肉，凸山凹海”一语，形象地说明了海也是地球的一部分，这有助于破除传统的“地浮水上”之说。

《物理小识》注意追踪西方天文学的新进展。例如在卷一“历类”中，方以智就曾根据西方用望远镜观测发现金星“有时晦、有时光满、有时为上下弦”这一周相变化事实，提出了金星、水星绕太阳运行的正确猜测。

在物理学方面，《物理小识》更是多有可称道之处，尤其表现在它所论及的光学和声学知识方面。《物理小识》对于光和声的波动性的认识，远较其前人为强。书中提出了被我们称之为“气光波动说”的朴素光波动学说，方以智并在此基础上阐释了他的“光肥影瘦”主张，认为光在传播过程中，总要向几何光学的阴影范围内侵入，使有光区扩大，阴影区缩小。他并据此批驳了传教士有关太阳直径将近有日地距离三分之一大的说法。这些，都是

前无古人的学术贡献。

另外，《物理小识》关于光的色散、反射和折射，关于声音的发生、传播、反射、共鸣、隔音效应，关于比重、关于磁效应等诸多问题的记述和阐发，都是极其出色的。

在医药生物诸方面，《物理小识》也有诸多贡献。方以智在这些方面用力甚大，有关条目占全书总条目的三分之一还要强。他会通中西，对人体生理、病理以及医疗、药物等诸多方面均有较深入的研究。方以智重视吸收引进西方医学知识，以弥补传统医学的不足。他在《物理小识》中介绍了大量西医解剖学知识，而这正是传统医学的一个薄弱环节。他根据西方人体生理知识，提出“人之智愚系脑之清浊”（《卷三·人身类》），这是对传统“心之官则思”说法的一个勇敢突破。方以智对传统医学也很精通，《物理小识》曾广泛援引历代医家言论，取各家之长而加以综合。在药理学方面，《物理小识》不但发现和改正了一些历代本草书（包括李时珍《本草纲目》）中的错误和疏漏，而且搜罗了不少历代本草书中未曾采纳但确实行之有效的药物，对后世医药学作出了自己的贡献。

《物理小识》中的大量内容属于生活科学方面的知识，如其中的“洗面筋法”、“去衣垢膩法”、“藏书辟蠹法”等，这些条目为该书增添了不少“居家必备”的实用价值。

《物理小识》基本上是方以智青年和中年时期的作品。崇祯辛未（1631年），方以智开始收集撰写《物理小识》的材料，至崇祯癸未（1643年）编成初稿。次年，李自成农民军攻陷北京，方以智匆忙逃离，在其后的颠沛流离生活之中，他仍然不忘搜集材料，予以补充。该书原附于方以智的另一著作《通雅》之后，后由其次子方中通、学生揭暄等加注重编，使其单独成书。需要指出的是，揭暄、方中通在注解此书过程中，也提出了许多有价值的思想。例如揭暄在注解方以智的“气光波动说”时，就发展了方以智的思想，提出了形象信息弥散分布于所有空间的学说。这一学说有较高的哲学和科学意义。

在方以智的著作中，《物理小识》是影响较大的一本书，该书被收入了《四库全书》，终清之世，不乏被人引用，而且在17世纪晚期传入日本，为知识阶层争相阅读。此书并影响到日本学者把“物理学”作为Physics的译名，最后又传回中国。在现存的《物理小识》刻本中，最早的是清康熙三年（1664年）宛平于藻庐陵刻本，其次有光绪十年（1884年）宁静堂刻本等。

《镜镜詵痴》与《费隐与知录》

《镜镜詵痴》与《费隐与知录》均为晚清学者郑复光所著的科学著作。

郑复光（1780年—？），字浣香，又字元甫，安徽歙县人，我国19世纪30—40年代有成就的几何光学专家。《镜镜詵痴》一书是他的几何光学代表作。

在郑复光生活的时代，我国学者在光学仪器的制作方面已取得不少成就，但在光学理论方面，却十分贫乏，也缺少相应的书籍，可以称之为光学专著的，也就是明末德国传教士汤若望编著的《远镜说》。但该书主要是介绍望远镜的制法、用法及其一般原理，内容十分简略，光路图也都是错的。鉴于这种情况，郑复光决心通过自己的研究，写出一部系统的光学专著。他经过刻苦的钻研和实验，历时十个寒暑，终于在道光十五年（1835年）写成了《镜镜詵痴》一书。

郑复光以“镜镜詵痴”作为书名，有其一定用意。“镜镜”，表示照物用之镜；詵，本义为叫卖，这里意为夸耀。北齐颜之推《颜氏家训·文章》云：“吾见世人，至无才思，自谓清华，流布丑拙，亦以众矣。江南号为詵痴符。”“詵痴”二字涵义，直接由此而来，它表示无才学而又好夸耀于人，适成献丑。郑复光以此为书名，当然是谦虚之意，我们可以把它解释为“关于照物之镜问题之愚见”。另外，它也表明这是一部光学专著。

《镜镜詵痴》一书成稿后，又经郑复光多次修订增补，最后于道光二十六年（1846年）定稿并付梓刊行。全书共五卷，约七万余字，除“自序”外，分为“明原”、“类镜”、“释圆”、“述作”四大部分共三十二篇。书末附有《火轮船图说》，是有关火轮船制作方面的论述。

“明原”主要讨论几何光学的基本原理，包括原色、原光、原景、原线、原目、原镜六篇。郑复光在这一部分论述了光的发生、传播及反射、折射现象，对几何光学中的四条基本定律，即光的直进、光的独立传播、光的反射、光的折射定律，都作了阐述。他还分析了眼睛的光学功能，探讨了引起眼睛近视或老花的原因以及视物近则大、远则小的“远差”问题，并对该书中用的一些基本概念如“外光”、“内光”、“通光”、“含光”、“光线”、“约行线”、“侈行线”等做了规定，为后文的讨论做了准备。

“类镜”部分包括“镜资”、“镜质”、“镜色”、“镜形”四篇，介绍了几种镜的质料和性能，重点阐述了几种方形透镜的特性及其光学现象。

“释圆”部分主要讨论透镜成像，分为“圆理”、“圆凸”、“圆凹”、“圆叠”、“圆率”五篇。“圆理”讨论凸、凹透镜成像的总规律；“圆凸”、“圆凹”分别讨论凸透镜、凹透镜成像的特点；“圆叠”则说明透镜组的成像情况；“圆率”说明凸、凹透镜之间各种量的关系，提出了一系列的参数。这一部分是全书的重点，也是郑复光研究成果的主要表现。他在这一部分提出的“顺三限”、“侧三限”概念，富有自己的特色。他所给出的“凸限全率表”和“凹限全率表”，详细列出了透镜顺、侧各限的比值，利用它们可以方便地互求透镜各限，对于光学仪器的研制也有一定的指导作用。

“述作”部分则著录了17种光学器械，郑复光运用上述“释圆”部分阐明的理论，对它们一一进行了深入的研究，介绍了它们的制作、使用和保养方法。这些介绍，大都切于实用。

“镜镜詵痴”一书也有其不足之处，例如它关于光线在透镜前面相交的

说法就不够准确。但就全书而言，它以独具特色的论述，说出了与西方近代几何光学类似的结论，从而把我国古代光学的研究推上了一个新的台阶，这也是难得的。

与《镜镜詵痴》构成姊妹篇的，是郑复光的《费隐与知录》一书。所谓“费隐”，是“用广体微”之意；“与知”，是参与闻知之意。这两个词均出于《中庸》“君子之道，费而隐；夫妇之愚，可以与知焉。”郑复光以此作书名，意思是说，他在这本书中所谈之事，虽然都是一些细微问题，但涉及面广，里面包含有深刻道理，一般人读了，也可以明白。由此，这本书是一本具有普及性质的科学著作。

从内容上来看，也的确如此。郑复光把当时人们认为怪异不可解的各种现象，包括天地、日月、星辰、风云、雷雨、霜雪、寒暑、潮汐、医药、饮食、服饰、器皿、鸟兽、虫鱼等诸多方面，归纳成 225 条，采用问答式写法，用物性、热学、光学、地理学等科学知识加以解释，在一定程度上反映了我国当时的科学认识水平。清儒包世臣对此曾有所评价，他在为该书所作的序中指出：《费隐与知录》“所说皆世人惊骇以为灾祥奇怪之事，而郑君推本说之，或以物性而殊，或以地形而变，或以目力而别，明白平易，如指诸掌。当郑君之未说也，循其迹，几于圣人所不知，及其既说而目验之，则夫妇之所与知也。”这一评价，基本上也说明了该书的特征。

《费隐与知录》虽是一本百科问答式的普及书籍，但也有一些新的见解。例如书中对小孔成像的讨论，包括了正像、模糊无像、倒像三种情况，揭示了小孔成像的全过程，在光学史上是一贡献。再如书中提出“透光即如透火”、“能透光即能透暖”的论点，认为凡是光线能照射进入的地方，就能同时把热传进去，光的传播就是热的传播。这实际指的是热的辐射传导现象。在中国，在郑复光之前，还没有人明确指出这一点。

《费隐与知录》一书始作于 1816 年，1842 年正式刊行，历时二十余年。在这期间，郑复光又写了《镜镜詵痴》，两书同时进行，交叉写作，因而在内容上也有一定联系。特别是《费隐与知录》一书中有二十多条关于光学的见解，与《镜镜詵痴》关系更为密切，可以补正《镜镜詵痴》之不足。例如对于小孔成像的研究就是如此。另一方面，《镜镜詵痴》的系统论述，又为《费隐与知录》的讨论提供了基础理论知识，在《费隐与知录》书中多处注明详见《镜镜詵痴》，就表明了这一点。

由于种种原因，在《费隐与知录》中还存在一些模糊甚至错误的观念。但无论如何，这本书在普及科学知识、宣传科学思想上所起的作用是巨大的，它与《镜镜詵痴》一样，都是中国科学史上的重要著作。

炼丹术类著作

在中国化学史上，有一类书不能不提，但又不胜卒提，这就是炼丹术类著作。

炼丹，是古人向往长生的一种实验活动。这种实验活动大致可分为两类。一类是以呼吸、吐纳、导引、周天运转等为手段的心理、生理炼丹术，又名内丹术，现代则多称之为气功术、道家养生功法等。另一类则以化学实验为手段，旨在烧炼金丹、黄白，希图通过服食它们达到长生。这就是人们通常所说的外丹术。化学史上所说的炼丹术，一般是指外丹术，这里也不例外。

炼丹术的出现，与人们寻找长生药的实践有关。早在战国时期，燕齐等地就流传关于“神仙”的传说，人们相信可以找到仙人，求得仙药，服之长生。甚至千古一帝的秦始皇，对此也笃信不疑。到了汉武帝时期，情况有所变化，武帝一方面对派人外出寻求仙药的活动乐此不疲，另一方面也支持方士们人工炼制丹药。据《史记·封禅书》记载，方士李少君对武帝说：“祠皂则致物，致物而丹沙可化为黄金。黄金成，以为饮食器则益寿，益寿而海中蓬莱仙者乃可见。……于是天子始亲祠皂，遣方士入海求蓬莱安期生之属，而事化丹砂诸药齐为黄金矣。”这些话，奠定了中国炼丹术金丹和黄白二大分支相结合的基础，同时也标志着古代人工炼制丹药的实践登上了一个新的台阶。

人工炼制丹药的广泛开展，为炼丹术类著作的出现创造了条件。就是在武帝时代，淮南王刘安“招致宾客、方术之士数千人，作为《内书》二十一篇，外书甚众，又有《中篇》八卷，言神仙黄白之术，亦二十余万言”（《汉书·淮南王传》）。这里的中篇八卷，就是中国最早的一批炼丹术著作之一，只是它们已经失传，我们无从窥其原貌。

现存西汉炼丹术著作《三十六水法》，该书是目前所知最早的炼丹术“水法”专著，也是现存最古的炼丹书，其主体部分被收入《正统道藏》，得以保存至今，具有很高的史料价值。不过，对其西汉成书说，有学者认为也还存在疑点，提出成书时间可能晚于西汉。从总体来说，西汉的炼丹术著作不多。班固的《汉书·艺文志》著录了“神仙十家二百五卷”，从他引述的书名上，看不出是否为炼丹术著作。班固自己对这些书有所评论，他说：“神仙者，所以保性命之真，而游求于其外者也，聊以荡意平心，同死生之域，而无休惕于胸中，然而或者专以为务，则欺诞怪迂之文，弥以益多。”从这一评论看出，当时的这些神仙家言，有些属于修心养性行列，有些则仍属于寻仙求药者之类。虽然班固也提到有人“专以为务”，但说他们所作是“欺诞怪迂之文”，都是信口开河，夸夸其谈。真正像淮南学派那样“踏踏实实”讲求黄白之术的著作，为数不多。

西汉末年，情况有所变化。西汉末东汉初问世的《太清金液神丹经》，表现了当时炼丹术发展水平。该书水法与火法同举，内丹与外丹并重。书中有“作霜雪法”，以曾青、矾石、硫黄、戎盐、凝水石、代赭、水银为原料，可能是最早的氯化亚汞合成的配方（参见赵匡华、吴琅宇，“中国丹药中轻粉与粉霜诸处方之辨析”，《自然科学史研究》，1983年第3期）。

同属西汉末东汉初的炼丹术著作还有《黄帝九鼎神丹经》，这本书对后世影响颇大，《抱朴子》曾多次引述。现在收录于《道藏》中的《黄帝九鼎神丹经诀》，共二十卷，其卷一部分即包括了《黄帝九鼎神丹经》的内容。

《经诀》是一种专业性类书，为唐人所辑，收录有许多炼丹书的片断，被收录者大都已成佚书，因而该书具有很高的史料价值。东汉乃至其后相当长一段时间的炼丹术著述，很多都靠该书的引录才为后人所知。

东汉炼丹术著作流传至今而又名闻遐迩的，当首推题名魏伯阳所著之《周易参同契》。对此，本书有专条叙述，此处不赘。

从东汉开始，炼丹术有了突飞猛进的发展，相应著作也大量涌现，仅东晋葛洪便“考览养性之书，鸠集久视之方，曾所披涉篇卷以千计矣”。此外，又有“《神仙经黄白之方》二十五卷，千有余首”（《抱朴子》内篇之《金丹篇》、《黄白篇》），真可谓篇帙浩大。在这诸多书籍中，葛洪的《抱朴子》后来居上，《抱朴子》的《内篇》对其前的炼丹术作了认真总结，把炼丹术士们为寻求长生成仙而进行的探索实践理论化了，为后世炼丹术的进一步发展奠定了基础。

葛洪之后另一位重要炼丹家是陶弘景。陶弘景又是一位大医学家，他所作《神农本草经集注》，在医学史上据有重要地位。除此之外，他还撰有炼丹术著作多种，知书名者有《炼化杂术》一卷、《太清诸丹集要》四卷、《合丹节度》四卷、《服饵方》三卷等。可惜的是这些书今均不传，使得我们无从进一步了解这位古代化学家所掌握的化学知识。

进入唐王朝之后，由于帝王的提倡，道教大兴，炼丹术也随之大发展。这一时期问世的炼丹术著作很多。如《张真人金石灵砂论》、《丹论诀旨心鉴》、《石药尔雅》、《太清丹经要诀》、《龙虎还丹诀》、《大洞炼真宝经修伏丹砂妙诀》、《大洞炼真宝经九还金丹妙诀》、《阴阳九转成紫金点化还丹诀》、《玉洞大神丹砂真要诀》、《太上卫灵神化九转丹砂法》、《阴真君金石五相类》等（参见孟乃昌，“中国炼丹史轮廓”，《江西社会科学》，1991年第3期）。这个时期涌现了许多炼丹家，他们也各有著述传世。例如大医药家孙思邈，即著有《太清丹经要诀》、《存神炼气铭》等。中国化学史上一些重要成果也在这个时期得到记载，例如《铅汞甲庚至宝集成》卷二辑录唐宪宗时清虚子撰《太上圣祖金丹秘诀》，该秘诀提及“伏火矾法”，云：

“硫二两，硝二两，马兜铃三钱半。右为末，拌匀，掘坑，入药于罐内，与地平。”

“将熟火一块，弹子大，下放里面；烟渐起。”这里记载的，是有明确配方的原始火药成分。清虚子还记录了燃烧时冒烟的现象。

五代时期重要的炼丹术著作作为托名“真人郑思远”著的《真元妙道要略》。该书作者从内丹角度批评外丹，罗列了大量外丹炼法，无意之中为后人留下了重要史料。例如原始火药的发现，该书亦有提及。另外，《丹房鉴源》等也成书于这个时期。

宋代皇帝继续推崇道教，炼丹术著作也时有问世。其中最富有代表性的是吴悞所著的《丹房须知》，该书成书于南宋孝宗隆兴元年（1163年），分为三十一题，讲述炼丹注意事项。书中内容，大都在综合比较的基础之上写成，因而反映了南宋初年炼丹术的一般状况。该书尤为有价值之处在于它关于炼丹仪器设备的插图。这些插图，为后人了解炼丹家们所用设备的情况，留下了珍贵的史料。例如抽汞的蒸馏器图，就是该书首先绘制的。

元明以降，炼丹术衰微，相应著作也出现得比较少了，不过仍有一些炼丹术专著问世，例如《感气十六转金丹》、《九转灵砂大丹》、《庚道集》

等就是如此。甚至直到晚清，仍有《证道秘书》、《金火大成》等炼丹术著作刊印。当然，这段时期炼丹术著作的数量，比之唐宋时期，是大大下降了。

炼丹术一般系道士所为，炼丹术类著作也就理所当然被收入了《道藏》。我们上面所提，基本上都可在《道藏》中找到，而且只是《道藏》所收录的同类著作的一部分。另外，炼丹术作为一种文化现象，在各类古籍中都有所反映，研究炼丹史，对它们也不应忽视。

炼丹术类著作本身既反映了古人一定的科学知识，同时又包括大量长生求仙之类荒唐说教，加之道士们的故弄玄虚，使得这类书籍长期处于被冷落状态。要了解它们的真正价值，还需要做许多具体细致而又深入的研究工作。

音律类著作

音乐，在中国文化史上，具有特殊的地位。在古代，礼乐并重，班固《汉书·艺文志》引孔子话说：“安上治民，莫善于礼；移风易俗，莫善于乐。二者相与并行。”音乐在古代社会中的地位，由此可见一斑。

音乐要繁荣，必须有坚实的音律学知识的基础。由此，古人对音乐的重视，也就促进了相应音律知识的发展，促成了音律类著作的涌现。

在先秦时期，古人已经积累了相当丰富的音律学知识，但这些知识大都分布在有关书籍之中，没有专论音律的著作。例如，传统十二律的名称及其意义，最早是在《国语·周语》一书中得到阐发的；影响古代音律计算达两千年之久的三分损益法，具体内容则首见于《管子·地员》篇。而《吕氏春秋·季夏记·音律篇》，则详细记载了运用三分损益法计算十二律的具体过程，其《古乐》篇还记述了古人关于十二律起源的认识。在《吕氏春秋》、《礼记》等书中，对音律与节令、气候之关系，都有所论述。这些论述，构成了中国古代音律学说与天文密切相关的重要特点。在先秦古籍中，论述到音律知识的，还有很多，上引数种，仅是一些典型例子。

进入汉朝以后，音律知识广泛散布于各类书籍之中的情况，并未发生多大变化。实际上，在整个中国历史上，这种情况基本上都是存在的。例如《淮南子·天文训》是一篇天文学著作，但它却花相当大篇幅讨论音律理论，七声音阶就是在这本书中首先被提及的。

另一方面，也存在着大量音乐著作。班固在《汉书·艺文志》中记录了“乐六家百六十五篇”，从书名来看，这六家乐书的内容，主要是音乐艺术，并非从数学和物理角度专门讨论乐理的音律类著作。班固对当时的音乐状态有个评论，他说：“汉兴，制氏以雅乐声律，世在乐官，颇能记其铿锵鼓舞，而不能言其义。”这一评论，反映了当时音律知识的一般状况。

此外，班固在《汉书·艺文志》的“五行类”中，还记述了一些与音律有关的著作。把音律与灾异相联系的倾向，先秦时期亦有，到汉代表现得更严重了。

在中国历史上，司马迁作《史记》，开辟中国史书的新纪元。《史记》在音律类著作中，也有其独特地位，它首开以专章讨论音律之先例。《史记》的八书，“乐”、“律”占其二，重视程度，由此可见一斑。尤其是在“律书”部分，司马迁除了介绍有关音律计算的具体内容外，还以风和气为基础，对五声、十二律以及和历法相关的十干、十二支、十二月和二十八宿进行介绍，进一步加强了古人把历法和音律相对应的思想倾向。这套理论，为班固所继承，在《汉书》中得以发挥，变得更为系统化。班固将律、历合为一志，称为《律历志》，由此开始，奠定了音律学说在正史中不可动摇的坚固地位。至今我们要了解古人的音律知识，相当一部分内容都要到《二十五史》相应的《律历志》中寻找。

《汉书·律历志》的作用不但在于它开辟了正史中“律”、“历”合一论述的先例，而且还在于它的内容的权威性。在这篇“志”中，班固记载了王莽时由刘歆主持的“征天下通知钟律者百余人”所进行的考订音律和度量衡的工作。刘歆在这一工作完成之时，有一份“典领条奏”，详细论述了他们所认为的度量衡和音律的基本原理。班固认为这一“条奏”“言之最详，故删其‘伪辞’，取正义，著于篇。”刘歆的理论为后人所接受，这使得《汉

书·律历志》成为中国历史上最权威的音律著作之一。

除了正史中的《律历志》以外，古籍中还有许多专门的音律类著作。例如《隋书·经籍志》载录乐类著述四十二部一百四十二卷，其中绝大部分属于音乐艺术类，但其中也有诸如《乐律义》、《钟律义》、《黄钟义》之类看上去似与音律有关的著作。类似情况，后世亦然，例如《旧唐书·经籍志》“乐类”部分的载录，即与之相仿。

我国现存规模最大的丛书《四库全书》在收录图书时，对音乐类和音律类图书做了严格区分，音乐类收录于“子部·艺术类”，而音律类则收入“经部·乐类”。收入《四库全书》的音律类著作共有二十三部，四百八十三卷，它们基本反映了我国古代音律类著作的发展水平。

在《四库全书》收录的音律类著作中，南宋蔡元定所著的《律吕新书》，是成书时间较早而又比较重要的一部。该书分为上下两卷，上卷为“律吕本源”，共十三篇；下卷为“律吕辨证”，共十篇。蔡元定在此书中的贡献是：他在十二律的六个大半音之间各增加一个变律，使与次一律之间构成小半音关系，从而解决了古代十二律旋宫后的音程关系与黄钟宫调不尽相同的问题。这是宋代在律学上取得的一个重要成就，对后世有一定影响。不过，蔡氏此书定性讨论多，定量讨论少。《四库全书简明目录》说该书“大旨皆拘于古法，而不通算术候气之说，尤万不可行。”这一评价，有些偏颇，但说该书“不通算术”，也并非完全无的放矢。

与《律吕新书》相比，明代朱载堉的《乐律全书》，在书的篇幅和内容上，都远远胜过了前者。朱载堉毕生潜心钻研乐律、历算等，《乐律全书》是他的代表作。该书汇集了他的一些重要著作，《四库全书简明目录》评价说：“书凡十种，大旨括于《律吕精义》一书，与蔡元定说多所异同，而特有心得。所见较元定为深，盖空谈、实算之别也。”这一评价是很有见地的，我们可以毫不夸张地说，《乐律全书》的一些内容，代表了中国古代音律知识发展的最高水平。

《乐律全书》汇集了朱载堉十余种著作。该书从万历二十四年（1596年）到三十四年（1606年）雕版印刷完毕，费时十年。书的内容涉及音律学、数学、天文学、物理学、计量学、乐器制作、乐器考古、音乐、舞蹈、绘画、诗歌、哲学等，反映了朱载堉的多项科学成就，是我国科学史和艺术史上的一部光辉巨著。其中的《律学新说》、《律吕精义》二书，在科学史上地位尤其重要。因为在音律学上极为重要的十二平均律，就是在这两本书中提出来并得到详尽阐发的。《律学新说》成书于1584年，朱载堉在书中提出了他称之为“新法密率”的十二平均律。后来，他在《律吕精义》（成书于1596年）中又做了进一步阐释，通过精密计算和实验，说明了他的“新法密率”，这是音乐史上最早以等比级数平均划分音律、系统阐明十二平均律理论的声学论著。

到了清代，音律学著作涌现更多。其中影响最大的当推康熙皇帝“御定”的《律历正义》一书，该书是康熙“御撰”《律历渊源》的第三部。嗣后，乾隆皇帝又步其祖之后尘，“御制”《律吕正义后编》一百二十卷。这两部皇帝“钦定”的音律学著作，为整个清代音律学知识的发展定下了基调。

在清代音律学著作中，江永所撰十卷本《律吕阐微》一书应予一提。《四库全书简明目录》评价说，“其著书大旨，则以郑世子（按：指朱载堉）乐书为宗，惟方圆周径用密率起算，与之微异。”在康熙、乾隆两位皇帝竞相

对朱载堉十二平均律横加指责情况下，《律吕阐微》一书居然以“郑世子乐书为宗”，而且还能补正朱载堉音律理论的个别不足，也是难能可贵的。

律历之学，在古代历来被视为一门高深学问，当代学者许多人也都视其为畏途。本文的介绍，也难免有挂一漏万、隔靴搔痒之虞。要全面把握古代的音律学著作，还需要更多的人投入更多的劳动。

重要人物

墨子

墨子名翟，是战国时期著名的思想家、社会活动家，墨家学派的创始人。

由于文献的不足，墨子的生平很难考证。早在司马迁作《史记》时，墨子的身世已经不为人们所知，司马迁访古探幽，旁搜远绍，博集史料，仍然无法为墨子单独立传，只能在《孟子荀卿列传》之后为他附上一笔：

“盖墨翟，宋之大夫，善守御，为节用。或曰并孔子时，或曰在其后。”

近现代一些国学大师们经过详细考据，辨往证来，为墨子的身世画出了一个粗轮廓：墨子为宋国人，曾长期居住于鲁国（有不少学者直接认为墨子就是鲁国人）。其活动时间大致在孔子卒（前479年）后，吴起死（前381年）前。他平生“上无君上之事，下无耕农之难”（《墨子·贵义》），既未当官，也不务农，大概是一位职业社会活动家。

墨子的身世虽然迷离难辨，但他的政治主张、社会理想却历历在目，清晰昭彰。这主要是由于墨家学派给我们留下了一部充分表达了他的思想观点的学术巨著——《墨子》一书。

《墨子》原有七十一篇，现存五十三篇。其中《经上》、《经下》、《经说上》、《经说下》四篇合起来称为《墨经》，亦名《墨辩》。后来又加上《大取》、《小取》，仍称为《墨辩》。《墨辩》概括了墨家关于认识论、逻辑学以及自然科学方面的研究成果。一般认为，《墨子》这部书，不必一定为墨子所著，但它的确反映了墨子本人的社会理想和政治主张。不过其中的《墨辩》六篇，成书时间则要晚一些，是经过长期积累，逐渐形成的，表达的是墨子后学的学术见解。

从现存的《墨子》一书来看，墨子的思想核心是“利天下”（取黄世瑞博士之说）。墨子志在救世，故崇尚功用，处处以“兴天下之利、除天下之害”为宗旨，努力求取“万民之大利”。为实现这一目标，他提出了自己的十大政治主张，或曰十大政纲，即“尚贤”、“尚同”、“兼爱”、“非攻”、“节用”、“节葬”、“天志”、“明鬼”、“非乐”、“非命”，试图以此来解决“饥者不得食、寒者不得衣、劳者不得息”（《墨子·非乐上》）这些社会问题。墨子的动机，无疑是高尚的。但他的这些主张，却常常引起非议，这里不去多说。

在提出十大政纲之后，墨子还考虑了它们的施行，强调要“择务而从事”，因地制宜。他说：

“凡入国，必择务而从事焉：国家昏乱，则语之尚贤、尚同；国家贫，则语之节用、节葬；国家寤音湛涵，则语之非乐、非命；国家淫僻无礼，则语之尊天、事鬼；国家务夺侵袭，即语之兼爱、非攻。故曰择务而从事焉。”（《墨子·鲁问》）

由此可见，所谓“择务而从事”，就是针对每个国家的不同情况，有选择地提出切中时弊的施政方针。这表明墨子的十大政纲，是有的放矢，针对当时社会具体情况而提出的。

墨子提出这些主张，与他重视“类”的概念这一思想方法有关。上述引文，显然是他对当时国家进行分类的结果。《墨子》书中多次出现“类”这一具有方法论意义的重要概念，例如，“入人之国而与人之贼，非义之类也。”

(《墨子·非儒下》)“义不杀少而杀众，不可谓知类。”(《墨子·公输》)等等。重视分类，这是一种有益于科学进步的思想方法。

墨子除了提出“类”的概念外，还重视“故”，主张凡事要“察其类”、“明其故”。他在论辩中批驳别人对他的观点的误解时说：“子未察吾言之类，未明其故者也。”(《墨子·非攻下》)这就表现了他的这一思想方法。重视分类，这是一种解析型思想方法；强调求故，则是对因果链的探寻。这些，都是很可宝贵的科学思维习惯。

墨子不但具有科学的思想方法，他本人在具体技术方面也有很深造诣。

《韩非子·外储说左上》有一条材料记载说：“墨子为木鸢，三年而成，蜚一日而败。”蜚同飞。在当时条件下，人造木鸢居然能飞一天，这未免过于夸张。由此，这一条记载的可信性，亦成问题。不过，由这一条我们可以看出，在当时人们心目中，墨子具有高超的手工技巧，这是可以肯定的。

但是，墨子并不以此自豪。他是一个实用主义者，不主张去耗费精力研制飞鸢这类无益于世的器物。因此，当其弟子称赞他说：“先生之巧，至能使木鸢飞”时，他回答说：“不如为车輶者巧也。用咫尺之木，不费一朝之事，而引三十石之任，致远力多，久于岁数。今我为鸢，三年成，蜚一日而败。”(《韩非子·外储说左上》)实际上，制作车輶，不需要什么高超技术，但墨子认为它有益于世，因而认为即使“能使木鸢飞”，亦“不如为车輶者巧也”。

墨子把他的这些技术作为实行“非攻”政治主张的手段而加以运用。据记载，有一次楚国要打宋国，并请公输般制造了一批攻城器具，墨子听说后，从鲁国动身，日夜兼程，赶往楚国。走了十日十夜，到了楚国，说服了楚王，还“解带为城，以牒为械”，与公输般演习使用器械的攻守战法。“公输般九设攻城之机变，子墨子九拒之。公输般之攻械尽，子墨子之守圉有余，公输般诎。”(《墨子·公输》)公输般即通常所说的鲁班，素以技艺高超闻名，居然输于墨子，这表明墨子的确具有非同一般的机械制作技艺。

在《墨子·备城门》以后诸篇中，墨子精于机械制作的特征得到了充分表现，那里通篇都是记载的如何运用器械守御城池。其中特别值得一提的是，《备穴》篇中介绍如何防止敌方挖地道攻城，其中非常巧妙地利用了固体传声原理。这些内容，在中国机械史和物理学史上具有重要地位。正是由于这些因素的存在，使得墨子当之无愧地成为先秦诸子中科技造诣最深者。

墨子虽然具有较高的科技素质，但他并不以发展科技为己任，他的所有活动都围绕着一个目的——实现其社会理想。为此，他孜孜不倦，到处奔波，“摩顶放踵，利天下为之。”(《孟子·尽心》)非但如此，他还创立了墨家学派，用以推行自己的政治主张。墨家学派是一个有严格纪律的政治团体，参加者必须遵循墨家学说，否则就不承认他是墨者。《淮南子·泰族训》说：“墨子服役者百八十人，皆可使赴火蹈刃，死不还踵。”在当时，墨学与儒学并重，“世之显学，儒墨也。”(《韩非子·显学》)很是引人注目。

墨子逝后，墨学开始分化。一部分人继续墨子兼爱非攻摩顶放踵利天下之行为，行侠仗义，纵横于各大国之间，是为任侠派。另一部分人则起而捍卫墨家学说，在与诸子百家的争鸣中，举譬引喻，辩是论非，发展成了谈辩派。谈辩派后来又一分为二，“倍谲不同，相谓别墨”(《庄子·天下篇》)，都自诩本派为正宗墨家。《韩非子·显学》说：“自墨子之死也，有相里氏之墨，有相夫氏之墨，有邓陵氏之墨。故孔墨之后，儒分为八，墨离为三，

取舍相反不同，而皆自谓真孔墨；孔墨不可复生，将谁使定后世之学乎？”韩非所云，就是当时学术分化的具体情形。

真正使墨家名扬科学史的是墨子后学中的谈辩派。这一派在与儒家和其他学派的论战过程中，发展了争辩艺术，并编定了作为论辩武器和指导方针的《墨经》。《墨经》既是论辩思潮的产物，又服务于墨家谈辩派的论辩实践，它就不得不在名辞概念逻辑等方面下功夫。在这些方面发展的结果必然有助于促进科学进步，这是不言而喻的。非但如此，《墨经》还把论战中为阐释墨家学说而作的譬喻扩大到对整个自然界和社会上一些事物的定义。为了在争辩中言之有据，对所涉及的自然现象就要有所研究，甚至要进行观察和实验。这样，《墨经》就概括了墨家关于认识论、逻辑学以及自然科学诸多方面的研究成果，其中包含了系统的关于数学、力学和光学等方面的知识，这在先秦诸子的著作中，是绝无仅有的。《墨经》的科学思想，走在了那个时代的前面。

但是，秦汉以降，墨学衰微，作为独立之学派，墨家已不复存在。《墨经》由于收入《墨子》一书，得以保存至今。但在长达两千多年的岁月流逝中，《墨经》由于其文字的艰涩，编排方式的奇特，使人们难于把握它的意思。这样，在古代科学发展过程中，《墨经》并未发挥它应有的作用。一直到了近现代，人们才逐渐揭开笼罩在迷雾之中的《墨经》上的面纱，恢复了它的本来面目，从而为了解墨家学派的科学思想，提供了第一手资料。

刘 安

刘安（前 179—前 122 年），西汉时思想家、文学家，汉高祖刘邦之孙。其父刘长，是刘邦的少子，曾被封为淮南厉王，汉文帝时以谋反得罪，在流徙途中绝食而死。后来，因文帝不愿背上骨肉相残的罪名，于是把厉王长的封地一分为三，分别封给长的三个儿子。刘安是刘长的长子，被封为淮南王，封地在今安徽淮河南岸的寿县、淮南市一带。汉武帝时，刘安因“谋反”事发，被迫自尽，时当武帝元狩元年（前 122 年）。

关于刘安的身世，《史记》及《汉书》中均有记述，而以《汉书·淮南衡山济北王传》记载尤详：

“淮南王安为人好书、鼓、琴，不喜弋猎狗马驰骋。亦欲以行阴德拊循百姓，流名誉。招致宾客方术之士数千人，作为《内书》二十一篇，《外书》甚众。又有《中篇》八卷，言神仙、黄白之术，亦二十余万言。时武帝方好艺文，以安属为诸父，辩博善为文辞，甚尊重之。每为报书及赐，常召司马相如等视草乃遣。初，安入朝，献所作《内篇》，新出，上爱秘之。使为《离骚传》，旦受诏，日食时上。又献《颂德》及《长安都国颂》。每宴见，谈说得失及方技赋颂，昏暮然后罢。”

可见，刘安是一个儒生型人物，富有才华。他曾受诏作《离骚传》，日出奉旨，早饭时就写好了。汉武帝每当宴见他时，总要与他说古道今，讲丹论道，讨论文学，直到日暮方休。武帝给他写诏书时，常常请当时的文学大家司马相如等先看草稿，润色修改，然后才派人送去。这自然是担心诏书中词语不雅，怕被刘安讥笑。由此，刘安的文采，在当时是公认的。

但是，刘安对古代学术史的贡献主要不在于他的文学才华，而在于他的学术活动和学说思想。他身居淮南王之位，又有文才，喜好典籍，这就使得他有条件组织大规模的学术活动。据史籍记载，他曾招致宾客方术之士数千人，著书立说。这些人士大都是江淮地区的知识分子，其中著名的有苏飞、李尚、左吴、田由、雷被、毛被、伍被和晋昌等人，号称“八公”。据传刘安和他们常聚集在淮南八公山一带，炼丹讲道。八公山即因此而得名。

刘安等人的炼丹实践在中国炼丹史上具有重要地位。在中国，古人追求长生不老的活动起源很早。在先秦，就兴起过神仙说，人们热衷于寻找长生药。后来，又出现了人工炼制丹药的活动，这一活动在汉武帝时达到高潮。刘安为首的淮南学派，是促成这一高潮的重要力量。他们的炼丹活动和规模非常引人注目，以致于当刘安因“谋反”罪被迫自杀，并牵连很多宾客被诛后，在当时及后世的传说中，人们还认为他们并非死于刀刃，而是“白日升天”的。还有“刘安得道，鸡犬升天”的说法，认为刘安升天后，盛放在丹鼎中的“仙药”被鸡犬吃了，鸡犬也随之升天成仙。透过这些传说，可以看到刘安等人炼丹活动的影响之大。他们是我国重要的早期炼丹家。

刘安及其宾客们不仅投身于炼丹实践，而且热衷于著书立说，将其炼丹体会形诸于笔墨。《淮南王传》说他“又有《中篇》八卷，言神仙黄白之术，亦二十余万言”。这在中国化学史上，是成书甚早的重要炼丹术专著。可惜的是本书早已佚失，我们无法从中了解刘安等人所掌握的化学知识。清代学者从《太平御览》等书中辑有《淮南万毕术》一书，可能保留了其中部分内容。但也只是部分而已，无从窥其全貌。

刘安等人著述甚多，《淮南王传》中除了提及《中篇》八卷外，还提到

“作为《内书》二十一篇，《外书》甚众。”《汉书·艺文志》中也著录了他们的大量书目。只是这些著作多数早已佚失，现存的仅有《淮南子》二十一卷，即《淮南王传》中所说的内书二十一篇。《淮南子》这个名称始见于《隋书·经籍志》，在汉代则称之为《内篇》、《淮南》或《淮南鸿烈》。东汉高诱在《淮南注·序》中说：“此书……大较归之于道，号曰《鸿烈》。鸿，大也；烈，明也，以为大明道之言也。”并说，“刘向校定撰具，名之《淮南》。”这是说的《淮南子》和《淮南鸿烈》这两个名称的由来。至今这两个书名仍然并称于世。

《淮南子》是一部重要的哲学著作，它表述的是刘安等人的哲学见解、社会主张、政治思想等，其中也涉及大量科学问题，反映了刘安等人的科学水平，在科学史上具有十分重要的历史地位。

例如，在宇宙生成演化问题上，先秦时期人们大都认为宇宙是逐渐生成演化而来的，但这些认识基本停留在观念阶段，未形成理论。这一局面在《淮南子》一书中得到了改变。《淮南子·天文训》说：“天地未形，冯冯翼翼，洞洞 ，故曰太昭。道始于虚霫，虚霫生宇宙，宇宙生气。气有涯垠，清阳者薄靡而为天，重浊者凝滞而为地。清妙之合专易，重浊之凝竭难，故天先成而地后定。天地之袭精为阴阳，阴阳之专精为四时，四时之散精为万物。积阳之热气生火，火气之精者为日；积阴之寒气为水，水气之精者为月；日月之淫为精者为星辰。”这段话，把古人气化万物的学说系统化、具体化了。它与《俶真训》、《精神训》有关内容一起，构成了中国古代早期系统的宇宙演化理论。《淮南子》中的宇宙学说，在古代宇宙演化理论的发展史上，具有承前启后的重要历史地位。

《淮南子·天文训》是一篇重要的天文学史文献，它除了反映淮南学派关于宇宙生成演化的认识以外，还涉及到日月五星运动、二十八宿分布、二十四节气划分、干支纪年法的运用、一些重要天象以及观测天象、测定方向等的仪器和方法，等等。这些内容，都是十分重要的，具有很高的科学史价值。

在《淮南子·精神训》一篇中，刘安等记载了“日中有踰乌”的现象，这是我国有关太阳黑子的较早的记录之一。《齐俗训》中则提到一种在杆子上系上布帛，通过观测布帛的飘动以测定风向的风向标。《本经训》说：“风雨之变，可以音律知之”；《说山训》说：“悬羽与炭，而知燥湿之气”；《天文训》说：“燥故炭轻，湿故炭重。”这些，反映了当时人们已经知道空气湿度变化，会引起一些事物相应物理性能变化，并掌握了根据这些变化反过来大致判定空气湿度的方法。

《淮南子》中反映出的古代物理学知识十分丰富。《天文训》中记载阳燧取火，说：“阳燧见日，则燃而为火。”阳燧，是四面镜，可以对日反射，聚焦取火。《说林训》进一步指出：“若以燧取火，疏之则弗得，数之则弗中，正在疏数之间。”“疏”和“数”分别表示“远”和“近”。这句话意思是说：用凹面镜对日聚焦取火，火煤离镜面不能太远，也不能太近，而应当放在适当的位置。这表明当时人们在经验中已经隐约有了“焦距”概念，这是光学史上的新进展。另外，《修务训》中提到：“明镜之始下型，朦然未见形容。及其粉以玄锡，摩以白旃，鬢眉微毫，可得而察。”这里记述的铜镜抛光工艺，是我国目前所能见到的关于铜镜抛光工艺的最早记载。

在力学方面，《淮南子》还讨论了机械运动，指出了作用力与重物运动

的关系，提到力的作用点的重要性和合力概念，并总结了重心与平衡的关系，认识到“下轻上重，其覆必易”这一规律。在测量理论方面，《说林训》提出：“水虽平，必有波；衡虽正，必有差；尺寸虽齐，必有诡。”明确认识到在测量中误差不可避免，这是古人在误差概念上获得的一个重要进展。

《淮南子》在地学、生物、农学、化学等诸多方面也都有所涉及。例如《天文训》说：“地不满东南，水潦尘埃归焉。”明确指出我国地势西北高而东南低，因而东南成为河流所挟泥沙的主要流向和归宿。《主术训》指出：“肥磽高下，各因其宜；丘陵阪险不生五谷者，树以竹木。”这是一种以营造林木来防治土壤侵蚀的方法，至今仍在水土保持实践中发挥着作用。《说林训》说：“人食瀕而死，蚕食之而不饥。”瀕是古“汞”字，汞一般是从丹砂冶炼而来，淮南王等人在炼丹实践中认识到，人服食汞是会致命的，但汞却可以治蚕病。所有这些知识，都为我国古代科学的初期发展做出了一定的贡献。

《淮南子》一书蕴含着古人丰富的科学知识，它的撰成，为刘安及其淮南学派在中国科学史上占据一席之地，奠定了坚实基础。

京房

京房（前 77—前 37 年），西汉学者，本姓李，字君明，东郡顿丘（今河南清丰西南）人。

京房之所以驰名于中国学术史，是由于他开创了今文《易》学“京氏学”。《易》作为中国学术源头之一，研求者代不绝迹，京房是其中颇有影响的一位。京房的《易》学得之于焦延寿。焦延寿讲《易》，喜推灾异，以自然灾害解释卦象，推衍人事。《汉书·京房传》概括焦延寿的学术道：“其说长于灾变，分六十卦更值日用事，以风雨寒温为候，各有占验。”汉代《易》学流变为术数，焦延寿是始作俑者。

京房从焦延寿学《易》，深得焦氏《易》学“真谛”。他把焦延寿以灾异讲《易》的做法推向极端，到处宣讲，以之干政，使《易》学此一流派在当时声名显赫，对后世影响极大，以致人们把这一流派称之为今文《易》学“京氏学”。焦延寿大概看出了京房以《易》干政的危险性，曾不无忧虑地说：“得我道以亡身者，京生也。”（《汉书·京房传》）最后结局果然不出焦氏所料。

把灾异与政治相联系，这种作法并非始于京房。京房的“创新”在于，他把这种联系置于《易》学框架之内，从而令人耳目一新。但灾异与政治之间并无因果联系，要想以讲灾异干政，就必须对当时政治、经济、军事、外交等方面格局有一定了解，洞察其发展变化趋势，能够做出比较准确的预测，再把这些预测与自然灾害、反常天象结合起来，才能为人们所接受。京房不乏这方面能力。汉元帝初元四年（前 45 年），他走上仕途，不久，“西羌反，日蚀，又久青，亡光，阴雾不精（清）。”京房趁此机会，“数上疏，先言其将然，近数月，远一岁。所言屡中，天子说之。”（《汉书·京房传》）通过讲灾变的方法，京房获得了元帝的信任。

京房讲灾异的目的在于干政，推行自己的政治主张。由此，当汉元帝召见他时，他就趁机对元帝宣讲自己的见解，说：

“古帝王以功举贤，则万化成，瑞应著；末世以毁誉取人，故功业废而

致灾异。宜令百官各试其功，灾异可息。”（《汉书·京房传》）

元帝被京房的见解所打动，“诏使房作其事，房奏《考功课吏法》，上令公卿朝臣与房会议温室，皆以房言烦碎，令上下相司，不可许。”（《汉书·京房传》）京房提出《考功课吏法》，没料到在百官面前碰了壁，被搁置起来。当时，“中书令石显专权，显友人五鹿充宗为尚书令”（同上），二人把持朝政，与京房有矛盾。京房想除掉他们，在一次元帝宴见他时，趁机下说词，他先讲了一通帝王任人不当，会造成天下大乱，灾异横生，然后指出：

“《春秋》纪二百四十二年灾异，以视万世之君。今陛下即位以来，日月失明，星辰逆行，山崩泉涌，地震石陨，夏霜冬雷，春凋秋荣，……《春秋》所记灾异尽备。”（同上）

他进一步指出：之所以出现这种情况，就是用人不当所致。这些话，危言耸听，令元帝悚然心动，连忙向京房打听错用的是谁，京房趁机提出：“上所信任，与图事帷幄之中，进退天下之士者是矣。”把石显端了出来。由此，石显、五鹿充宗等对京房更心怀怨恨。这次京房提出《考功课吏法》，遭到官员们反对，皇帝让京房推荐其“弟子晓知考功课吏事者，欲试用之”，石显等人趁机上疏，提出“使弟子不若试师”，试图把京房排挤出朝廷中枢。

元帝接受了石显等的建议，“以房为魏郡太守，秩八百石，居得以考功法治郡。”（《汉书·京房传》）京房离京后，石显等借机罗织罪名，最终竟将其置于死地。

在以灾异干政方面，京房失败了，但他发展出的这套理论，在中国历史上却影响甚大。中国人重视观察、记录异常天象和自然灾害，与这种思想方法不无关系。中国古代天文学有一重要特点：重视天象观测、记录。这一特点的形成，就是由于天人感应思想和京房这套灾异论影响的结果。

京房既要讲灾异，就要观察、了解灾异，这使得他有可能做出一些在科学史上比较重要的发现。例如，《开元占经》卷九“日食而珥有云冲”一节记载京房的话说：

“日以甲乙有四珥而蚀，有白云冲出四角，青云交贯中央。”

日珥是日面上不时发生的火焰状喷出物，一般情况下难以看见，日食时则较易于观察到。早在战国时代，甘德、石申就曾注意到日食时日面边缘有群鸟或白兔那样的东西，那就是日珥。京房则注意到日全食时有时可见到好几个日珥。引文中他所说的是四珥，在同一节中还提到过二珥、三珥的情形。另外，这里所说的“有白云冲出四角”，指的是日全食时有时有白云从日面边缘向四面冲出的情景，这应当是指日冕。有的日冕呈射线状，因而有“冲出”的感觉。描述日冕的文字，此前并不多见。由此，京房的观测非常珍贵：他的描述是准确的，而且在时间上也相当早。

在科学史上，京房的地位还得益于他的音律学造诣。《京房传》说他“好钟律，知音声”，并非夸张之辞。他“本姓李，推律自定为京氏”（《汉书·京房传》），遂以京为姓。这件事充分表明了他对音律的迷恋。

在音律理论方面，京房把传统的十二律扩展成了六十律。在此之前，人们采用三分损益法计算十二律，用这种方法，当生到第十一次（即第十二律）后，不能回到出发律上，使得十二律不能周而复始。对此，京房采用了扩展十二律的解决办法。根据传统的三分损益法，黄钟生林钟，林钟生太簇，太簇生南吕，……这样依次相生，最后是无射生中吕，就得到了十二律。京房则从中吕起继续往下生，直到六十律为止。其实，六十律并非京房的发明，《后汉书·律历志》明确记载汉元帝派人向京房问律，“房对受学故小黄令焦延寿六十律相生法”。由此，六十律是焦延寿之所为，京房的作用在于把这一方法介绍给了社会。

采用六十律相生法，当升到五十三次（即第五十四律）时，已与出发律极为相似，可以周而复始了。可是，焦延寿、京房为使律与历相结合，一定要凑成六十这一整数，使得“以六十律分期之日，黄钟自冬至始及冬至而复。”（《后汉书·律历志》）这当然是牵强附会。而且这种定律法在演奏实践和乐器制造方面都有困难，因而无实用价值。这种定律法的价值在于理论上给人们指出了一种可能性：可以通过极微小的音差来变换音律。

京房在乐器改良方面也做出了贡献。过去，笛不用商，只有四孔，对应于宫、角、徵、羽。京房加商于笛，合成五音。他加孔置笛后上部，便于按指吹奏。这一做法一直沿用至今。

京房的另一成就是发明了一种由十三根弦组成的称为“准”的定律器。《后汉书·律历志》记载了京房发明“准”的缘由及“准”的具体形制：

“房又曰：竹声不可以度调，故作准以定数。准之状如瑟，长丈而十三弦，隐间九尺，以应黄钟之律九寸。中央一弦，下有画分寸，以为六十律清浊

之节。”

在“准”发明之前，音律标准器主要由竹子制成，但竹管充当标准器，有其不足之处，即“竹声不可以度调”，很难通过调节它的长度来审音。由此，京房发明了“准”，“准”的结构原理类似于瑟，它有十三根弦。我们知道，瑟的一弦一柱，其清浊全凭移柱来定。现在“准”的十三弦亦各有柱，可以通过移柱调整各弦振动频率。京房以合于黄钟管音的中弦为其余十二弦的准则，由于其余诸弦粗细相同，张力相等，因此就可以用它们的长度来审音。

《后汉书·律历志》对此总结说：“均其中弦，令与黄钟相得，案画以求诸律，无不如数而应者矣。”

京房改管为弦作为定律器，还有另一目的：用以证其六十律。把音律学理论与乐器改造相结合，这种努力应予肯定。

《后汉书·律历志》在介绍京房的音律学见解时说：“房言律详于歆所奏，其术施行于史官，候部用之。”我们知道，王莽托古改制，曾指派刘歆组织精于律历学者讨论度量衡音律之事，后来刘歆把他们讨论结果呈报皇帝，此即史书上所谓的刘歆“典领条奏”。现在，京房“言律详于歆所奏”，这一评价表明，京房的音律学造诣及贡献的确很高。他在科学史上占有一席之地，是应该的。

王充

王充（27—97年），东汉著名思想家。著有《论衡》一书。该书反对谶纬神学，具有批判精神，富含科学内容，至今仍享誉于世。

王充字仲任，会稽上虞（今浙江上虞）人。他祖籍魏郡元城（今河北大名县），其先祖国军功被封于会稽（郡治在今江苏苏州）阳亭，“一岁仓卒国绝，因家焉，以农桑为业。”（《论衡·自纪篇》）他的曾祖父好勇任气，横行乡里，得罪了不少人。用王充自己的话说：“岁凶，横道伤杀，怨仇众多。”（同上）为此，祖父王汎徙家避仇，迁居钱塘（今浙江杭州），“以贾贩为事”（同上）。避居钱塘之后，王家任气之风不改，王充的父亲王诵和伯父王蒙尤甚，“蒙、诵在钱塘，勇势凌人，未复与豪家丁伯等结怨，举家徙处上虞。”（《论衡·自纪篇》）

汉光武建武三年（27年），王充出生。他自幼聪明好学，胸怀远志，颇得邻里好评：“六岁教书，恭愿仁顺，礼敬具备，矜庄寂寥，有巨人之志。父未尝笞，母未尝非，闾里未尝让。”（同上）让，责备也。《后汉书·王充传》说他“少孤，乡里称孝。”可见，王充幼时已经享誉乡里，这与其祖辈任侠使气之风截然不同。成年后，他前往京师洛阳，入太学，“师事扶风班彪，好博览而不守章句。家贫无书，常游洛阳市肆，阅所卖书，一见辄能诵忆，遂通众流百家之言。”（《后汉书·王充传》）

从洛阳返回后，因仕进无路，王充过着“屏居教授”的生活。中年曾任县及都尉府的掾功曹，后入州为从事，皆为吏属性小官。后因不愿与世俗、官僚同流合污，“数谏争，不合”，自动离官。离官后，“闭门潜思，绝庆吊之礼，户牖墙壁，各置刀笔，著《论衡》八十五篇，二十余万言，释物类同异，正时俗嫌疑。”（《后汉书·王充传》）元和三年（86年），王充举家辟诣扬州，“刺史董勤辟为从事，转治中。”（同上）在任期间，他忙于事务，“笔札之思，历年寝废”（《论衡·自纪篇》），顾不上著书立说了。时间一长，自己感觉不能适应，于是辞官家居。后来，他的朋友谢夷吾给皇帝上书，推荐王充，说：“充之天才，非学所加，虽前世孟轲、孙卿，近汉扬雄、刘向、司马迁，不能过也。”（《后汉书·王充传注》）于是，汉章帝特派公车召征，但他因病未能成行。岁月流逝，王充“年渐七十，志力衰耗，乃造《养性书》十六篇，裁节嗜欲，欲颐神自守。永元中，病卒于家。”（《后汉书·王充传》）

王充生活的时代，正是谶纬迷信和神学目的论泛滥的时代。所谓谶纬，是起源于西汉时的一种社会思潮，它以解经的方式，编织预言，制造舆论，为一定的政治目的服务。汉光武帝刘秀在夺取天下的斗争中，曾利用了谶纬，他当上皇帝之后，就颁图谶于天下，使谶纬进一步泛滥。神学目的论也是当时社会上颇为流行的一种学说，这种学说认为地上万事万物都是上天有意识地创造的。王充在闭门著书期间，认真思考了这些思潮，称其为“伪书俗文”、“虚妄之言”，对之进行了严肃的剖析、批判。这集中体现在他的《论衡》一书。

在《论衡》书中，王充对他的写作动机有清晰的说明：“伤伪书俗文，多不实诚，故为《论衡》之书。”（《自纪》）“是故《论衡》之造也，起众书并失实、虚妄之言，胜真美也。”（《对作》）正是在这种动机引导下，“疾虚妄”、（《佚文》）扬真美，成了《论衡》的基本内容。

在王充视为“伪书俗文”、“虚妄之言”中，有许多是对自然现象的解说。这些解说大都是从讖纬迷信和神学目的论直接引申出来的，要批判它们的荒谬，就必须对这些问题作出正面解答。另外，在论说过程中，王充也需要引用一些自然科学知识，以加强自己的说服力。这些，都迫使他涉足于自然科学的广阔领域，这使得《论衡》一书涉及大量自然科学问题，奠定了它在中国科学史上的地位。

王充的自然科学见解，有许多是直接为驳斥讖纬迷信和神学目的论而阐发的。例如：为驳斥“雷电为天怒”（《龙虚》）、“罚阴过”（《雷虚》）之说而作雷电论；为驳斥“子胥恚恨，驱水为涛”（《书虚》）的传书之言，而作月生潮汐说；针对“雨者，天喜也”（《雷虚》）的说法，考察了云雨发生的自然机制；针对“天雨谷，鬼夜哭”（《感虚》）的说法，对天雨谷的现象作了科学的考察与解释；针对“虫食谷者，部吏所致也”（《商虫》）的说法，考察了昆虫的生活条件与生活史；申物种变异说以驳瑞应；申物种说以驳“禹母吞薏苡以生禹”（《谴告》）之类谬论；申元气自然论以说明天地万物的生长发育，以批驳神学目的论，等等（参见陈美东，“王充和自然科学”，《科技史文集》，第14辑，上海科学技术出版社，1985年版）。正是在同讖纬迷信和神学目的论的斗争过程中，王充深入钻研了一些相关的科学问题，提出了大量在当时来讲颇为可贵的科学见解，从而使得他作为科学家而名载史册。

另一方面，在《论衡》中，王充为论证自己的哲学观点，还广泛运用一些自然科学上的例子，从而使得他的这部著作记载了大量当时人们熟知的科学知识，为后人保存了可贵的史料。例如，他在论证人的才能德行决定于后天的教育和环境的影响时，就曾引述说：“蓬生麻间，不扶自直；白纱入缁，不染自黑。此言所习善恶，变易质性也。”（《程材》）这里就涉及植物学和染色技术知识。在论证为政者需要举贤荐士时，他举例说：“夏育，古之多力者，身能负荷千钧，手能决角伸钩，使之自举，不能离地。”（《效力》）这一引喻涉及到物理学知识。在说明“贤儒之才，仕宦不进”这一奇怪现象时，他引用以针穿物为喻，说：“针锥所穿，无不畅达。使锥末方，穿物，无一分之深矣。贤儒方节而行，无针锥之锐，固安能自穿，取畅达之功乎？”（《状留》）这里则涉及到物理学上有关压力和压强的知识。《论衡》中此类例子很多，这表明王充对科学技术知识还是比较注意和熟悉的。

王充所以在科学史上占有重要地位，不仅由于他的卓越的科学见解和丰富的科学知识，也还在于他的科学的思想方法。他写《论衡》，以“疾虚妄”为己任，为此，他提出自己的研究方法：

“论则考之以心，效之以事。虚浮之事，辄立证验。”（《对作》）

这段话包含两层意思，一是立论要严谨，要合乎逻辑。王充的著作，读起来说服力很强，原因就在于他很注意逻辑的严密。另一是注重证验，这一点王充曾多次强调，他说：“事莫明于有效，论莫定于有证。”（《薄葬》）“凡论事者，不引效验，则虽甘义繁说，众不见信。”（《知实》）重视逻辑和证验，这是有利于科学发展的思想方法。

另一方面，王充思考问题，喜欢从量的角度着眼。他不是数学家，数学水平一般化，例如他在计算所谓九州的大小时说：“案周时九州，东西五千里，南北亦五千里，五五二十五，一州者二万五千里。”（《谈天》）实际上，若按他提供的数字，一州应为二千五百万平方里。这表明了王充在数学

计算上的粗枝大叶。但是，作为哲学家，王充却相当注意物质在量上的差异。例如他在批判所谓“人君能致寒温”的说法时，就从人和天的大小悬殊着眼，说：

“夫寒温，天气也。天至高大，人至卑小。篙不能鸣钟，而萤火不能爨鼎者，何也？钟长而篙短，鼎大而萤小也。以七尺之细形，感皇天之大气，其无分铢之验，必也。”（《变动》）

又如，他在批判所谓卜筮者通于天地的谬说时，也是从人和天地的大小悬殊着眼的，他说：

“人在天地之间，犹虬虱之著人身也。如虬虱欲知人意，鸣人耳傍，人犹不闻。何则？小大不均，音语不通也。今以微小之人，问巨大天地，安能通其声音？天地安能知其旨意？”（《卜筮》）

再如，他在《论衡·感虚篇》中说：

“夫燠一炬火，爨一镬水，终日不能热也；倚一尺冰，置庖厨中，终夜不能寒也。何则？微小之感，不能动大巨也。”

这类例子可以举出很多。这表明，王充注意到了从量的差异方面去把握物质间的相互作用关系。这种思想方法，在中国古代是可贵的。

王充不是超人，他的思想方法中也有片面性。例如他用元气自然论批判神学目的论，固然有说服力，但在某种程度上又陷入偶然论的错误之中。他的科学见解也有落后于时代之处，例如他反对“日食，月掩日光”这样的正确见解，就是一例。这类错误也并非仅此一例。但是，瑕不掩瑜，就总体而言，王充在自然科学方面的成就，他在探索自然奥秘时形成的科学的思想方法，是主要的。他在中国哲学史和科学史上占有崇高地位，是没有异议的。

狐刚子

狐刚子，名狐丘，又称胡罡子、狐罡子（参见唐梅彪撰《石药尔雅》），大约是公元120年到200年间人，生活于东汉桓帝、灵帝、献帝时代，与同时代的魏伯阳似有师生关系，是东汉末年颇有影响的炼丹家。据明《正统道藏》中诸外丹经的记载，狐刚子的著述有《五金粉图诀》（又称《粉图经》、《粉图》）、《五金诀》、《狐刚子万金诀》）、《出金矿图录》、《河车经》、《玄珠经》。另据《通志·艺文略》记载，狐刚子还著有《金石还丹术》一卷。这些著述虽然没有一本完整的流传至今，以致他的活动和成就长期被湮没，但是从现存炼丹术经诀里的断章残文中，仍可以窥见到狐刚子在地质学、冶金学、无机化学等各个方面所取得的成就。

我国古代炼丹家大约在战国时代开始从丹砂中提炼水银，但在提炼水银的初始阶段是采用简单的低温氧化焙烧法，这种方法不仅水银挥发损失很大，产量低，而且污染环境，令操作的炼丹家中毒。狐刚子首创密闭抽汞法取代低温氧化焙烧法，从而导致了我国炼汞史上的一个重要转折。密闭抽汞法是在密闭的铁质或土质的上下釜中加热丹砂。下釜中放置丹砂，上釜倒覆在上面，再以盐泥固济上下釜的合缝。当用炭火加热下釜时，丹砂则分解出水银，水银升华，冷凝在上釜较冷的内壁上。狐刚子根据水银在炼丹术中的不同用途，把水银分为三种：雄汞、雌汞和神飞汞。狐刚子认为它们“用各有别，作亦不同”，其实只是升炼时所加配料有所不同，但都采用下火上凝的密闭抽汞法。狐刚子不仅发明了这种炼汞法，而且还对这种方法的水银收率作过定量研究：“好朱一斤，可得十二两，中朱十两，下朱八两。”按现代化学的理论计算，一斤纯朱砂应含水银13.8两（1斤16两制），狐刚子从优质朱砂中取得的水银收率已达87%，这在东汉末年当然是高水平的。

狐刚子在丹药观上持“假求外物以自坚固”的思想，主张饵服金银，炼人身体。所以狐刚子对金银的性状、地质分布、探寻采集都有过深入的研究，他撰著的《出金矿图录》首先谈到了金银的地质分布规律，指出金矿或在水中或在山上，水中是沙金，山中是脉金。关于脉金，科学史界曾认为我国开采得相当晚，而狐刚子的研究表明，我国早在汉代不仅已开采脉金，而且对其矿脉分布规律，已有了一定的认识。狐刚子还针对不同的金矿品种，提出了不同的冶炼法。对于水中淘金所得的沙金，需要使金粒与砂石先分离，再使金与银分离，狐刚子运用出水金矿法，首先让盐（粗质盐中含 Na_2SO_4 、 MgCl_2 ）、牛粪灰（富含 K_2CO_3 ）起造渣作用，使石英砂成为熔点较低的矿渣浮起，从而与金银分离。然后，再将含银的金箔用黄矾、胡同泪裹住煅烧。我们知道，黄矾与胡同泪一起煅烧会产生硫黄，硫黄则很快与金箔中的银相结合，生成色黑质脆的硫化银，而从金箔上脱落下来。对于杂质较多而且复杂的山金，狐刚子运用出山金矿法，这个方法所采用的造渣手段与出水金矿法比较，有了更多的讲究，总共用了“金精、石胆、朱砂、雄黄、石硫黄”等十五种药来完成造渣过程，使矿中的砂质与金银分离，然后再用黄矾、胡同泪裹住煅烧，实现金与银的分离。值得一提的是，狐刚子还创造了一种“灰坯法”，这实际上就是冶炼贵金属所用的“吹灰法”的原始形式。吹灰法发明于什么时代，一直是科学史界很关心的问题，但从未找到唐代以前的资料。而狐刚子的发明，使“吹灰法”的问世年代大大提前了。这个方法的原理是：当金银矿粉与铅在熔炉中共炼时，金与银很容易与铅形成合金，成为低熔点

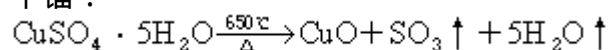
的铅坩，下沉到炉底，溶渣则上浮。将沉到炉底的铅坩放在风炉的灰坯中焙烧时，铅就氧化成 PbO，一小部分在鼓风时被吹去，大部分 PbO 会熔化而渗入灰中，留下黄金、白银在灰坯中。再将黄矾和盐与金银放在一起煅烧，黄矾和盐能使金中的银及残留的铅转变为 AgCl 和 PbCl 而渗入灰中，于是金与银得以分离。这种方法与当时远在万里以外的古希腊炼金师所用的渗灰法几乎完全相同，时间又基本上一致，这是巧合，还是东西方有过交流，耐人寻味。

在研究金银矿的过程中，狐刚子还有一项杰出的发明，这就是从石胆（ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ）中提取了硫酸。他在“出金矿法”中提到一种“炼石胆取精华法”，原文如下：

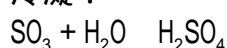
“以土壑坐作两个方头炉，相去二尺，各表里精泥其间，旁开一孔，亦泥表里，使精薰，使干。一炉中著铜盘，使定，即密泥之，一炉中以炭烧石胆使作烟，以物扇之，其精华尽入铜盘，炉中却火待冷。开取任用。入万药，药皆神。”

这种方法实际上就是干馏石胆，取其升华部分，其干馏液就是硫酸，写成化学反应式为：

干馏：



冷凝：



在西方，一直到 13 世纪，德国炼金家马克耐（Magnus）才从干馏胆矾中得到硫酸。可见，狐刚子制取硫酸比西方要早一千一百多年，而且，记录如此详实、准确，这在古代科技史料中是罕见的。

早期的炼丹方士主张服饵金银，但人是“不堪此金石垂坠之物久在肠胃”的，因此，方士们曾经下过一番功夫制作金液和金粉。由狐刚子传授下来的“金银粉制作法”有两个，可以说是现存记载中最早的了，其中的一个作金银粉法，久为后世所称颂，它记载于《出金矿图录》。其原理是：先使黄金成液态汞齐，再与盐共研，使黄金分散，附于盐末表面，然后加热蒸去水银，进而用水溶去盐末，便制得极细的金粉。这个制金粉法堪称绝妙，为后世炼丹家奉为经典，即使是当代的化学家也十分敬佩狐刚子的聪明才智。

中国炼丹术发展到东汉时期，为方士们所推崇的神丹大药是所谓的“还丹”，发展较早的一种“还丹”是铅汞的混合氧化物，被称为“龙虎大还丹”。生活在东汉末年的狐刚子是一位承上启下的炼丹师，上承金汞派（主张服饵黄金、水银），下启还丹派，积极倡导并研制铅汞化合物——龙虎大还丹。狐刚子在研制铅汞化合物的过程中取得的最大成就要算在《粉图诀》中传授下来的“九转铅丹法”。所谓“九转”，是先从真丹出发，还原出金属铅，再以所得铅复煎炼为丹，如此反复九次，才算成功。狐刚子的“九转铅丹法”是“迄今流传下来的最早的关于制取铅丹的完整而详实的记录，也是中国炼丹家认识并实现化学可逆反应的创举，具有极高的学术价值。”（赵匡华，《中国古代化学史研究》北京大学出版社，1985 年）

黄白术是炼丹方士用某种含砷矿物（如雌黄、雄黄、砒黄）与汞、铜、铅、锡等金属合炼，使之成为金黄和银白色的合金。炼丹家把这种“黄金”与“白银”称之为药金、药银，认为服之可令人长生。所以黄白术是中国炼丹术的重要组成部分。狐刚子对黄白术有独到的研究，他在《五金诀》中生

动地描述了含砷合金，还论述了五金相互结合形成合金的倾向：

“夫五金之物，经炼冶而自相入，……金得银而虚，银得铜而疏，铜得铁而缩，铁得锡而舒，铜得锡而殊，锡得铁而俱。”

从这段论述中，我们可以确信，狐刚子对五金彼此间形成合金的倾向及其合金的性能已有相当深刻的认识。用陈国符先生的话说，“狐刚子实为最大之外丹黄白师”。

综上所述，足见炼丹大师狐刚子是最早研究化学的先驱者之一，即使是处在近代也不愧是一位化学巨匠。他的成就还表明我国在化学的某些领域中走在了当时世界的前列。

（孙毅霖）

荀勖

荀勖（？—289年），西晋政治家、音律学家，字公曾，颍川颍阴（今河南许昌）人。其曾祖父荀爽，东汉经学家，汉献帝初年曾任司空。

荀勖幼时聪明好学，“年十余岁能属文，……既长，遂博学，达于从政。”（《晋书·荀勖传》）开始了他的仕宦生涯。

荀勖长于明哲保身。他最初仕魏，投身于大将军曹爽门下，后来，曹爽在与司马懿争权的斗争中失败被杀，“爽诛，门生故吏无敢往者，勖独临赴，众乃从之。”（同上）但是，他对曹魏的忠心也只表达到这一步，接下去，就投身到了司马氏门下。入晋后，拜中书监，进光禄大夫，官至尚书令，仕宦终生。

在不涉及自己利害关系情况下，荀勖颇有政治家气度。当时，曹髦为帝。曹髦因不忿于司马昭的专权，率领几百名禁卫军进攻司马昭，被昭的部下成倅杀死。司马昭为杜绝舆论指责，被迫斩成倅。事变发生时，昭的弟弟司马干闻讯要赶去帮忙，被把守阊阖门的孙佑用计支开。事后，司马昭欲“族诛佑”，荀勖劝阻说：“事有逆顺，用刑不可以喜怒为轻重，今成倅刑止其身，佑乃族诛，恐义士私议。”（《晋书·荀勖传》）司马昭仔细考虑了一下，觉得确实不妥，只好将孙佑撤职拉倒。

司马昭秉政时，魏蜀吴三国鼎立，他曾招募刺客，拟派遣他们入蜀行刺。荀勖劝阻说：“明公以至公宰天下，宜仗正义以伐违贰，而名以刺客除‘贼’，非所谓刑于四海，以德除远也。”（《晋书·荀勖传》）司马昭以为然。后来，司马昭兴兵伐蜀，荀勖建议以卫瓘为监军。蜀汉被攻克后，伐蜀魏军发生内乱，最后赖卫瓘得以平定。这些，都表现了荀勖的政治家气度和见识。

但是，在涉及到自己切身利益时，荀勖行事就不那么光明磊落了。他与贾充是莫逆之交，一次，晋武帝拟派贾充领兵外出，“勖谓冯统曰：贾公远放，吾等失势，太子婚尚未定，若使充女得为妃，则不留而自停矣。”于是，他和冯统两人“伺帝间，并称充女才色绝世，若纳后宫，必能辅佐君子，有关雎后妃之德。遂成婚。”（同上）这位太子妃就是后来把持朝纲、搅乱晋朝的贾后。荀勖此举，“当时甚为正直者所疾，而获佞媚之讥焉。”（同上）但他却通过这一活动，进一步巩固了自己在朝中的地位。

晋武帝的这位太子，就是后来中国历史上出了名的昏庸皇帝晋惠帝。武帝知道自己的这个儿子糊涂，总不放心，“时帝素知太子闇弱，恐后乱国，遣勖及和峤往观之。勖还，盛称太子之德，而峤云太子如故，于是天下贵峤而贱勖。”（《晋书·荀勖传》）武帝对太子妃也不满意，想把她废掉，“勖与冯统等谏请，故得不废。时议以勖倾国害时。”（同上）贾妃是荀勖等推上去的，保住了贾妃，也就保住了自己，所以荀勖才会这样去冒天下之大不韪而力保太子和太子妃。

荀勖为保全自己，一举一动都十分谨慎。他长期任职中书监，掌管机密，但“每有诏令大事，虽已宣布，然终不言，不欲使人知己豫闻也。”（《晋书·荀勖传》）他的亲朋多次劝他培植亲信，经营私人势力，他不以为然，其理由是：“人臣不密则失身，树私则背公，是大戒也。”（同上）他忠于晋王朝，担心营植私党若一旦暴露，就会有身家性命之忧，因此不愿为之。荀勖是聪明人，他“久管机密，有才思，探得人主微旨，不犯颜忤争，故得始终全其宠禄。”（同上）作为一名封建帝王的臣子，他注意保全自己，也

有其可理解之处。

荀勖文笔非常好。还在司马昭执政时，一次，司马昭要给东吴政权的孙皓下书，要文士们各自起草一封，最后，他选用了荀勖的。书去之后，很快有了回响，孙皓“报命和亲”。司马昭很满意，对荀勖说：“君前作书使吴，思顺，胜十万之众也。”（《晋书·荀勖传》）正因为荀勖博学善文，所以，他曾“领秘书监，与中书令张华依刘向《别录》整理记籍，又立书博士，置弟子教习。……及得汲冢中古文竹书，诏勖撰次之，以为中经，列在秘书。”（同上）这些，都是流芳于文化史的业绩。

荀勖对科学史的最大贡献是在音律方面。他曾“掌乐事，又修律吕，并行于世。”中国古代对音律非常重视。音律学理论到汉代刘歆已基本定型，但由于音律本身的特点，它的和谐与否，决定于人的主观感觉，同时又需要通过乐器表现出来，因此究竟应该如何调律定声，律学家们历来众说纷纭，意见并不一致。有时，由于战乱等因素影响，甚至连制定音律的人也很难找到。东汉末年，情况即是如此：

“汉末，天下大乱，乐工散亡，器法堙灭。魏武始获杜夔，使定乐器声调。夔依当时尺度，权备典章。及武帝受命，遵而不革。”（《晋书·律历志》）这样，晋朝初年的音律制度，遵循的还是曹操时期杜夔之所定。

但是，杜夔所定的音律并不十分准确。于是，晋朝大局粗定之后，考定音律之事就被提上了议事日程，由荀勖主其事。荀勖精通音律，他负责修定音律后，首先需要寻找一个能发出标准音的乐器，以之为标准来进行校正。此前，他在路上曾碰到一个赵地来的商人，商人牛车上牛所悬佩的铎恰能发出合乎标准的音高。现在，他掌管乐事，发现音韵不调，想起了那只牛铎，“乃曰：得赵之牛铎则谐矣。遂下郡国悉送牛铎，果得谐者。”（《晋书·荀勖传》）找到了那只牛铎，也就找到了标准器，就可以用来协调音律了。

荀勖在考正音律时，还根据古籍记载，参考出土文物，多方验证。据《晋书·律历志》记载：

“武帝泰始九年，中书监荀勖校大乐，八音不和。始知后汉至魏尺长于古四分有余。勖乃部著作郎刘恭依周礼制尺，所谓古尺也。依古尺更铸铜律吕以调声韵，以尺量古器，与本铭尺寸无差。又汲郡盗发六国时魏襄王冢，得古周时玉律及钟磬，与新律声韵暗同。于是郡国或得汉时故钟，吹律命之，皆应。”古人拘泥于以度生律，而尺的长度代有嬗变，尺变，律当然亦变，由此导致音韵不和。故欲定律，必先校尺。荀勖看到了这一点。他率同手下，首先依据古代规制作尺，再以尺铸律，比较的结果，他制作的尺与古器物上铭刻的尺寸一致，由之考定的音律与古乐器音律也谐和，“时人称其精密。”（《晋书·律历志》）

荀勖制尺，在度量衡史上是有意义的。古人制作度量衡，希望其保持稳定，“常一而不邪，方行而不流，一日刑之，万世传之。”（《淮南子·主术训》）但实际上，度量衡历代都有流变，这就需要对其之进行校正。校正的途径之一就是从小音律入手。但音律高低是人的主观感觉，因此这种做法难度很大。现在荀勖所为，就是应用此种方法的一种尝试。荀勖还把他制的尺刻了铭，记述了他考校的经过，显示出他对自己制定的标准尺很有信心。但是，他所制定的尺只是用来调音律，并未流布民间，因此未能遏止尺度变大的趋势。

荀勖在音律史上的另一重要贡献是制成了十二支发音准确的笛管，他找

到了较为准确的管口校正数，得到了确定各笛长度和笛上各个按孔的距离的规律。

在荀勖之前，古笛的制作没有成规。“笛之长短，无所象则，率意而作，不由曲度。考以正律，多不相应；吹其声均，多不谐和。”（《晋书·律历志》）之所以出现这种情况，是因为古人计算音律时采用的三分损益法，是从弦上产生的。弦振动时，两端固定点处即为振动波节，而对于两端开口的管，管内空气柱振动的波节不能恰在管口，因而发生误差。古人不知道消除这种误差的办法，仅凭听觉和经验来修改管长，“率意而作，不由曲度”，因此误差较大。

荀勖克服了这一困难。他采用了新的校正办法：先求出管口校正恒量，再由依据三分损益法求出的管长中减去这个恒量，以确定各笛的长度和笛上各个按孔的距离。他所得出的管口校正数，相当于笛管上一个音律的长度与另一个较高四律的音律长度的差数。从物理学的角度来看，这一差数也就是律管上某一律孔的长度与其气柱长度之间的差数。

荀勖能找到这个管口校正恒量，并依此来制定各笛的长度和笛上各按孔的距离，是很不容易的。因为笛管的空气柱情形比较复杂，两端管口乃至孔口都有一部分空气柱要突出出来。荀勖能基本找到这一经验数据，只能是他反复实验和计算的结果。这一结果是中国古代律学发展的重要成就之一。

葛洪

葛洪（283—363年），字稚川，号抱朴子，丹阳郡句容（今属江苏省）人，中国古代著名炼丹家、医学家。

葛洪出身于一个没落的官僚家庭。其祖父系吴国大鸿胪，其父名葛悌，仕吴曾拜会稽太守。吴国灭亡后，葛悌随吴主孙皓降晋，由于是降官，只做到邵陵太守。葛洪十三岁那年，葛悌去世，家境衰落。又因屡遭兵火，家中原有典籍荡然无存。这时葛洪已养成读书习惯，家境贫困，他白天上山砍柴，挑到集市去卖，以换取纸笔，晚上则“写书诵习”，非常刻苦。他读书认真，《晋书·葛洪传》说他“时或寻书问义，不远数千里，崎岖冒涉，期于必得，遂览典籍”，成为一个学识渊博的人。

葛洪自幼喜欢道术，其从祖父葛玄是三国时期吴国著名炼丹家，号葛仙公。葛玄将其炼丹术传给弟子郑隐，“洪就隐学，悉得其法焉。”（《晋书·葛洪传》）后来，葛洪又结识了南海太守鲍玄，跟随他学习“神仙方术”。鲍玄很器重他，把自己的女儿也嫁给了他。葛洪的家世、姻亲关系，使得他深谙炼丹之道，他同时又“兼综练医术”，最后终于成为神仙家和金丹道教重要代表人物、杰出的医学家。

晋惠帝太安二年（303年），西晋王朝爆发了所谓“义阳蛮”张昌起义，别帅石冰攻掠扬、徐二州。吴兴太守顾秘与扬州秀才周玘等组织武装，进攻石冰。葛洪也受邀“募合数百人，与诸军旅进”（《抱朴子·自序》），攻破石冰别部，立下“功绩”，“于是大都督加洪伏波将军，例给布百匹。”（同上）葛洪把这些赏赐，都分给了手下将士和相识故人贫者。在《抱朴子·自序》中，他对自己这段经历很沾沾自喜。

在平息石冰造反之后，“洪不论功赏，径至洛阳，欲搜求异书，以广其学。”（《晋书·葛洪传》）当时，正值西晋内乱，争战不休，葛洪不但学习愿望落空，连回乡之路也断了。“洪见天下已乱，欲避地南土，乃参广州刺史嵇含军事。”（同上）嵇含是葛洪友人，被任命为广州刺史，约请葛洪担任参军，但嵇含未到任就被人杀害。葛洪无奈，在广州停留了不少年头。和鲍玄的女儿结婚，可能就在此时。在此期间，他登山采药，“服食养性”、“修仙养道”，打下了神仙道学的基础。

后来，葛洪回到家乡。东晋王朝建立（317年）之后，对南方士族采取了一些笼络措施。葛洪以镇压石冰之“功”，“赐爵关内侯”。王导把他罗致手下，当了司徒掾，后又迁咨议参军，但始终没做上大官。后来，干宝推荐他编修国史，他未就任。据其《抱朴子·自序》说，他的著作即在这一时期编订就绪。这时，葛洪年事已高，“欲炼丹以祈遐寿，闻交阯出丹，求为句漏令”（《晋书·葛洪传》），得到晋元帝允许。葛洪带着子侄到了广州，广州刺史邓岳极力挽留，他就在广州停留下来，住在罗浮山修道炼丹，从事著述，直到逝世。

葛洪之死，被传得神乎其神。《晋书》本传描写他去世经过，说他“后忽与岳疏云：‘当远行寻师，克期便发。’岳得疏，狼狈往别。而洪坐至日中，兀然若睡而卒。岳至，遂不及见。时年八十一。视其颜色如生，体亦柔软。举尸入棺，甚轻，如空衣，世以为尸解得仙云。”葛洪炼丹，很有名声，所以连他的去世也宠罩着一层神仙气氛。

葛洪一生著述很多，《晋书》本传说：“洪博闻深洽，江左绝伦，著述

篇章，富于班马。又精辩玄赜，析理入微。”认为他学识渊博精深，江南一带无人能与之相比。其著作比班固和司马迁还多，而且分析的都是很精妙高深的道理，能够言人所未言，发人所未发。他流传至今的代表作，有《抱朴子》、《金匮药方》、《肘后备急方》等，从中可以了解他的学说思想和学术实践。

葛洪是我国炼丹史上的重要代表人物。炼丹术的发展，到葛洪时，已经有了几百年的历史。这期间，虽然也有不少人谈论过长生成仙，但这些长生说还缺乏足够的系统性和理论性。葛洪首先对长生成仙的可能性和现实性作了认真系统的论证。他的论证结论虽然不能成立，但透过他的论证，我们可以从中窥视道教神学家的思维逻辑，可以总结他们的思维经验教训。何况他的论证过程中也有许多有价值的判断，表现了很强的逻辑性，在论证方法上有一定的启发性，能够引起人们的理论兴趣。

葛洪把炼制和服食金丹当作长生不老、得道成仙的重要手段。他说：

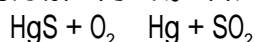
“夫金丹之为物，烧之愈久，变化愈妙。黄金入火，百炼不消，埋之毕天不朽。服此二物，炼人身体，故能令人不老不死。此盖假求于外物以自坚固，有如脂之养火而不可灭。铜青涂脚，入水不腐，此是借铜之劲以扞其肉也。金丹入身中，沾洽荣卫，非但铜青之外傅矣。”（《抱朴子·金丹》）

这段话，可以说是阐释了炼丹家的基本思想。其中心意思是说，服食金丹之所以会长生，关键原因在于它是“假求于外物以自坚固”。在这段话中，葛洪采用了错误的类比，因而得出了错误的结论，但不可否认的是，他是从一定的物质基础上展开论述的。正是在这样的思想基础之上，他积极进行了自己的炼丹实践。

我国现存最早的炼丹著作是东汉炼丹家魏伯阳的《周易参同契》，此前也还有一些著作，但已佚失不全。这些著作记述了古人炼丹的指导思想和方法，并记载了一些有价值的化学知识和不少药物。葛洪在继承这些炼丹理论和实践的基础上，把炼丹术大大向前推进了一步。他对金银和丹药炼制的论述，集汉魏以来炼丹术之大成，内容远较《周易参同契》丰富。他炼丹所用药物多达二十余种，超出《周易参同契》所载药物一倍多。他关于炼丹炉的叙述，也更为具体。通过炼丹实践，他对一些物质间的相互作用关系有了明确的认识。例如，他通过实验发现一化学反应的可逆性，说：

“凡草木烧之好炆，而丹砂烧之成水银，积变又还成丹砂，其去凡草木亦远矣。”（《抱朴子·金丹》）

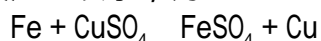
“丹砂烧之成水银，”是指煅烧红色丹砂，其中所含的硫变成二氧化硫，而游离分解出水银。若用化学反应式表示，即为：



而所谓“积变又还成丹砂”，过去一般认为是说再使水银和硫黄化合，生成黑色硫化汞，硫化汞加热，便升华为赤红色的晶体硫化汞，重新变成了丹砂。现在，有学者提出，这句话所说的，实际是指水银在空气中以文火（低于 350℃）加热，表面生成一层红色氧化汞的反应。由于氧化汞与天然硫化汞都是红色的，因而把它误认为丹砂（赵匡华、曾敬民、郭保章：“中国古代炼丹术及医药学中的氧化汞”，《自然科学史研究》1988年4期）。葛洪自然不知道这其中的种种差别，但他意识到了一些化学变化是可逆的，这也是可取的。

再如：葛洪在实验中，对金属的置换反应也有所涉及。他说：

“以曾青涂铁，铁色赤如铜，……外交而内化也。”（《抱朴子·黄白》）
曾青是硫酸铜，用它涂铁，铁和硫酸铜溶液起反应，置换出其中的铜，用化学反应表示，为：



因为用的是涂抹方法，硫酸铜溶液只在金属铁的表面发生作用，故此“外变而内不化也”。可见葛洪观察十分细致。正是像这样长期的炼丹实践，使他积累了大量的化学知识，成了一个著名炼丹家。葛洪的炼丹对后世影响很大，他的理论、方法乃至某些术语还传到国外，对世界炼丹术都产生了影响。

葛洪不仅擅长炼丹，对医学也很有研究。他把医学作为修道的一种辅助手段，说：“古之初为道者，莫不兼修医术，以救近祸焉。”（《抱朴子·杂应》）这种认识与济世救民思想结合起来，成了他研究医学的基本动力。

葛洪的医学成就是多方面的。例如《抱朴子》一书中，他就记载了不少植物药、矿物药的性能和功用，扩大了他们的应用范围。但是，他在医学上的主要成就还是反映在他的《金匮药方》一书中。这部书共一百卷，依病名分别论述。后来，为了便于携带、应用，他又摘取其要，缩编为《肘后救卒方》三卷，经后人增补，传留到现在，就是《肘后备急方》八卷。书中所列药方，大都选用易得、有效、价廉的药物，切于实用。

在这部书中，葛洪首次记述了砂虱病，此病又名恙虫病，是由恙虫叮咬传染使人发病的一种急性传染病。葛洪在一千六百年前对此病的记述和现今的认识基本一致，这是难得的。在流行病学和寄生虫学方面，葛洪发现了疥虫，这也是不容易的。葛洪对肺癆（肺结核）病的传染性也有比较深刻的认识，他还是我国详细记述开花最早的一个人。另外，他还提出用狂犬脑子敷狂犬咬伤之处，以治疗疯咬伤的方法。这种方法虽然是经验成份的产物，但从现代免疫学角度来看，它是有道理的。

另外，葛洪还是一位天文学家。《晋书·天文志》记述当时天文界浑天说和盖天说的大争辩，多处引用葛洪批驳盖天说的一些论述。这些论述大多能从天文观测的实际出发，有力地支持了浑天说主张，表现了他很高的天文学造诣。

正是由于有以上诸多成就，使得葛洪当之无愧成了我国4世纪一位杰出的科学家。

陶弘景

陶弘景，字通明，晚年号华阳隐居。丹阳秣陵人（今南京）。生于南朝宋武帝孝建三年（456年），卒于梁武帝大同二年（536年），享年81岁，经历了南朝的宋、齐、梁三个朝代，是继葛洪之后我国古代又一位著名的炼丹家和医药家。

陶弘景诞生于士族之家，年幼就好读书，9岁时，读《礼记》、《尚书》、《周易》及春秋杂书千余卷，“一事不知，以为深耻”。10岁时，读葛洪《神仙传》，便有养生之志。20岁，不肯婚娶，不食荤膻。23岁，为沈攸之子侍读、宜都王侍读。30岁，游历大洪山、太平山、窈山、长山、吴兴临海诸名山，处处采掘花药，寻求灵异，并得“真人”遗迹十余卷。37岁，挂朝服于神武门，辞去官职，隐居句容茅山（今江苏省内），自号华阳隐居。47岁时，梁武帝萧衍即位，每遇吉凶、征讨大事，萧衍无不当面征询陶弘景的意见，时人称陶为“山中宰相”。50岁时，陶弘景移居大茅山与中茅山之间的积金岭，在岭西建了华阳上馆，研经守真，并建下馆，炼制丹药。

陶弘景为什么晚到50岁时才进行炼丹的尝试呢？原因有二，一是陶弘景为道教上清派的重要人物，而上清派是主张“存思”、“服气”的，即着重于对人的精、气、神的修炼，一般并不从事服饵、炼丹。二是陶弘景不愿步西汉方士李少君的后尘去欺骗梁武帝。后来，梁武帝“复以梦旨相告”，陶弘景才与弟子一起开始从事实地炼丹。《华阳陶隐居内传》详尽地记载了陶弘景的炼丹过程。他首先对“丹方”进行了认真的选择。起初，陶弘景考虑了《黄帝九鼎九丹》，但认为此方由《太清中经》而来，不是一般人所能合炼。其后，考虑了《五君虹景》及《左慈炉火九华》，可随即发现“方未显于世”。接着又选择了三十余种丹法，但“皆太清中小法”。后来又选择了两个炼丹水法：一为“太一金液”，但缺硝石，一为“太清金液”，又缺卤碱和虜盐。最后决定选用“高真上法”。高真上法有四种：一是“四蕊”丹法，陶弘景认为“虽有其方，疑有假附”。二是“琅玕”丹法，乃上清法。三是“曲晨”丹法，乃太极法。陶弘景对“琅玕”和“曲晨”评价较高，但因缺硝石、虜盐，无法采用。四是“九转丹”，“九转丹”不仅所用药石易寻，丹方易解，而且是真实的上清体系，地道的“高真上法”，所以，作为上清派重要代表人物的陶弘景理所当然的选中了“九转丹”。

《华阳陶隐居内传》指出，“营九转丹，丹砂、雄黄最为主。”但因当时战争连年，道路中断，雄黄不可得，梁武帝下旨“给黄金、朱砂、曾青、雄黄等。”一切准备就绪后，陶弘景开始炼丹了。他燃鼎用阳燧日中取火，天监五年（506年）正月第一次开鼎，“二黄（雄黄、雌黄）轻华已飞”，炼丹未能成功。当年九月九日再炼，鼎多细圻，年底开鼎，依然没有成功。尽管两次炼丹都失败了，但陶弘景并不灰心，他进行了反思，认为炼丹应在“声迹旷绝”之地，而茅山早已“密迩朝市，岩林浅近”，不宜炼丹。因此陶弘景上奏梁武帝，提出要去浙江、福建一带“山海深旷、民不知道”之地炼丹。梁武帝不同意，但陶弘景执意请准。于是，“静斋五旬”，改名换姓，“夜半出山”，只有“负笈以从者二人”。

陶弘景自天监七年（508年）南行，历经四年之后，于天监十一年（512年）八月到达木榴屿，该地“孤立海中”，无人居住，于是上岸建屋。十月，梁武帝使司徒慧明来，诏陶归还积金岭，陶不愿，但君命难违，只得相随而

返。据《华阳陶隐居内传》记载，陶弘景自归返后，“鼎事累营不谐”。每次开鼎，“皆获霜华，门人金谓此为成”，但陶总是以丹成的各种标准加以检验，认为未成。天监十八年（519年），陶再次炼丹，虽“光彩特异”，但仍未成。普通五年（524年），年已69岁的陶弘景又一次“涂鼎起火”。次年“正旦甲子开鼎，光气照烛，动心焕目，形质似前者而加以彩虹杂色。”

《华阳陶隐居内传》指出，“始天监四年（505年）初有志于此，及是凡七营乃成。”这就是说，陶从50岁开始到69岁为止在长达20年的岁月中，经历了七次炼丹的尝试，才获成功。

在炼丹实践中，陶弘景注意把平时观察到的一些化学反应过程及现象记录下来，先后著述《集金丹黄白方》1卷，《服云母诸石方》1卷，《合丹药诸法式节度》1卷，《太清玉石丹药要集》3卷。陶弘景还注意将炼丹中的一些发现，如水银、芒硝、雄黄、食盐等的治疾方、早期化学制药的方法、技术等写进了他的医学著作《肘后百一方》中，这就形成了陶弘景炼丹的一个显著特点，即他不是执意追求“成仙”的“神丹”，而是自觉或不自觉地从炼丹中认识并掌握了金石类药物的产地、类别、形状、入药、疗效等，从而实现了炼丹与医疗的初步合流，促进了原始化学制药的发展。所以，后世历代本草书都援引了许多他的炼丹成就，以致他的上述6卷炼丹著作早已失传，但人们仍可从一些本草书中窥其炼丹成就之一斑。例如，李时珍《本草纲目》卷八至卷十一金石类，共载药物134条，其中引自陶弘景撰述的有57条，占总数的43%。而这些注释不乏早期的无机化学知识。关于水银，他明确提出，“水银有生熟”，生是指天然产水银，熟是指人工炼制丹砂所得到的。陶弘景还指出，水银“能消化金、银，使成泥，人以镀物是也”。显然，陶弘景已经认识到金、银两种金属能够与水银形成汞齐，这些汞齐具有可塑性；而且，对这类合金的镀金镀银用途做了首次说明。陶弘景还注释了胡粉和黄丹。胡粉的化学成分是碱式碳酸铅，黄丹是四氧化三铅，都不是天然产物。陶弘景明确指出，胡粉是“化铅所作”，黄丹是“熬铅所作”，都是人工制造出来的。关于消石，陶弘景指出，“以火烧之，紫青烟起，云是真消石也。”长期以来，古人对硝石（硝酸钾）与朴硝（硫酸钠）分辨不清，而陶弘景以这种简易的火焰分析法，使两者得以区分，成为近代化学用火焰鉴别钾盐、钠盐的先声，同时也使我国成为世界上最早提取、鉴别、利用硝石的国家，为以后的火药发明创造了条件。关于矾石，陶弘景指出，将矾石（不纯的硫酸铜）溶液“涂铁皆作铜色，外虽铜色，内质不变。”陶弘景的这一发现，奠定了宋、元时期水法炼铜——胆铜法的基础。

陶弘景知识渊博，成就是多方面的，而他的最大贡献是在医药学上。他对我国现存最早的一部药物学专书《神农本草经》中原有的药物仔细地做了整理和校订，并且结合自己的经验，把搜集到的新的用途以及不同的记载，进行了一一的鉴别和补充。同时他又汇集汉魏以来医家新发现的、未载入《神农本草经》的365种药物，写成《本草经集注》一书。《本草经集注》共收药物730种，比《神农本草经》增加了一倍。为了区别《神农本草经》中原有的药物和新增的药物，陶用朱红颜色书写原有的药物，而用黑色书写新加的药物。《神农本草经》把药物分为上、中、下三品，这种分类方法既不能准确区分药物的性能，又难于掌握和寻检。陶独创一种新的分类方法，他按照药物的天然来源分成玉石、草木、虫鱼、禽兽、果菜、米食等六类，还有一些当时未经实际验证的药物归入第七类——有名无用类。这种分类方法，

有一定的科学性，有利于澄清人们在药性认识上的混乱。

宝剑是道教仪式驱邪禳灾的重要法器。陶弘景对刀剑的冶锻颇有研究，并著有《古今刀剑录》一书。书中记录了远自夏禹近到梁武帝间各个朝代所制刀剑的名称、数目、铸造过程以及铭文等。

陶弘景的研究领域还涉及到天文历法，他曾制造过能够演示天象的天文仪器“浑天象”。“浑天象”“高三尺许，地居中央，天转而地不动，以机动之，悉与天相会”，极为逼真。无疑，陶弘景在中国的文明、科技和宗教史上占有重要地位。

（孙毅霖）

曾公亮

曾公亮（999—1078年），字明仲，泉州晋江（今属福建）人。北宋政治家，《武经总要》一书的主编。

曾公亮毕生从政，仕途顺遂。他于天圣年间（1023—1031年）举进士甲科，知会稽县。在任期间，因其父在他的管辖境内购置田地，他受牵连被贬，后来又被重新起用，这之后仕途通坦。曾知郑州、知开封府，日益受到皇帝信任。宋仁宗嘉祐六年（1061年），他拜吏部侍郎同中书门下平章事集贤殿大学士，位居相职，与韩琦共掌国事。熙宁二年（1069年），他以年老自请罢相。次年，又被起用，拜司空兼侍中河阳三城节度使集禧观使。熙宁四年，判永兴军，一年后返回京师，随即以太保身分退休。元丰元年（1078年），曾公亮去世，享年80。去世后，宋神宗亲临哭祭，辍朝三日，赠太师中书令，谥曰宣靖，给予很高荣誉。

曾公亮为官颇有政绩。早在知会稽县时，他即倡导修镜湖斗门，泄水入曹娥江，使得湖滨民田得免水患，受到民众称赞。“知郑州，为政有能声，盗悉窜他境，至夜户不闭。”（《宋史·曾公亮传》）曾有一次，外地一位客人来郑州，丢失了东西，他给曾公亮写信，就此事诘责，曾公亮复信说：我管辖的境内从来没有盗贼，此事一定是您的随从所为。搜查随从的结果，果然不出其所料。曾公亮居相位时，韩琦为首相，“公亮明练文法，更践久习知朝廷台阁典宪，首相韩琦每咨访焉。”（《宋史·曾公亮传》）这充分表现了他的为政能力。

史书上对曾公亮的评价，颇有微辞，这主要是由于他跟王安石的关系。他晚年推荐王安石于宋神宗，共同辅政，此举引起一些王安石反对派的诘责。例如“苏轼尝从容责公亮不能救正”，曾公亮的回答是：“上与介甫如一人，此乃天也。”（同上）《宋史》本传记载他的为人：“公亮方厚庄重，沉深周密，平居谨绳墨，蹈规矩，然性吝啬，殖货至巨万。”又说他“静重镇浮，练达典宪，与韩琦并相，号称老成，”但又“疾琦专任，荐王安石以间之”。认为他“挟术任数”，非“诚心谋国者”，对曾公亮的为人，提出了指责。

曾公亮之所以能在科学史上占据一席之地，是因为他主编了《武经总要》这套四十卷本的大型兵书。书中记载了相当多的科技知识，对于研究古代物理史、化学史、技术史等具有很高的参考价值。

《武经总要》是一部全面的军事著作，既包括军事制度、军事史，又包括兵法战阵、武器制作等。全书共四十卷，分为前后二集。前集包括“制度”十五卷、“边防”五卷，后集包括“故事”十五卷、“占候”五卷。《四库全书简明目录》评价此书说：“战阵之事，非宋人所长，故所言阵法战具弥详，而拘牵弥甚。边防五卷，亦多得诸传闻。然前集备一朝之规制，后集具历代之得失，录之亦足资考核。神而明之，存乎其人焉。”这是说曾公亮等并非武将，故对阵法战具的记述多有牵强，边防诸番形势，也多出乎传闻，但本书仍具有很高的史料价值，“录之亦足资考核。”在这“足资考核”的内容中，就包括了科技知识在内。

例如，在《武经总要》前集卷十五中，载有指南鱼的制法：“用薄铁叶剪裁，长二寸，阔五分，首尾锐如鱼形，置炭火中烧之，候通赤，以铁钎钎鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没尾数分则止，以密器收之。”这是利用地磁场使铁片磁化的方法。把铁片烧红，使其温度超过居里点，铁片原

有磁畴解散，然后把铁片按地磁场方向蘸水冷却，使得磁畴形成沿地磁场方向的规则排列并固定下来。鱼尾向下倾斜，使得鱼体与地磁场方向更为接近，可以起到增大磁化程度的作用。《武经总要》对此的记载虽仅寥寥数语，却内涵丰富又合乎科学道理，显然是经过反复试验总结出来的经验之谈。该法所得的磁性虽然较弱，但它的问世，标志着人工地磁场磁化方法的发明，这在磁学和地磁学发展史上，都是一件值得记载的大事。

《武经总要》有不少关于兵器制造的内容，例如其卷二中有弓法、弩法，卷十中有攻城器具，均涉及此类内容，其中尤以卷十三器图内容最为丰富，包括弓弩、各种长短兵器、各种防护装备盔甲、盾牌以及各种战车等。其中值得注意的有：炮楼（四轮高架炮车）、行炮车（四轮炮车和二轮炮车）、折叠桥以及游艇、蒙冲、楼船、走舸、斗舰、海鹞等舰艇；火禽、杏雀、火兽、火船等火攻器具与设备等。此外，还有旋风炮、旋风五炮（炮楼、行炮车都是抛石机，所谓旋风炮是指可以向任一方向发射的抛石机），以及行炉、猛火油柜等。在弓弩方面尤其值得称道，如三弓子弩射二百步；双弓床弩，用五、七人至十人张弩，一人瞄准，一人槌发，射一百二十步；又有手射弩，二十人张，射二百五十步。显然，仅就兵器制造而言，《武经总要》也是一部极有价值的著作。

《武经总要》记载的火药制造方法也有极高的史料价值。该书记录了三个火药方子：毒药烟球，每个重5斤，用硫黄15两、烟硝30两、木炭5两、草乌头5两、芭豆2.5两、沥青2.5两，以及少量的砒霜等等。蒺藜火球火药法：用硫黄20两、焰硝40两、炭末5两、沥青2.5两、干漆2.5两、桐油2.5两、蜡2.5两，以及麻茹、竹茹等。火炮火药法：硫黄14两、焰硝40两、松脂14两，以及定粉、黄丹、清油、麻茹、竹茹、砒黄、黄蜡、桐油等。由这些记录可知，宋代火药配方中硝的含量增加了。唐代火药硫、硝含量相同，是1:1，宋代增加到1:2，甚至近乎1:3，已与后世黑火药中硝占3/4的配方相接近。同时，又加进各种少量辅助性配料，以期达到易燃、易爆、放毒和制造烟幕等效果。这些，都反映了火药制造技术的进步。

《武经总要》中有许多类似性质的具体记载，都值得深入研究。该书有明正统四年（1439年）刻本，民国二十三年（1934年）商务印书馆影印文渊阁本，并被收入《四库全书珍本初集》。

沈括

沈括（1033—1097年），中国历史上卓越的科学家。他博学多才，《宋史》本传说他“博学善文，于天文、方志、律历、音乐、医药、卜算，无所不通，皆有所论著。”这并非溢美之词，他的研究成果反映了北宋时期的自然科学水平，在科学史上具有重要地位。

沈括字存中，浙江钱塘（今杭州）人，出身于北宋一个官宦之家。他的父亲沈周（字望之），大中祥符八年（1015年）进士及第，在北宋做地方官。母亲许氏，有文化教养。沈括与其兄沈披年幼时，许氏亲自教诲。以母亲而兼启蒙教师，许氏对沈氏兄弟的影响是巨大的。

沈括自幼勤奋好读，在母亲指导下，14岁就读完了家中藏书。后来他随父亲到过福建泉州、江苏润州（今镇江）、四川简州（今简阳）和京城开封等地，这些经历，使他增长了不少见识，为他今后写作《梦溪笔谈》准备了初步条件。24岁那年，他步入仕途，最初做海州沭阳县（在今江苏省）主簿，以后历任东海（在今江苏省）、宁国（在今安徽省）、宛丘（在今河南省淮阳县）等县县令。仁宗嘉祐年间，他考中进士，被任命做扬州司理参军，掌管刑讼审讯。三年后，被推荐到京师昭文馆编校书籍，开始研究天文历算。神宗熙宁五年（1072年），兼任提举司天监。接着，又担任史馆检讨、集贤院校理。因职务之便，有机会接触更多的皇家藏书，学识进一步充实。

宋神宗熙宁二年（1069年），王安石被任命为宰相，开始进行大规模的变法运动。沈括积极参与变法，受到王安石信任和器重，多次被委以重任，曾担任过管理全国财政的最高长官三司使等职务。1072年，他奉命治水，采用分段筑堰方法，准确测量出京门与水入淮河口处高差及这段水长度，在测量史上传为美谈。熙宁八年（1075年），他奉命使辽。当时，辽正向宋提出领土要求，沈括认真查阅了有关档案材料，在和辽人交涉的过程中，据理雄辩，舌战辽臣，终于获捷于樽俎之间，使“契丹知不可夺”，放弃了索地要求，出色地完成了他的出使使命。归国途中，他对对方山川、险要、道路、河流、民俗风情等详加考察，写成《使契丹图抄》一书，对古地理研究有很高参考价值。

熙宁九年（1076年），王安石变法失败，沈括也受连累，被贬出知宣州（今安徽省宣城一带）。三年后，调往西北边防前线，任鄜延路经略安抚使，在筑城、侦察技术等方面显示了军事技术才能。因守边有功，元丰五年（1082年）升龙图阁直学士，但是不久即以徐禧失陷永乐城（今陕西米脂西）连累坐贬，降职做均州（今湖北省均县）团练副使，后徙秀州（治所在今浙江嘉兴），实际处于被软禁状态。哲宗元祐三年（1088年），他花费十二年心血编修的《天下州县图》完成，被特许赴京进呈，受到奖励，解除软禁。1090年，他迁到润州（今镇江），筑“梦溪园”，居八年而卒。

沈括的科学成就是多方面的，涉及到当时自然科学各个分支。在天文学方面，他曾领銜司天监，执掌观测天象，推算历书。他重视对观测仪器的改革，对传统浑仪作了较多的改进。一方面，取消了作用不大的白道环，把仪器简化；另一方面，对一些环的位置也作了改动，使它们不阻挡观测视线；同时，他对浑仪中的瞄准器——衡管也作了改进，使观测精度进一步提高。这些改革措施为浑仪的发展开辟了新的途径。元朝郭守敬创制简仪，就是在这个基础上进行的。

漏刻是中国古代重要计时仪器，沈括对漏刻设计和制作也做出了重要贡献。他调整了漏刻结构，巧妙地消除了气温因素对漏刻水流量的影响，使他的漏刻计时精度误差达到了不大于每昼夜 10—20 秒的水平。依据这样高精度的计时仪器，他成功地发现了“日行有迟疾”这一重要现象。

沈括对传统的圭表测影也做过缜密思考，提出了自己的改进意见。这些成果，被他写成《浑仪议》、《浮漏议》、《景表议》三篇奏议，详细说明了改革仪器的原理和自己的见解。这三篇文章被收入《宋史·天文志》，是我国天文学史上的重要文献。

在修订历法的过程中，沈括体会到中国传统的阴阳合历有诸多不便之处，因而在其晚年提出了用“十二气历”代替原来历法的主张。十二气历是以十二气为一年，一年分四季，每季分孟、仲、季三个月，按节气定月份，大月三十一天，小月三十天，大小月相间。即使有“两小相并”的情况，一年最多一次。这样，每年天数都很整齐，无须再设闰月，节气也有固定的日期。至于月亮圆缺，只要在历书上注明“朔”、“望”就行了。他的这一设想虽然未被采纳，但其本身却是非常科学的。它是一种纯阳历，在指导思想上与现行公历一致，在分月上较现行公历还要合理。

在数学上，他创立了“隙积术”和“会圆术”。沈括通过对堆积的酒坛和垒起的棋子之类有空隙的堆积体的研究，提出了求它们的总数的方法，这就是隙积术，其实质是高阶等差级数求和。他还从计算田亩出发，考察了圆弓形中弧、弦和矢之间的关系，提出了由弦和矢的长度求弧长的近似公式，这就是“会圆术”。隙积术和会圆术是后世垛积术及弧矢割圆术之先河，为中国古代数学开辟了新的研究方向。

另外，沈括在天文学计算问题上曾经提出了“圆法”和“受法”，涉及到球面三角学问题。他还研究过围棋棋局总数，用组合数学的方法计算出棋局总数为 3^{361} 。他也曾运用数学知识研究过军粮的运输，提出了“运粮之法”，其中含有运筹思想的萌芽。这些，在数学史上都是很杰出的成就。

在物理学方面，沈括也有其卓越贡献。他记述了几何光学成像的“格术”理论，并以之科学地解释了凹面镜和小孔成像特征。他对凸面镜、透光镜的论述，也很有道理。他还记述了指南针的磁化方法，讨论了指南针的安装方式，记录了磁偏角的存在。在声学方面，他首先发明了“在琴弦上粘纸人验证共振的方法，比西方类似的纸游码实验早约七百年。他对古乐钟圆钟和扁钟发音特征的揭示，极为准确。所有这些，都是极富启发性的科学成就。

在化学方面，沈括也取得了一定的成就。例如他在担任鄜延路军事长官时，亲自考察了陕北境内的石油的开采情况，利用石油不容易完全燃烧而生成炭黑的特点，首先创造了用石油炭黑代替松木炭黑制造烟墨的工艺。“石油”这一名称，也是他首先使用的。他在《梦溪笔谈》中有关于“太阴玄精”（石膏晶体）的记载，详细叙述了硫酸盐矿物晶体的外形、颜色、光泽、透明度、解理及加热后的变化等，为古代矿物药的鉴别提供了一种科学方法。

在地学方面，沈括亦不乏独到见解。他一生行踪所及，几遍大半个中国，加上他知识渊博，善于观察，故在地学领域屡有建树。他察访浙东时，观察了雁荡山诸峰的地貌特点，明确指出雁荡诸峰是由流水侵蚀作用造成的，并以黄土高原的地形成因为例进一步验证了这种观点。他依据河北太行山山崖间有螺蚌壳和卵形砾石的带状分布，推断出这一带是远古时代的海滨，这是对唐代即已出现的海陆变迁说的进一步肯定。他在视察河北边防时，曾经把

所考察的山川、道路和地形，在木板上制成立体地理模型。这在当时是很先进的。这个做法很快便被推广到边疆各州。他于熙宁九年（1076年）奉旨编修《天下州县图》（即《守令图》）。他查阅了大量档案文件和图书，历时十二年，终于完成了这一我国制图史上的巨作。这是一套大型地图集，其中总图大小各一轴（大图高一丈二尺，宽一丈），分路图十八轴，共计二十轴，是当时全国最好的地图。

对于生物医学，沈括也很精通。他在其《梦溪笔谈》中，对动植物的地理分布、形态描述和分类、生物的生理、生态现象、药物和药理作用、生物防治、人体解剖生理学、古生物学等方面作了大量的忠实记录。他的药用植物学知识也十分广博，并能够从实际出发，辨别真伪，纠正古书上的错误。他有专门的医学著作《良方》。现存的《苏沈良方》，是后人把苏轼的医药杂说附入《良方》之内合编而成的。

沈括的科学活动和成就还有很多。这些，都集中体现在他的《梦溪笔谈》一书。该书原有二十六卷，后来增加《补笔谈》三卷、《续笔谈》一卷，总计三十卷，是一部内容十分丰富、集前代及当时科学成就之大成的光辉巨著。

沈括一生著述甚多，仅据《宋史·艺文志》所录就有22种155卷。现在有传刻本的除《梦溪笔谈》外，仅有《长兴集》十九卷及《苏沈良方》十五卷。另外在《宋史》及《续资治通鉴长编》中，也保存有他的部分著述。

赵友钦

赵友钦，又名钦，字敬夫，或云字子恭，号缘督，人称缘督先生或缘督子，江西鄱阳人。他是宋室汉王第十二世孙，宋末元初一位很重要的科学家。

赵友钦的生卒年代不可确考，大概活动于元初。明代宋濂曾为其著作《革象新书》作序。序中对他的学术由来有这样一段介绍：

“先生宋室之子，习天官遁甲铃式诸书，欲以事功自奋。一日坐芝山酒肆中，逢丈夫修眉方瞳，索酒酣饮，先生异而即之，相与谈玄者颇久。且曰：‘汝来何迟也？’于是出囊中《九还七返丹书》遗之。临别，先生问其姓名，曰：‘我扶风石得之也。’得之，盖世传杏林仙人云。先生自是视世事若漠然，不经意间。往东海上独居十年，注《周易》数万言，时人无有知者，唯傅文懿公立极敬畏之，以为发前人所未言。先生复即弃去。乘青骡，从以小苍头，往来衢婺山水间，人不见其有所赍，旅中之费未尝有乏绝，竟不知为何术。倦游而休，泊然坐亡，遂葬于衢之龙游鸡鸣山。”

这段话，笼罩着一层神仙气氛，对其中的细节，不必当真。不过，透过这些描述，对于赵友钦的学术活动，我们也可以了解一个梗概：他以道家身份面世，通天文星占炼丹术等，淡泊于功名，曾往东海独居十年，注释《周易》，居住于龙游（今浙江衢县龙游），常外出游学，深入自然。死于龙游，葬在鸡鸣山。

赵友钦学问广博。明代王祚曾整理他的《革象新书》，在序言中说：“其学长于律法算数，而天官星家之术尤精。”清代《四库全书提要》说他“覃思推究，发前人所未发，”“在元以前谈天诸家尤为有心得者。”赵友钦著述宏富，知书名者有《金丹正理》、《盟天录》、《缘督子仙佛同源论》、《仙佛同源》、《金丹问难》、《推步立成》、《三教同源》、《革象新书》等多种。从这些书名来看，赵友钦的工作主要集中于道教、炼丹术、天文学诸方面。由此，近人余嘉锡说他是“道士之通术数者”，（余嘉锡，《四库提要辨证》，中华书局，1980年版，695页）谅非虚言。

但是，赵友钦之通术数，并非那些装神弄鬼蛊惑人心的术士可比，他是在认真钻研这些知识，有自己坚实的科学基础。且不说在他的炼丹术著作中必然有许多涉及化学知识，仅就其所著的《革象新书》即可看出这一点。赵友钦著作虽然很多，但绝大部分都已佚失，正如宋濂在其序中所说：“先生之《易》已亡于兵烬，所著兵家书暨神仙方技之言亦不存，其所存者仅止此而已。”所谓“仅止此而已”，即指《革象新书》。此书赵友钦生前未曾刊行，授予学生朱晖，“晖既没，其门人同里章浚深惧泯灭无传，亟正其舛讹，刻于文梓。”（宋濂序）这就是五卷本的《革象新书》。后来，明代王祚仿其“为言涉于芜冗鄙陋，反若昧其旨意之所在，……因为之纂次，削其支离，证其舛，厘其次等，挈其要领，”删简为两卷本印行。这两种版本现在皆有传世。

《革象新书》主要讨论天文，但书中很少涉及星家占验之语，主要论述天文学基本问题，可以说是一本纯粹的自然科学著作。该书在天文和物理方面多有创见，是科学史上的重要典籍。

《革象新书》有一特点：它侧重于从物理角度讨论问题。这在古代天文学著作中并不多见。例如书中多处用视物近大远小这一视觉现象来说明其所论问题。这里举一个例子，该书在说明日月远近大小时，指出：

“日体大，其道周围亦大；月体小，其道周围亦小。月道在日道内，亦犹小环在大环之中。日去人远，月去人近，月体因近视而比日体之大，月道因近视而比日道之广。”（《革象新书·日月薄食》）

中国古代传统上认为太阳和月亮大小一样，都依附在天球上运动。后来，通过对日食形成原因的分析，人们逐渐认识到月亮离地近，太阳离地远，但这中间人们忽视了一个问题：因为日月的视直径大小一样，如果月在日内，它们就不可能等大，这就与日月等大观念产生了矛盾。现在，赵友钦运用视觉理论，明确指出日体大、月体小，提出了这一被人们忽视了的问题，并作出了自己的判断。他的判断基本是正确的。

赵友钦在运用视觉理论解释天文学问题时，也有失误之处。例如他在讨论太阳早晚看上去大、中午看上去小这一问题时，就从视觉理论出发，认为太阳早上离人近、中午离人远。这种主张甚至落后于汉代人们的认识。不过，他努力用物理学理论去说明天文现象，这种做法是可嘉的。

在讨论天体运动时，赵友钦指出：

“五纬与月孛紫气皆以左旋步之，罗计都逆行，乃右旋之设。十一曜不附天而空转，则右转者亦皆左旋。其留者一日绕地一周，与天同过一度，行疾者反为迟，行迟者反为疾，退者反为疾之甚矣。盖顺行而迟疾者，皆一日绕地一周以不及天行之数为所行度。”（《革象新书·五纬距合》）

所谓“十一曜”，是指日、月、金、木、水、火、土五星，再加上月孛、紫气、罗、计都这四个假想天体。对于它们在天空中的运动状态，古人历来存在着左旋说和右旋说之争。左旋说认为所有的天体在空中都是自东向西运动的，右旋说则认为天球自东向西运动，日月五星则自西向东运动，只是由于受天球运动牵制，才显出每日也东升西落的效果。赵友钦赞成左旋说，同时又指出了两说的差异，认为它们定义的不同在于所选择参照物的不同，左旋说以大地为参照，右旋说所谓的“迟”、“疾”，则“皆一日绕地一周以不及天行之数为所行度”，即是以天球运动为参照的。这样，就从相对运动的观点，把两说统一了起来。这是一个具有扎实物理知识的学者对这一问题所持的清晰见解。

在《革象新书》中，赵友钦提出了中天观测法以求恒星赤经差，这在天文学史上是个创举。他在一个木架上顺南北方向放两根平行的木板，木板中间留一道缝隙，缝隙正对当地子午方向，其宽度只有三四分。另外准备一套特制的漏壶，以作计时之用。在观测时，一人在架下仰视，当一星来到缝隙中时，就发出声响，另一个人守壶，听到声响，即看壶箭刻画数记之。由两次刻画数之差，就可以计算出相应两颗星的赤经差来。这种方法，通过时间流逝来计算赤经差，在中国天文学史上还未曾有过，它与近代子午观测的原理是一致的。另外，赵友钦还注意到了应用误差理论来提高观测结果的可靠度，他说：“必置四壶，立两架，同时参验，庶无差忒。”（《革象新书·测经度法》）这与近代误差学说所主张的通过多次测量以提高准确度的做法是一致的。

赵友钦在科学史上贡献很多，其中最为人们乐于称道的是他为模拟日月食而设计的大型小孔成像实验。在这个实验中，他设计了可控制形状、强度的广延光源，分别考察像距和物距对成像结果的影响；光源的强度、形状，孔的大小、形状对成像的作用；像的大小与照度变化规律等诸多因素，并运用光线直进和光的独立传播这两个几何光学基本原理对实验现象作了正确解

释。在 13、14 世纪，他的这一实验是空前的。实验的具体内容，本书小孔成像条目有具体介绍，这里不再多说。

朱载堉

朱载堉（1536—1611年），字伯勤，号句曲山人，明仁宗庶子郑靖王后代，明代著名科学家、艺术家。

朱载堉虽然贵为王子，但他的生活道路并不平坦，这与他父亲朱厚烷的经历有关。朱厚烷是明仁宗朱高炽的第六世孙，袭父封爵，为郑恭王。他生活朴素，为人刚直，《明史》本传说他“自少至老，布衣蔬食”。有一次，明世宗朱厚熹修斋设醮，装神弄鬼，“诸王争遣使进香，厚烷独不遣。”嘉靖二十七年（1548年），朱厚烷又给这位世宗皇帝上书，“以神仙土木为规谏，语切直，”触到了痛处，“帝怒，下其使者为狱。”两年后，朱厚烷的伯父朱祐樞“求复郡王爵，怨厚烷不为奏，乘帝怒，摭厚烷四十罪，以叛逆告。”皇帝派人查勘，虽然叛逆之罪不能成立，依然将厚烷削去爵位，并将其禁锢于安徽凤阳。一直到隆庆元年（1567年），穆宗朱载堉即位，朱厚烷才得以平反昭雪，“复王爵，增禄四百石。”

朱厚烷被囚禁时，朱载堉刚十五岁，他“痛父非罪见系，筑土室宫门外，席藁独处者十九年，厚烷还邸，始入宫。”（《明史·诸王列传》）在这期间，朱载堉布衣蔬食，发奋攻读，致力于乐律、历算之学的研究，撰写了大量学术著作。

隆庆元年，朱厚烷冤案平反，次年，朱载堉结束了“席藁独处”的生活，重回宫中。万历十九年（1591年），朱厚烷病逝，载堉为世子，本可承继王位，但他上书皇帝，甘愿放弃。有司认为，“载堉虽深执让节，然嗣郑王已三世，无中更理，宜以载堉子翊锡嗣。”（《明史·诸王列传》）即使如此，载堉也不答应，他“累疏恳辞”，执意让爵，从他父亲卒年起，直到万历三十四年（1606年），经十五年七疏之后，神宗皇帝才予以允准，“以祐樞之孙载堉嗣，而令载堉及翊锡以世子世孙禄终其身，子孙仍封东垣王。”（同上）让爵之后，他自称道人，迁居怀庆府，潜心著书，过着纯粹学者生活。

朱载堉自幼喜欢音律、数学，《明史》本传说他“笃学有至性”。在“席藁独处”期间，他潜心著述；在恢复了王子身份以后，他仍然以学问为主，务益著书，从而为后人留下了丰富的著作。嘉靖二十九年（1560年），他著《瑟谱》，万历九年（1581年），他完成《律历融通》等书；万历十二年（1584年），又完成《律学新说》。万历二十三年，载堉“上历算岁差之法，及所著乐律书，考辨详确，识者称之。”（《明史·诸王列传》）这里提到的“乐律书”，即《律学新说》，而“历算岁差之法”则包括《律历融通》四卷、《圣寿万年历》二卷、《万年历备考》三卷、《音义》一卷。万历二十四年（1596年），载堉献其新近完成的《律吕精义》一书（包括内篇、外篇）。万历三十一年（1603年），著成《算学新书》；万历三十四年（1606年），上《操缦古乐谱》等著作。此外，尚有不明撰述年月的《乐学新说》、《灵星小舞谱》、《旋宫合乐谱》、《六代小舞谱》、《小舞乡乐谱》、《二佾缀兆图》、《嘉量算经》、《圆方句股图解》、《律吕质疑辨惑》等。上述著作，大部分都收入他的《乐律全书》中。（本条内容，参阅了戴念祖的有关研究成果）

朱载堉对古代文化的最大贡献是他创建了十二平均律。这是音乐学和音乐物理学的一大革命，也是世界科学史上的一大发明。在中国古代音律学发展过程中，如何能够实现乐曲演奏中的旋宫转调，历代都有学者孜孜不倦进

行探索，但是迄朱载堉时无人登上成功的峰顶，只有朱载堉彻底解决了这一问题。他在总结前人乐律理论上，通过精密计算和科学实验，成功地发现十二平均律是以 $\sqrt[12]{2}$ 为公比的等比数列。他称 $\sqrt[12]{2}$ 为“密率”。在其《律学新说》卷一中，他概述了十二平均律的计算方法：

“创立新法：置一尺为实，以密率除之，凡十二遍。”

在《律吕精义·内篇》卷一中，他对十二平均律做了描述：

“盖十二律黄钟为始，应钟为终，终而复始，循环无端。……是故各律皆以黄钟……为实，皆以应钟倍数 1.059463……为法除之，即得其次律也。”

为了阅读方便，引文中用阿拉伯数字代替了原文中的汉字数字。用这种方法确定的各律相应弦长，其音程相等，完全可以满足音乐演奏中旋宫转调的要求。这也正是现代国际音乐中通用的十二平均律。朱载堉一劳永逸地解决了这一问题。

在创建十二律的过程中，朱载堉也受到了他父亲的影响。朱厚烷精通音律学，他对儿子说：“仲吕顺生黄钟，返本還元；黄钟逆生仲吕，循环无端。实无往而不返之理。笙琴互证，则知三分损益之法非精义也。”（《律吕精义·序》）朱厚烷坚信旋宫转调能够实现，同时又明确指出传统三分损益法不可取，这对朱载堉有很大启发。正是在他父亲及前人工作基础上，朱载堉最终完成了十二平均律的发明。

围绕着十二平均律的创建，朱载堉成功地登上了一个又一个科学高峰。例如，为了解决十二平均律的计算问题，他讨论了等比数列，找到了计算等比数列的方法，并将其成功地应用于求解十二平均律。为了解决繁重的数学运算，他最早运用珠算进行开方运算，并提出了一套珠算开方口诀，这是富有创见之举。他还解决了不同进位小数的换算方法，作出了有关计算法则的总结。在数学史上，这些都是很引人注目的成就。

在中国古代，音律学与度量衡分不开。朱载堉在研究音律学的同时，对计量学和度量衡的演变也做了考察。他亲自做了累黍实验以确定古人所说的尺长。为了确定量制标准，他测定了水银密度，测量结果相当精确。他从理论上辩证说明了“同律度量衡”之关系，对后世影响很大。

朱载堉注重实践、实验和实测。他特别注意把自己的理论放在实践中去检验。例如他提出的名为“异径管律”的管口校正法，就是从数学中推导出来以后，又在实践中进行检验，证明了它确实有效的。他的书中记述了大量的实验事实，如管口校正实验、和声实验、累黍实验、度量实验等，就充分反映了他的这一思想方法。

朱载堉在天文学上也有很高造诣。他生活的时代，明朝通用的历法是《大统历》，因行用日久，常出差错。万历二十三年（1595年），他上书皇帝，进献《圣寿万年历》、《律历融通》二书，提请改历。其见解精辟，深得识者称许。《明史·历志》曾大段摘引他的议论。礼部尚书范谦向皇帝建议说：“其书应发钦天监参订测验。世子留心历学，博通今古，宜赐敕奖谕。”得到皇帝允许。邢云路是明末一位著名天文学家，著有《古今律历考》一书，朱载堉为之作序，序文中称，他曾和邢“面讲古今历事，夜深忘倦”，邢“摘历史紧要处问难”，朱“于灯下步算以答”，二人“携手散步中庭，仰窥玄象。”生动地描写出了他们协力钻研天文的情形。

朱载堉的科学贡献是巨大的，他是我国封建社会一位富有创造性的学者，是明代科学和艺术上的一颗巨星。

方以智

方以智（1611—1671年），字密之，号曼公，又号鹿起、浮山愚者等，兼有别号多种，是明末清初一位杰出的思想家、哲学家、科学家。

方以智是安庆府桐城县凤仪里（今属安徽省枞阳县）人，出身世家。其祖父方大镇，曾任万历朝大理寺左少卿，治《易经》、《礼记》，著述宏富。父亲方孔炤，万历四十四年进士，崇祯朝官至湖广巡抚，通医学、地理、军事，有《全边略记》、《周易时论》等著作，《明史》有传。方以智自幼秉承家学，接受儒家传统教育，曾随父宦游，至四川嘉定、福建福宁、河北、京师等地，见名山大川，历京华胜地，阅西洋之书，颇长见识。成年后，载书泛游江淮吴越间，遍访藏书大家，博览群书，交友结社。曾与陈贞慧、吴应箕、侯方域等主盟复社，裁量人物，讽议朝局，人称“四公子”，以文章誉望动天下。

崇祯十三年（1640年），方以智中进士，任翰林院检讨。崇祯十七年（1644年），李自成农民军攻入北京，崇祯皇帝自缢，方以智在崇祯灵前痛哭，被农民军俘获，他设法逃脱，辗转奔回南京。仇敌阮大铖把持南明弘光朝政，他受到迫害，化装逃离南京，流落在岭南、两广一带，以卖药为生。当清兵大举南下时，他曾联络东南抗清力量抵抗。1650年，清兵攻陷广西平乐，方以智被捕，他坚贞不屈，清将为其正义所动，听任其出家。获释后，他即易服为僧，改名弘智，字无可，别号大智、药地、浮山、愚者大师等。晚年定居江西庐陵青原山，自称极丸老人。康熙十年（1671年）冬，方以智为他事牵连被捕，解往广东，途经江西万安惶恐滩头，因疽发卒于舟中。

方以智酷爱自然科学知识，自幼塾中诵读之余，即好穷物理，曾谓“不肖以智，有穷理极物之癖。”（《物理小识》卷五）明清之季，西学东渐，方以智一面秉承家教，以《易》学传世，一面又广泛接触传教士，学习西学。经过孜孜不倦的努力，他终于在哲学和科学两方面都取得了很大成就，达到了相当的高度。

方以智学识渊博，《清史稿》本传说：“以智生有异秉，年十五群经子史略能背诵。博涉多通，自天文、舆地、礼乐、律数、声音、文字、书画、医药、技勇之属，皆能考其源流，析其旨趣。”这一评价并不过分，他在许多领域都有自己独到见解。例如，在学术分类问题上，他把学术分为三类，说：

“考测天地之家，象数、律历、音声、医药之说，皆质之通者也，皆物理也。专言治教，则宰理也。专言通几，则所以为物之至理也。”（《通雅·文章薪火》）

在这三种学术中，他讲得比较多的是通几与质测。他说：

“寂感之蕴，深究其所自来，是曰通几；物有其故，实考究之，大而元会，小而草木蠹蠕，类其性情，征其好恶，推其常变，是曰质测。”（《物理小识·自序》）

可见，所谓通几，是对事物发生根本原因的探讨，而质测则要求脚踏实地考察事物变化原因，按特性予以整理分类，总结验证已知规律，预测未来发展变化。显然，通几与质测是从研究目的和研究方法着眼对学术活动所做的分类。在中国，这种分类是方以智的独创。

在天文学方面，方以智结合中国传统的天文学和当时传教士传入的西方

天文学，讨论了地心学说、九重天说、黄赤道、岁差、星宿、日月食、历法等天文学问题。对于西方天文学知识，他非常重视，经常追踪西方天文学最新进展，例如他在讨论天体运动轨道问题时，就曾根据西方用望远镜观天发现金星有周相变化的事实，提出了金星、水星绕太阳运行的正确猜测。

方以智接受西方科技知识，并非盲从，而是经过自己的认真思考、消化。例如他对于西方地圆说，就是首先考察了地圆说赖以成立的观测证据，然后才加以接受的。对于传教士的错误说法，他则予以批驳。例如传教士曾说，太阳半径为地球半径的160多倍，而太阳距地球只有1600多万里，方以智指出这是错误的，因为据此计算（定地球圆周长约9万里），太阳的直径就将近有日地距离的三分之一大，这显然是不可能的。他运用自己的“光肥影瘦”理论，对这一问题做了解释，指出人目所见的太阳圆面比实际发光体要大，因此按几何方法进行的测量并不准确。他的这一理论后来被《历象考成》的作者所接受。

在物理学方面，方以智更有诸多创见。他从气一元论自然观出发，提出一种朴素的光波动学说，认为：

“气凝为形，发为光声，犹有未凝形之空气与之摩荡嘘吸。故形之用，止于其分，而光声之用，常溢于其余：气无空隙，互相转应也。”（《物理小识》卷一）

显然，方以智认为，光的产生是由于气受到激发的缘故。由于气弥漫分布于所有空间，彼此间无任何空隙，被激发的气必然要与周围静止的气发生相互作用，“摩荡嘘吸”，将激发传递出去，这就形成了光的传播。由此，方以智所描述的是一种朴素的光波动学说。为了与近代光的电磁波动说相区别，可以称之为气光波动说。

从气光波动说的角度出发，方以智进一步提出了光不走直线的主张，他把它叫做光肥影瘦，认为光在传播过程中，总要向几何光学的阴影范围内侵入，使有光区扩大，阴影区缩小。他并且指出，由于光肥影瘦现象的存在，使得基于光线直进性质进行的测量得到的结果都不准确。他说：

“物为形碍，其影易尽，声与光常溢于物之数，声不可见矣，光可见，测而测不准矣。”（《物理小识》卷一）

为了证实自己的观点，他还做了小孔成像实验，并且努力用自己的理论去解释常见光学现象。所有这些，在物理学发展史上，都是很新鲜的。

另外，他对于光的反射和折射，对于声音的发生、传播、反射、隔音效应，对于色散，对于炼焦、比重、磁效应等诸多问题的记述，都是领先于同时代人的。

在生物医学方面，方以智也有诸多值得一提之处。他在其《物理小识》一书中，记述有大量动植物的生态学内容和栽培、管理等知识。他引述了传教士“脑主思维”之说，介绍了他们关于人体骨骼、肌肉等方面的知识，但剔除了传教士所说的“全能的上帝创造世界”之类的内容。他自己对于传统医学也素有研究，撰有多种医学著作。遗憾的是这些著作传世不多，我们难以窥其全貌。

方以智一生著述很多，计有一百余种。其中最为流行的是《通雅》和《物理小识》，前者是综合性的名词汇编书，后者是一部笔记，他的科学见解主要集中在这部书中。他的后期代表作是《药地炮庄》和《东西均》，均为哲学著作，书中提出了一些很重要的哲学命题。他的著作中另外比较重要的还

有《浮山文集》、《博依集》、《易余》、《一贯问答》、《切韵源流》、《流寓草》、《周易图象几表》、《性故》、《学易纲宗》、《诸子燔瘃》、《四韵定本》、《内经经络》、《医学会通》等。现存共二十余种。

博明

博明，清代学者，清朝满洲镶蓝旗人，姓博尔济吉特，原名贵明，字希哲，一字晰之，号西斋，又号哲斋，生于18世纪30年代前后，卒于1788—1789年间。（本文的写作，参考了王锦光、李胜兰“博明和他的光学知识”，《自然科学史研究》，1987年第4期）

博明出身于官宦之家。他的祖父邵穆，曾任两江总督，博明自幼受到良好教育，博学多艺。他博通经史，精于书画，兼工语文、骑射。乾隆十七年（1752年）中进士，曾在散馆授编修，参加修订《续文献通考》，累官洗马，外任云南迤西道，后降兵部员外郎。一生宦迹南至云南边陲，北抵鸭绿江畔，风餐露宿，无所不尝，仕途颇为坎坷。

博明才华横溢，以博学多才而闻名，但流传下来的著作却不多，这也许是由于他仕途中衰、备受冷落的缘故。现存可查的博明著作大致有《西斋偶得》、《西斋诗辑遗》、《凤城琐录》等。就是这几种，也是他逝世十几年后才由他的同僚、好友帮助付印的。后来他的外孙穆彰阿官居高位，他的著作境遇才有所好转，得以重版。

在现存博明的这几种著作中，《凤城琐录》是他降兵部员外郎后在凤城所记，涉及当地大量古迹和典故，包含许多对朝鲜山川、地理人物的介绍。

《西斋偶得》则是一部笔记体著作，分上中下三卷，每卷均按若干标题逐一加以论述。博明的科学见解，主要反映在这部书中。就内容而言，《西斋偶得》包括的范围很广，有名称考证、源流探察、读书后记、博物趣闻等，涉及到物理、天文、数学、地理和动植物学诸多自然科学领域。他对其中一些问题的论述较之于传统内容有所突破，尤其是光学部分，极富特色，具有较高价值。

博明的光学知识大致包括以下内容：

对色觉的认识。《西斋偶得》卷中“五色”条，论到了这一问题：

“五色相宣之理，以相反而相成，如白之与黑，朱之与绿，黄之与蓝，

乃天地间自然之对，待深则俱深，浅则俱浅，相杂而间色生矣。”

在这里，博明发现，颜色中存在三个相反的“自然之对”，即白与黑、红与绿、黄与蓝。每一对颜色之间都存在着比对关系，可以相互衬托，一方色重，另一方看上去也重；一方色浅，另一方显得也浅。把它们掺在一起，就产生了别的颜色。

这段话，实际是对传统“五色相宣”理论的突破。古人一直认为颜色存在着“正色”与“间色”两类，所谓“正色”，指青、赤、黄、白、黑五色。“间色”则为杂侧之色，由不同的“正色”以不同的比例混合生成。如黄青相合为绿，赤黑相合为紫，赤白相合为红，等等。这种理论，虽然看上去与现代光学中的“原色”理论有相似之处，但它只是一种意想，是对五行学说的一种附会。而且，把黑、白二色作为“正色”，也不科学。同时，博明从诸多颜色中选出三个“自然之对”，认为它们是生成“间色”的三组原色，这突破了传统的五色之说。因为传统五色说是与五行说联系在一起的，约束力很强，只有突破这种约束，才能促进颜色学说的发展。所以，博明的创新是有意义的，尽管他的理论本身也还有待成熟。另外，博明这段话孕育了互补色的初步概念，这也是一个进步。

在欧洲，1878年，哈利（Hering）提出了一种色觉理论，认为视网膜上

存在有三对颜色相互拮抗的视锥细胞，即红—绿对、黄—蓝对、白—黑对，这三对细胞的活动结果产生了各种颜色知觉和各种颜色混合现象。显然，博明的学说与这一理论有某种相通之处。

博明提出他的三个“自然之对”，有其观察依据，紧接着上述引文，他说：

“今试注目于白，久之目光为白所眩，则转目而成黑晕，注朱则成绿晕，注黄则成蓝晕。错而愈彰，黼黻文章之所由成。”

博明从经验出发，举例说，观察白色物体，时间一长，将眼移开，脑子中会显现出该物体的黑色图像，这表明白和黑是颜色中的一个“自然之对”。对于红和绿、黄和蓝同样如此。他的这一说法并不十分准确，但他的这一发现却十分重要，这是视觉理论中现在所说的负后像现象。所谓负后像，是指当原来的色光刺激停止作用后，由于视觉暂留等生理因素的作用，原色觉向其补色转化，在脑子中呈现其补色的图像。博明所说的三个“自然之对”，除了红与绿互补外，其余并不构成补色关系。这是由于他的观察并未严格按照现代实验要求去做的缘故。尽管如此，他有意观察并记载了负后像现象，这在中国光学史上，是罕见的。

博明还对眼睛的近视、远视成因及用眼镜矫正近远视眼的原理作了解说。在其《西斋偶得》卷下“目理”一节中，他说：

“目睛体至圆，瞳体亦至圆，故其为用也，视近物则大，视远物则小。盖圆则外照之光亦如天体地球之有度数，近则度狭，远则度广，所谓车毂形是也。”

“入目之物，得其度分之多即见为大，少即见小。物近则得度分多，远则少，渐远渐渺，至极微而有所不见矣。”

这段话，是他对眼睛视物特征的理解。可以看出，他力图从视角出发讨论物体的视大小，他称之为“度分”。他认为，眼睛瞳孔呈圆球形，而透明的圆球体具有聚光作用，光线由球面到聚光点构成一定的度数，对同一物体，距眼远近不同，构成的度数大小也不同，他把这叫做“度分”。显然，这些话不够准确，但它反映了一种运用几何光学解释视觉的努力，这是应予肯定的。

从这样的理论出发，博明阐释了近、远视眼形成原因。他说：

“日视近（如读书作精巧艺事类），则目光为近物所聚，其圆体微尖，尖则本体小，外照之度亦小，于是视物形较大且愈远愈大，故视近物明，视远处散漫而不明。”

这是近视眼成因。远视眼则与之正好相反。这些描述，当然不能算是确切，但它意味着近、远视眼的形成与眼球凹凸形状的改变有关，这毫无疑问是正确的。

对于用眼镜矫正视力的原理，博明也做了解释，他说：

“目镜则因其不圆，用透明之物制极圆凹凸之形，映目便完其绽圆之体也。”

他认为用眼镜之所以能矫正视力，是由于它弥补了眼球的凹凸变形缺陷，使之恢复了原来的正常状态。这种说法，总的来说是正确的，但它比较笼统，尚未真正揭示用眼镜矫正视力的光学原理。

中国古代对视觉的认识，一直未能进入到几何光学的范围。汤若望的《远镜说》开了用几何光学解释视觉之先河。现在，博明继其后，进一步把这一做法推向了深入。这是他对光学史的重要贡献。

此外，博明还讨论过小孔成像，他认为小孔成像的决定因素是：

“其妙理则在墙板之厚薄及墙与壁相距之远近。盖板薄则光甚，厚则光小。若数寸之板，指大小孔，必不能成光，以其不能四面掩映耳。至墙与壁及塔，皆须适合其尺寸，可以算法得之。”

博明对此问题的贡献有两条：一是他探讨了小孔厚薄与成像的关系，涉及到小孔的有效孔径问题，这在光学史上尚未有过；另一条是他注意到小孔成像“可以算法得之”，实现了定量化。这是超越前代之举。

博明的科学见解还有一些。从这些见解及上述他的光学知识来看，他受到了西方科学的影响。西学影响加上博物兴趣，是他在科学上有所成就的重要原因。但他不是职业科学家，他的科学活动的深度和广度都还比较有限。

孙云球

孙云球，明末清初光学仪器制造家，字文玉，或字泗滨，江苏吴江县人。生于明崇祯（1628—1644年）初，卒于清康熙（1662—1735年）初，享年仅33岁。

孙云球出身于一个已衰落的宦宦之家。其父孙志儒，曾做过福州、漳州知府。其母董如兰，是个有知识的妇女，孙云球著作的序，就是他母亲写的。孙云球年幼时，随父母迁居苏州虎丘山畔，他自幼聪颖异常，13岁即为吴江县乡学生。不久父亲去世，家境中落，又遇明朝灭亡清军南下，生计艰难，他遂以采集出售中草药谋生。虽然如此，孙云球并未丧志，仍勤奋好学，钻研刚从西方传入的数学知识，探讨测量、算指、几何之法。他精于器械制造，《吴县志》说他“精于测量，凡有所制造，时人服其奇巧。”为了校准自鸣钟，他制造了“自然晷”，这是一种据日影以定时刻的仪器。经过使用后证明，以之判定时刻，十分准确。

孙云球生平最大的成就在于光学制作。他曾赴杭州向陈天衢学习光学，陈则学自利玛窦、汤若望。他还曾把一批杭州学者请到苏州一起讨论、研究。苏州还有个富有科学技术知识的薄珏，他的年龄稍长于孙云球，曾经制造过望远镜和浑天仪，对于孙云球有一定影响。孙云球把从他们那里学来的简略且原始的光学知识具体化，利用苏州的琢玉工艺，成功地磨制了各种凹凸透镜，并在此基础上制作了大量光学仪器，把我国民间光学制造业推向了一个新的起点。

在孙云球短暂的一生中，他制造的各类光学仪器达七十余种。这些仪器早已荡然无存，所幸的是《吴县志》在介绍孙云球时，提到了他所发明的一些仪器的名称，使我们得以窥其一斑。

在孙云球研制的光学仪器中，望远镜常被人们提及。他所研制的望远镜性能良好，据《吴门补乘》记载，浙江天台有一个名叫文康裔的人，患有严重近视，孙云球曾和他一道，登上虎丘山，用自制的望远镜眺望，看到苏州城内的楼台塔院近在眼前，清晰可辨；天平、灵岩、穹窿诸峰苍翠挺拔，历历在目。文康裔赞叹不已，视为神技。

另外，孙云球还为苏州眼镜业的发展做出了重要贡献。用以矫正视力的眼镜并非孙云球所发明，孙云球的贡献在于他创造性地采用水晶为原料，磨制成各种凹凸镜片，并根据近视、远视不同情况，“随目对镜”，使人们配到适合自己眼睛的镜片，“以年别者老少花，以地分者远近光”，从而使视力得到矫正。这种水晶眼镜在当时很引人注目，人们不惜出重资购买，苏州眼镜业也就在此基础上兴盛起来了。

孙云球还制有“存目镜”，用这种镜来观察物体，“百倍光明，无微不瞩”，能将极细小的东西，看得一目了然。这有可能是一块放大镜或一架简单的显微镜。考虑到单个放大镜在此之前已经存在，宋代已用水晶照物，明代已有“单照”，但这类放大镜很难达到此处所说的“存目镜”的效果。所以，孙云球所发明的存目镜，极有可能是一架简单显微镜，即具有较高放大倍数的凸透镜。

还有一种“万花镜”，“能化一物为数十者”，“能视一物化为数十”，这种镜会使一个像变成多个，有些类似于今天的万花筒。估计其结构是一种呈菱形折射的镜片，依靠光线的多次反射形成群像。

另外，“察微镜”也是孙云球的发明之一。如果说“存目镜”是一种简单显微镜的话，那么“察微镜”就应该是一种复合显微镜。对于孙云球来说，制造复合显微镜的技术障碍并不存在。因为他能够制造望远镜，在制造望远镜过程中，只要稍稍改变一下透镜的装置方法，望远镜就会变成一架复合显微镜。只是由于他英年早逝，加上中国当时科学状况的限制，这架显微镜在当时的科学研究中，未能发挥它应有的作用。

值得一提的还有“半镜”。这种“半镜”，不太可能是现代意义上的双焦点眼镜，它应该是一种半圆盘形的眼镜，即眼镜仅仅有下面半块透镜，佩戴者眺望远方时可以直接通过上部，不必借助镜片。这种形式的眼镜现在有时还能看到，它特别适应于老花眼之类视者使用。孙云球当时能制作出这种眼镜来，也是一个进步。

除了这些仪器之外，孙云球还磨制过多面镜、夜明镜、幻容镜、鸳鸯镜、放光镜、夕阳镜等等。这些仪器性能和用途各异，但均“巧妙不可思议”。孙云球还总结多年制镜经验，写成《镜史》一卷，他的母亲董如兰亲自为该书写序。这本书的问世，对后世光学仪器制造技术影响很大，可惜的是它后来失传了，使我们今日难以窥其全貌。

黄履庄

黄履庄（1656年—？），清初发明家，江苏扬州一带人。他10岁丧父，家境贫困，以投亲靠友为生，但又从小聪明能干，喜爱制作，一生创造发明很多。据说他七八岁时就自制出一种内含机巧的玩具，后来，“因闻泰西几何、比例、轮擦机轴之学，而其巧因以益进”，终于成了清初一位有成就的发明家。

黄履庄的生平事迹见于文献记载者很少，仅其表兄张潮《虞初新志》为他立有传记，另外清代吴陈琬的《旷园杂志》有一则关于他发明机械狗的记载，这是关于他目前仅见的两条史料。我们对于他的了解依据的也就是这两条史料。

据《虞初新志·黄履庄传》的记述，黄履庄擅长于制作，28岁以前，他已制成相当多的机械仪器，并为此著了一本《奇器目略》。不过，他的这些发明已不复存在，他的书也失传了。他28岁以后的事迹我们一无所知。《奇器目略》中的一些发明，则被他的表兄“偶录数条，以见一斑”，选出27种仪器的名称写进了他的传记，从而使我们对于这位发明家的发明，可以有初步了解。

在黄履庄的发明中，有所谓“验冷热器”，即温度计。据记载，“此器能诊试虚实，分别气候，证诸药之性情，其用甚广，另有专书。”只是“专书”及实物都已失传，我们难以判断其具体构造，估计应属于气体温度计之类装置。

黄履庄还发明了“验燥湿器”，即湿度计。该器的特点是：“内有一针，能左右旋，燥则左旋，湿则右旋，毫发不爽，并可预证阴晴。”中国古代传统的测验燥湿的装置是一种天平式的验湿器，《淮南子·说山训》说：“悬羽与炭，而知燥湿之气。”说的就是天平式验湿器。另外，古人对于空气湿度变化可以引起琴弦长度变化这一事实也早有所知，王充《论衡·变动篇》即曾指出：“天且雨，……琴弦缓”，就是说的这一事实。从这一物理现象出发制成的悬弦式湿度计，大约于1670年左右传入我国。黄履庄在1683年制作成功了“验燥湿器”，他的发明是属于天平式还是属于悬弦式，抑或是其他原理，例如气压计，我们不得而知。可以肯定的是，他发明的“验燥湿器”有一定的灵敏度，可以“预证阴晴”，有一定的实用价值。

黄履庄发明的“瑞光镜”，可以起到探照灯的作用。在我国，明末熊伯龙（1617—1669年）撰《无何集》，其《天地类》篇就有探照灯的记载：“今之瑞光镜，阴阳凹凸，以烛贴凹一面，照壁如月。人以面承其光，其暖如日。”这种镜，是把烛焰放在凹面镜的焦点上，烛光经凹面镜反射后，近似形成平行光线，亮度增加，照到壁上，犹如月光。从“以烛贴凹一面”来看，这凹面镜的焦距不大，因而它的口径也必然有限。黄履庄的发明，对之有很大改进，他大大增加了凹面镜的尺寸，最大的直径达五六尺。《虞初新志·黄履庄传》记载道：“制法大小不等，大者五六尺，夜以灯照之，光射数里，其用甚巨。冬月人坐光中，遍体升温，如在太阳之下。”当时的光源只能是蜡烛之类，凹面镜的口径大，它所能容纳的光源也就大，这就使得人们可以提高光源强度，这样经过反射形成平行光以后，照在人身上就有“遍体生温”的感觉，亮度也大大增加了。当然，原文这段记载，对其射程和辐射热量的描写，有些夸张渲染，这也是应予指出的。

上述这些发明，都是富有物理学意义之举。此外，黄履庄还发明了不少自动机械，亦皆构思巧妙，令人叹为观止。吴陈琬的《旷园杂志》卷二十八记载黄履庄发明“机械狗”之事，说：“黄履庄精西洋轮捩之学，尝制木狗，置门侧，卷卧如常，遇客至，触机而起，吠不止。一时莫辨其真伪。”这类记述，常带有夸张成分，不可过于当真。不过，它所反映的黄履庄精于机械制作这一事实，应该是可信的。类似这类机械还有所谓“真画”（“人物马兽，皆能自动，与真无二。”）、“自动戏”、“自行驱暑扇”、“木人掌扇”等。

黄履庄的发明甚多，除上面提及的内容之外，较重要的还有一些，诸如显微镜、千里镜、望远镜、取心镜、临画镜、多物镜、灯衢、龙尾车（汲水机械）、报时水、瀑布水等等。这些发明的具体情形，我们已不甚了了，但有一点可以肯定：作为清初一位发明家，黄履庄当之无愧。

郑复光

郑复光（1780年—？），字浣香，又字元甫，安徽歙县人，我国19世纪三四十年代卓有成就的几何光学专家。

郑复光自幼性格沉默，好深思。他少年时入家塾读书，稍长，以监生入北京国子监就读，那里学习条件优越，他又刻苦好学，学业大有长进。不过，真正为他日后成为一个科学家奠定了基础，还在于他对于自然科学的兴趣。他广泛阅读，勤于思考，对“四元、几何、中西各术，无不穷究入微。”（《歙县志》卷十）他在平面几何学方面有较大兴趣，也喜爱摆弄和探究各种光学器具。这些，为他后来从事几何光学研究做了准备。

郑复光青少年时曾随父亲到过古城扬州，后又广泛游历，足迹所及，几遍全国南北。所到之处，注意考察当地地理形势、气候物产、生产技术，并广结名流学者、能工巧匠，这为他在科学技术研究上取得多方面成就提供了条件。他的成就，主要在数学、物理和机械制作等方面，而以物理学中的光学研究最为突出。

在数学方面，他自幼即喜爱几何学，后又结识了数学名家汪莱、李锐、罗士琳、张敦仁等人，互相切磋，研讨算理，颇有收获。他的数学著作有《周髀算经浅注》、《割圆弧积表》、《正弧六术通法图解》、《笔算说略》、《筹算说略》等。在现在安徽省博物馆收藏的《郑浣香遗稿》中，还有一份郑复光的几何学著作残缺手稿。该稿无书名，内容包括点、线、面、比例等有关平面几何的作图问题。郑复光的工作，在当时数学界有一定影响。（参见张秉伦等，《安徽科学技术史稿》，安徽科技出版社，1990年3月第1版，343—347页）

在物理学方面，大约在19世纪初期，郑复光受扬州“取影灯戏”和广东“量天尺”的启发，开始研究光学问题，进行光学实验，研制光学仪器。一次，他读到西汉人所写的《淮南万毕术》，其中提到：“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”这就是有名的冰透镜取火问题。但冰透镜究竟能否取火，很多人持怀疑态度。郑复光决定用实验来解决这一问题。嘉庆二十四年（1819年）冬，他亲自做了实验。他用一把盛有热水的凹底大锡壶，将一块半径为一尺七八寸的冰磨成双面凸起的冰透镜，然后把冰透镜支架起来，面对太阳，在其聚焦点上放上纸煤。过了一会儿，纸煤冒出一股青烟，燃烧起来。这证明古代关于削冰取火的记载确凿可靠。他还根据实验情况，从理论上对影响冰透镜取火的各种因素做了探讨，得出了基本正确的结论。

另外，郑复光还制造出了白天黑夜均可放映的幻灯机。还曾研制成一架望远镜，用来观察月球，清晰可辨，使观者拍案叫绝。在研究光学问题的过程中，他边钻研、边实验，并把自己领悟的光学原理应用到具体光学仪器的制作，然后将实验结果及仪器制作方法详细记录成稿，历时十个寒暑，终于在1835年写成了他的不朽著作《镜镜詥痴》。这部书共分五卷，书中对于物体的颜色、光的直进、反射和折射、反射镜和透镜的成像、光学仪器的制造等都作了比较详细的论述，是一部系统的光学著作。郑复光的光学成就，主要体现在这部书中。

与《镜镜詥痴》构成姊妹篇的，是他的另一重要著作《费隐与知录》。该书把当时人们认为怪异不可解的各种现象，按天地、日月、星辰、风云、雷雨、霜雪、寒暑、潮汐、饮食、器皿、鸟兽、虫鱼等方面，归纳成225条，

采用问答式写法，一一作以解释。它虽然是一本普及性读物，但在一定程度上反映了我国当时的科学水平，而且也包括郑复光自己一些新的见解。郑复光的科学思想，相当一部分也见于这本书中。

在机械制造方面，郑复光也颇有可称道之处。他曾研制成“测天之仪，脉水之车”。他也是我国早期从事火轮船研究的先驱之一。19世纪30年代，西方蒸汽机刚传入我国不久，郑复光便根据几张传抄的火轮船图，开始研究蒸汽机原理和火轮船的构造。他经过苦心钻研，终于写成了《火轮船图说》一文，约三千余字，较详细地介绍了火轮船的构造特点和蒸汽机的工作原理，并把它附于《镜镜詥痴》书末公诸于世，受到当时学者重视。著名学者魏源编著《海国图志》时，全文收录了郑复光这篇图说。

鸦片战争以后，抗敌御侮风气高涨，士大夫中“师夷长技以制夷”的思想进一步流行，人们主张制造有益于战守的船舰、火炮和器物。当时曾有人上书清政府，举荐郑复光制造望远镜。但当时朝廷只注重于船坚炮利，对其他不甚在意，故此事未果。不久，御史陈庆庸委托他参与校阅修订丁拱辰编著的《演炮图说辑要》，他欣然接受。事成之后，他又继续他的光学研究，增订其《镜镜詥痴》一书，并于道光二十六年（1846年）将其定稿并刊行。

咸丰三年（1853年），郑复光再次到北京，这时他已是74岁的老人了。此后事迹不详，卒年也未见记载，有些书干脆就把他的卒年定为1853年。

郑复光虽然成就卓著，但也有其不足之处。他的理论思维水平在当时并未臻为一流。例如他坚信雷击不孝的传说，认为“雷击不孝，固可深信而不疑者矣，岂尽神道设教欤？”（《费隐与知录·浇刻无后理即是神》）他说雷确实要击杀不孝之人，这并非仅仅是“神道设教”——用虚构的神仙说来补益教化，而是确有其事的。到了19世纪中叶，他还有这种认识，是不应该的。另一方面，他在论述问题时有一种泛神论倾向，例如他在讨论“地在中，虚悬不坠”的原因时说：“盖地居天中，自是天地之质，本然之所。”（《费隐与知录·地居天中无物可比》）认为本来就应该如此。又如他在讨论皮毛棉花之所以能保暖时说：“此有二理，一由火性自具，一由蒙茸之质，能含暖气。”（《费隐与知录·皮棉之暖由能含气》）何谓“火性自具”？说穿了就是说它因为有火性，所以能保暖。这就是一种泛神论倾向。这种倾向对于人们深入追究事物发生原因，是不利的。不过瑕不掩瑜，这类思想在郑复光的科学活动中，仅占很小成分。

理论学说

宇宙演化理论

在对宇宙生成演化问题的认识上，中国古人有着多种多样的见解。择要言之，这些见解可以分为三类：不变说、循环论、演化说。

主张宇宙不变的，以《庄子·知北游》记载的孔子师徒的对话为代表：“冉求问于仲尼曰：未有天地，可知邪？仲尼曰：可，古犹今也。……无古无今，无始无终。”晋朝郭象注解这段话：“言天地常存，乃无未有之时。”即是说，古时与现今一样，宇宙并不存在生成演化问题。董仲舒的“天不变，道亦不变”之说，亦可归于此类理论。

用循环论观点解释宇宙生成演化，这在《庄子》书中已有萌芽，佛教的传入，加重了这种倾向，最终形成了一套精致的宇宙循环论学说。《隋书·经籍志》对这一学说有所描述：

“佛道天地之外，四维上下，更有天地，亦无终极。然皆有成有败。一成一败谓之一劫。自有此天地已前，则有无量劫矣。”

这一学说对中国人影响颇大，在后世一些哲学家和文学家身上，屡屡可窥此说之影子。

但是，在中国古代哲人中，占主导地位的是宇宙逐渐生成演化的观点。这一观点早在先秦时期就已经比较普及。神话传说盘古开天地反映出上古先民对宇宙起源的认识，即已透露出宇宙早期是浑沌的，经过演化逐渐形成后世所见形状的思想萌芽。诗人屈原脍炙人口的诗篇《天问》，开篇伊始就提出了与天地起源有关的问题，也反映了这种认识。哲学家老子则直截了当提出：“天下有始，以为天下母。”阴阳家的代表人物，首创五德终始学说的驺衍，善谈天事，齐国人称其为“谈天衍”，他主张宇宙创生学说，到处“称引天地剖判”，推演“天地未生”。驺衍的学说在当时诸侯国中受到普遍欢迎，司马迁的《史记·孟荀列传》对之有生动记述，很能说明问题。

承认宇宙是逐渐生成的，必然要回答一个问题：宇宙由何而生？老子《道德经》回答说：“天下万物生于有，有生于无。”《庄子·庚桑楚》也说：

“万物生于无有。有不能以有为有，必出乎无有。”

这里所说的“有”、“无”，是一对哲学范畴，分别表示生成天地万物的原初物质的存在与否。老庄主张有生于无，这有其内在的逻辑依据，因为就任一具体事物而言，都是由不存在到存在，即是由无到有的。由此推而广之，把宇宙视为一个整体，而且认为它是逐渐生成演化而来的，那么，在其存在之前的阶段，自然就是“无”了。三国时王弼在为老子《道德经》作注时，对此做了总结，指出：“天下之物，皆以有为生，有之所始，以无为本。”这样说，是逻辑的必然。

可是，逻辑并不能解决所有问题。绝对的无怎么能产生出有呢？西晋裴頠《崇有论》就明确提出：“夫至无者，无以能生。”认为绝对的“无”不能产生“有”来。对此，即使睿哲如老子，也只能模糊其词地解答说：“道生一，一生二，二生三，三生万物。”这当然难以令后人满意。

为了避免“有生于无”的困境，古人对这一命题做了修正，认为无不是无有，而是无形。这里“形”指固定的形体，无形，指没有固定形体的生成宇宙万物的原初物质，即所谓浑沌不分的气。《淮南子·原道训》指出：

“夫无形者，物之大祖也。……视之不见其形，听之不闻其声，循之不得其身，无形而有形生焉。……是故有生于无，实出于虚。”

《淮南子》的这一修正，既满足了讨论这一问题所不可避免的逻辑要求，又解答了人们关于无如何生出有来的疑窦，把问题向前推进了一大步。这一推进，直接导致了中国古代宇宙演化理论学说的繁荣，这首先就体现在《淮南子》书中。

《淮南子》多处涉及宇宙生成演化问题，其中以《天文训》、《精神训》、《俶真训》论述最为详细。而《天文训》的论述尤其具代表性：

“天地未形，冯冯翼翼，洞洞 ，故曰太昭。道始于虚霏，虚霏生宇宙，宇宙生气。气有涯垠，清阳者薄靡而为天，重浊者凝滞而为地。清妙之合专易，重浊之凝竭难，故天先成而地后定。天地之袭精为阴阳，阴阳之专精为四时，四时之散精为万物。积阳之热气生火，火气之精者为日；积阴之寒气为水，水气之精者为月；日月之淫为精者为星辰。”

综合这段话及《淮南子》别处的论述，可以了解当时人们心目中的宇宙演化图景：宇宙初始是一团浑沌不分的气，由这团气中产生了时间和空间，这导致阴阳二气的分离。阳气体性轻清，飞扬上升而为天；阴气体性重浊，凝结聚滞而成地。阴阳二气的集聚，导致日月星辰的产生；阴阳二气的推移运动，造成四季往复，万物衍生。宇宙万物就是这样逐渐演化而成的。

《淮南子》绘出的宇宙演化图景具有典型性，后世的宇宙演化学说，大多是在《淮南子》宇宙演化论基础上发展出来的。其中比较重要的有《易纬·乾凿度》、王符《潜夫论》、张衡《灵宪》等著作中的天地起源理论。《乾凿度》对气演化过程作了阶段区分，给出了代表不同阶段的太易、太初、太始、太素等专有名称。阶段性概念的出现，标志着认识的深化，也有利于展开讨论，因而广泛被后人采用。王符的宇宙演化学说则特别强调人在宇宙演化进程中的作用，认为人既是宇宙演变的产物，又可以参与宇宙演变过程。这就像“车上御驰马，篷中擢舟船”一样，人虽然不能脱离天覆地载，但可以通过自己的行为作用于天地，使宇宙演化沿着人所选择的方向进行。张衡的理论重视“道”的作用，认为道本身也有一个发生、发展、演变的过程。道既是宇宙演变的产物，又是宇宙进一步演变的条件，它又促成了宇宙的演变。这一认识，无疑多少反映了古人对自然规律在宇宙演变过程中所起作用的思考。

宇宙演化理论要说明天地的形成，这就必然要与宇宙结构学说发生联系。早期的演化理论认为元气轻清，上浮为天，阴气重浊，下凝为地，天在上，地在下。这与盖天说的宇宙结构模型相一致。浑天说产生后，张衡作为浑天说的集大成者，他的宇宙演化理论也作了相应改进，认为“元气剖判、刚柔始分、清浊异位”的表现是“天成于外，地定于内”，即是天包着地的。这与浑天说的宇宙结构模型是一致的。

但是，既然阳气轻清，理应上扬，它为什么不上浮形成天，而是要包在地外？对此，在张衡的理论中找不出合理的答案来，一直到了宋代，朱熹才提出了一个比较合理的力学解释，他说：

“天地初间，只是阴阳之气，这一个气运行，磨来磨去，磨得急了，便拶许多渣滓，里面无处出，便结成个地在中央。气之清者便为天，为日月，为星辰，只在外常周环运转，地便只在中央不动，不是在下。”（《朱子语类》卷一）

朱熹的理论用习见的漩涡现象比拟宇宙演化，比较合理地说明了浑天格局的形成原因。这一理论对后世影响很大，它标志着中国传统宇宙论发展到了新的阶段。一直到西方近代科学关于宇宙起源演化的学说传入我国，这一理论才最后寿终正寝。

时间观念

时间是十分重要的基本物理量，中国古人对时间观念进行过内容丰富的探讨。这一探讨首先体现在古人对时间的抽象定义上。

古人在谈论抽象的时间概念时，常常用“宙”表示时间。早在《管子》书中，就有《宙合》篇。西汉刘向对这一篇名的解释是：“古往今来曰宙也。”可见，这里的“宙”指的是抽象意义的时间。“古往今来”的说法，表明古人是从时间的流逝性及流逝的不可逆性角度出发定义时间的。

在中国古代典籍中，《墨经》对时间概念的讨论，最具分析精神，它具体讨论了时间的定义、时间的构成要素、时间与运动的关系等。在《墨经》中，时间被抽象称为“久”，其具体定义为：

《经》：“久，弥异时也。”

《说》：“久，古今旦暮。”

这是说，时间概念是各种不同具体时刻的总称。像“古、今、旦、暮”，这些都是具体的时间名称，它们的总和就是抽象的时间概念。

墨家还进一步分析了时间的构成要素：

《经》：“始，当时也。”

《说》：“始，时，或有久，或无久。始，当无久。”

本条分析的是时刻和时段的区别。墨家认为，时间可分为有久之时和无久之时，有久之时对应于一段区间，无久之时则相当于时间坐标轴上的一个时点，这里被定义为“始”。近代物理学在讨论时间概念时，也非常重视时刻和时段的区别，认为它们是时间计量的基础。《墨经》的讨论能涉及于此，亦属难得。

《墨经》还对运动和时间的关系做了探索，认为运动和空间变化、时间流逝分不开：

《经》：“行修以久，说在先后。”

《说》：“行，者行者必先近而后远。远近，修也；先后，久也。民行修必以久也。”

者，这里是“诸”的省文。这条意思是说，运动（行）要经过一定的空间距离（修），必须持续一定的时间（久），即运动和时间流逝、空间变化是分不开的。把这一描述进一步数学化，就构成了近代物理学中常见的速度概念。所以，墨家此条的描述，为速度概念的建立开辟了通道。

古人除了建立抽象时间概念，还从多方面探讨了时间特性。《淮南子·原道训》中有一段话，就涉及到时间流逝的客观性问题：

“时之反侧，间不容息，先之则太过，后之则不逮。夫日回而月周，时不与人游。故圣人不贵尺之璧，而重寸之阴，时难得而易失也。”“间不容息”，表明时间流逝是连续的；“太过”、“不逮”之语，则是说时间在均匀流逝，其流逝是客观的，独立于人的意识之外。这一认识非常重要，因为只有均匀而客观的流逝，才能保证时间成为讨论物质运动的基本概念。时间流逝的客观性，决定了人们对其流逝快慢主观感觉的不可靠性。《淮南子·说山训》中有一段话，对之有形象描述：

“拘囿圜者，以日为修；当死市者，以日为短。日之修短有度也，有所在而短，有所在而修也，则中不平也。”

中，指的是人的内心。这里认为，一天的长短本来是一定的，有人感觉它短，

有人感觉它长，是由于他们内心不平静的缘故。这段话把时间流逝的客观性及人们对之主观感觉的不确定性做了清晰区分，表明了对时间概念认识的深化。

古人在探讨时间特性时，还涉及到同时性问题。这些涉及多见于神话幻想之中。例如神话小说《西游记》中就多处提到“天上一日，下界一年”的说法，《述异记》中有“烂柯山”的传说，亦属同类。古代文学作品中此类说法甚多，俯拾皆是。这些说法都主张不同场合时间流逝快慢不同，这与爱因斯坦相对论时空观主张的同时相对性，在结论上有相通之处。但应指出，二者的基础及内涵完全不同。中国古人的提及，主要是出于对尘世仙境差别的憧憬，并将这一差别用时间流逝反映出来，是文学艺术想象力所致，没有科学基础。

在中国的时间观念发展史上，元初耶律楚材率先涉足地方时概念，这是值得一提的。事情起源于对一次月食的观察，根据当时通行历法《大明历》的推算，食甚应发生在子夜前后，而耶律楚材在塔什干城观察的结果，“未尽初更而月已蚀矣。”他经过仔细思考，认为这不是历法推算错误，而是由于地理位置差异造成的。对于月食，各地是同时看到的，但在时间表示上则因地而异，据此，耶律楚材提出了里差概念，认为在地面上东西相距较远的两地有不同的地方时，这是我国时间概念向前发展的标志。

古人对时间特性的探讨，还涉及到其有限与否的问题。在此问题上，古人两方面观点都有。《庄子·庚桑楚》说，“有长而无本剽者，宙也。”本剽，即指始终。这是说时间无始无终。张衡《灵宪》则直截了当提出：“宙之端无穷。”即时间是无限的。类似说法，在历史上还有很多。另一方面，主张时间有限的，也大有人在。老子《道德经》说：“天下有始，以为天下母。”《淮南子·天文训》说：“道始于虚霁，虚霁生宇宙。”西汉扬雄说：“阖天谓之宇，辟宇谓之宙。”这些说法，都认为时间有起点，即是有限的。

主张无限时间观念的，多以逻辑推理作为自己的立论依据。《庄子·齐物论》说：“有始也者，有未始有有始也者，有未始有夫未始有有始也者。”这就是以逻辑推理的方式，论证宇宙并不存在一个最初的开始。即认为宇宙在时间上无限。

也有用时间古今差别的相对性来论证的。《庄子·知北游》记述了孔子师徒的一段对话：“冉求问于仲尼曰：‘未有天地可知耶？’仲尼曰：‘可，古犹今也。……无古无今，无始无终。’即是说，古代情况与现代一样，由此推论上去，时间当然就是“无古无今，无始无终”了。成书于晋朝的《列子》提到：“殷汤问于夏革曰：‘古初有物乎？’夏革曰：‘古初无物，今恶得物？后之人将谓今之无物，可乎？’古今差别是相对的，据此上溯，时间当然没有起点。

但是，古人主张时间有起点的，也有他自己的逻辑，也值得一提。中国古代主张时间有起始的观点，有一共同特征，都认为时间起源于混沌状态的结束。他们认为宇宙是从混沌状态中演化出来的，在混沌状态下，时间概念失效。这反映了他们对时间本性至为深刻的认识。因为时间与物质的运动分不开，时间的流逝只有通过事物的变化才能反映出来，才能被人们感知。古罗马卢克莱修在其《物性论》中，也有类似说法。由此，在混沌状态下，物质缺乏有序运动，时间流逝也就无从得以反映，这就不可能建立时间观念。所以，认为时间始于混沌状态结束的结论，顺理成章，而且与宇宙演化理论

并协，这是古人的高明之处，不能轻易否定。

随着时间计量的进步，古人对时间本原的认识也渐趋深入。因为时间流逝是通过物质运动表现出来的，在经典物理学范围内，对时间本源的认识也就成了对最能反映时间均匀流逝特征的物质运动形式的探讨。其表现形式就是对基本时间单位的选择。大自然提供给人们的自然时间单位是年、月、日，日是基本单位，积日成月，积月成岁。由此，对日这一自然时间单位的探讨，充分反映了古人对时间本原的认识。

在传统上，古人一般把太阳连续两次上中天的时间间隔定义为一日，这就意味着太阳的周日视运动能够本质地反映出时间流逝特征。这种做法有一定道理，因为太阳的周日视运动，基本上是地球自转的反映，而在现代原子钟被采用前，依地球自转计时是人们从大自然所能获得的最为均匀的计时系统。后来，人们对之又做了改进。据《旧五代史·马重绩传》的记载：“重绩又言漏刻之法，以中星考昼夜，为一百刻。”“以中星考昼夜”，是指以同一恒星连续两次上中天的时间间隔作为一日，其物理实质是以地球自转作为时间计量标准。由此，这一做法是富含科学内容的。

在对时间本原的认识上，明末徐光启具有重要地位。他通过比较各种计时方法的优劣，明确提出了“时刻之原”概念，要求人们选择最能反映时间均匀流逝特征的物质运动形式作为计时之本，据《明史·历志》记载，他说：

“定时之术，壶漏为古法，轮钟为新法，然不若求端于日星。昼则用日，夜则任用一星，皆以仪器测取经纬度数，推算得之。”

“端”，即本原之意。徐光启又说：

“太阳依左行分昼夜，故此独为时刻之原。”（《崇祯历书·浑天仪说》）

左行，指太阳每天的东升西落，它与恒星周日视运动一样，都是地球自转的反映。徐光启将其推崇到“时刻之原”的高度，反映出16世纪中国人对时间本原的探讨，已经进入理论化阶段，这是应该肯定的。

空间观念

中国古代有着丰富多采的空间观念，这些观念极富科技史研究价值。这首先体现在古人对空间概念的定义上。

在对空间概念的抽象上，古人有多种说法。常见的是用空间的三维性来定义空间。《管子》书中有《宙合》篇，后人解曰：“四方上下曰合”，“合”即指空间。由“四方上下”着眼定义，显然是强调的其三维性。

也有以“宇”表示空间的。据《文子·自然》篇记载：“老子曰：……四方上下谓之宇。”这也是着眼于空间的三维性。

《庄子·庚桑楚》对空间的定义则强调其客观实在性，说：“有实而无乎处者，宇也。”即是说，空间是一种客观实在，它可以容纳一切，其本身却不能被别的东西容纳。这一定义同时也涉及到了空间的无限性。

《墨经》对空间的定义颇富分析色彩。《经上》有“宇，弥异所也”，《经说》解释道：“宇，东西家南北。”即空间是各种不同场所或方位的总称。这里也涉及到空间方位定域问题。

凡此种种，不一而足，这里从略。

除了对空间概念做出定义，古人还就空间性质进行过内容广泛的探讨。空间有限无限问题，就是他们探讨的内容之一。

在古代中国，很多人主张无限空间观念。例如，《管子·宙合》即说：“宙合之意，上通于天之上，下泉于地之下，外出于四海之外，合络天地，以为一裹。散之至于无间，……是大之无外，小之无内，故曰有囊天地。”天地囊括万物，宙合又包含天地，大之无外，这样的空间，应该说是无限的。最后一句特别指出，无限性是表现在宏观、微观两个方面的。这一认识非常深刻。

唐代柳宗元《天对》，认为，“无极之极，莽弥非垠；”“东西南北，其极无方。”明确指出空间是无限的。因为是无限的，所以它“无中无旁”，没有中心。由无限空间观念进一步否定宇宙中心的存在，在人类认识史上是一大进步。

我国古代对空间无限性的议论甚多，这里不再详列。

空间无限的判断，合乎思维逻辑。古人常认为，有形则有极，无形则无尽，空间是无形的，所以它是无极无尽的。这一思想方法具有普遍性，无论是在中国还是在古希腊，都可以觅到它的踪迹。古罗马卢克莱修提出的投掷飞矛的理想实验，在思路亦与此相仿。

另一方面，古人也确有主张有限空间观的。例如西汉学者扬雄即曾提出：“闔天谓之宇。”空间（宇）的范围以浑天说所主张的天球（闔天）为尺度，当然是指有限空间。这种有限空间观念的提出，也有它自己一定的观测依据和数理推算过程。三国王蕃的议论，就充分表明了这一点。据《开元占经》的记载，王蕃说：

“夫周径固前定物，为盖天者尚不考验，而乃论天地之外，日月所不照，阴阳所不至，日精所不及，仪术所不测，皆为之说，虚诞无徵，是亦邹子瀛海之类也。”

王蕃反对那种任意臆测天球之外空间范围的方法，他的话表现了一种求实精神。在历史上，很多浑天家都计算过天球的大小，其结果虽然不能成立，但他们重视用数理方法研究空间性质，也有其可取之处。

在这里，张衡的工作值得一提，他在其《灵宪》中说：

“八极之维，经二亿三万二千三百里，南北则短减千里，东西则广增千里。自地至天，半于八极，则地之深亦如之。通而度之，则是浑已。将覆其数，用重（差）句股。悬天之景，薄地之义（仪），皆移千里差一寸得之。过此而往者，未之或知也。未之或知者，宇宙之谓也。宇之表无极，宙之端无穷。”

张衡所持是一种椭圆天球观念，认为这个天球的平均直径是二十三万二千三百里。他特别强调，要得到这一结果，所用的数学工具是重差勾股术，物理依据是所谓地隔千里、影差一寸的假说。此外，张衡的话中还隐含了这样一种认识：用数理方法所能观测和认识的空间是有限的，超出这个范围，只能用思辨的方法去解决。换言之，在讨论空间范围时，哪些属于物理问题，哪些属于哲学问题，张衡的理论对之做了区分，这充分表现了他的高明。

中国古代空间观念的另一特征，是其主张空间不同方位有不同的性质。古代广泛流传的“五方配五行”的说法，就反映了这种认识。五方，指东、西、南、北、中五个方位。古人持地平大地观，认为地是平的，地的中心在今河南登封附近。从这种观念出发，可以建立起绝对的东、西、南、北、中方位概念来。古人认为，五行按木、金、火、水、土顺序分别属于上述五方。即空间方位不同有着五行意义的差异。

与上述概念相应的是古人对空间取向性的重视，认为空间各向异性，方向具有绝对意义。《管子·七法》篇云：“不明于则而欲出号令，犹立朝夕于运钧之上。”立朝夕，即确定东西取向。在旋转的钧石上不能建立方向标志，因为方向本身是固定的。这里就涉及到方向的绝对性。

除了水平方向，古人对上下的取向亦很重视，认为这是自然本身的特质，人类在主观上不能对之加以更改。例如，《墨子·辞过》说：“圣人有传：天地也，则曰上下；四时也，则曰阴阳；人情也，则曰男女；禽兽也，则曰牡牝雄雌也。真天壤之情，虽有先王不能更也。”这些，都反映了一种绝对的上下观念。

中国古人的绝对上下观，与其固有的地平大地观分不开。古人缺乏地球观念，认为大地是平的，在量级上与天的大小差不多，由此，上下差别是绝对的，背离地面，就是向上，否则为向下。这与古希腊人不同。希腊人笃信地为球形，他们的上下观以指向地心为下，背离地心为上，可谓是一种相对的上下观念。绝对上下观与地球说不相容，在清初关于大地形象的争论中，这一点得到了充分体现。

古人对空间取向的重视，有一定的物理因素作用。水平四向观念的产生，实际是对地球因自转而导致的自转轴在空间中指向保持不变这一物理现象的反映；上下观念的产生，则是对重力现象有所体会的结果。

空间取向是绝对的，这等价于说空间各向异性。古人这一认识与现代所谓的宇宙学原理大相径庭。宇宙学原理主张宇宙均匀各向同性，它揭示了大尺度空间物质分布的特性。而中国古代有关认识，则是就人直接可见尺度而言，至少就太阳系来说，这一判断具有物理意义的真实性，它与现代宇宙学原理是互补的。

古人讨论空间观念，不可避免要涉及时间和空间的关系。

在古人有关时空关系的议论中，占主导地位的是时间与空间相关的说法。例如，《管子》中有《宙合》篇，将时间、空间相提并论；古籍中常见四时配四方之说，将特定的时空相联系。《庄子·则阳》引容成氏曰：“除

日无岁，无内无外。”没有时间的累积，连空间方位的内外都无从区分。明末方以智《物理小识》对时空关系更有精彩论述：

“《管子》曰宙合，谓宙合宇也。灼然宙轮转于宇，则宇中有宙，宙中有宇。春夏秋冬之旋转，即列于五方。”这里把时间比成轮子，认为时间的推移在空间中进行，空间中有时间，时间中有空间，二者浑然一体。这种陈述，侧重于强调时空相关性，与牛顿的绝对时空观相比，着眼点有所不同。

中国古代这种时空相关的观点，其科学基础并未超越经典物理学范围。它与爱因斯坦狭义相对论时空观在依据的原理和具体内涵上都截然不同，不可将其混为一谈。它的哲学基础是传统的五行思想。古人认为，五行说能够表示万事万物基本性质及其相互关系。时间一年四季，空间东西南北，它们都与五行相对应。这样，时间空间就通过金、木、水、火、土这五行联系在一起了。这就是中国古代时空相关说的实质。方以智对这种联系作了哲学概括，但他的说法并未超越古人认识范围。即使如此，中国古人的议论依然表现了他们在时空关系上深邃的哲学洞察力，还是值得一提的。

宇宙本原和物质结构学说

古人在讨论自然现象时，有一种倾向，就是力图从宇宙万物纷纭复杂的表象背后寻找出一种或数种物质作为它们共同的本原。这是人类文明在探索自然奥秘时向前迈进的一大步。因为探究宇宙万物组成并将其归结为几个基本物质要素，比之简单观察和记录自然现象要复杂得多，它需要经过理性的思维和加工，才能抽象出一种宇宙本原理论来，并以之解释自然。

寻找宇宙本原的努力，世界各民族都曾经有过。人们提出过各种各样的宇宙本原学说，例如，古希腊的泰勒斯（前 624—前 546 年）以为宇宙是由水组成的，阿那克西米尼（约前 570—约前 500 年）认为气是原质，赫拉克利特（约前 540—约前 475 年）提出火是宇宙万物本原，留基伯（约 490 年—？）则发明了原子学说，……两千年来，人们对这个问题的努力持续不断，一直延续到今天。

在中国古代，关于宇宙本原的记载同样丰富多采。春秋时史伯提出：

“夫和实生物，同则不继。以他平他谓之和，故能丰长而物归之；若以同裨同，尽乃弃矣。故先王以土与金、木、水、火，杂以成万物。”（《国语·郑语》）

这里认为，单一元素不能“生物”，必须是不同元素的组合才能构成万物。用以构成万物的基本元素是金、木、水、火、土这五行。这段话描述了一种比较粗糙的宇宙本原学说，它认为五行是万物本原，除了五行，它还强调“先王”的作用，使得理论蒙上了强烈的人为色彩，显得较为原始。

《管子·水地》篇说：“水者，何也？万物之本原也，诸生之宗室也。”这与泰勒斯主张相仿，都认为水是万物之原。这一观点在后世杨泉《物理论》中得到了响应，杨泉说：“所以立天地者，水也。夫水，地之本也，吐元气，发日月，经星辰，皆由水而兴。”但整体来讲，以水为万物本原的思想，在中国古代没有得到多大发展，这与古希腊情况也相仿。

此外，老子《道德经》说：“道生一，一生二，二生三，三生万物。”这是主张“道”是宇宙本原。《易传·系辞上》提到：“易有太极，是生两仪；两仪生四象，四象生八卦，八卦定吉凶，吉凶生大业。”突出了易的作用。还有强调“理”的作用的，也有论述“无极”、“太极”的，如此种种，不一而足。

在诸多的宇宙本原学说中，以“气”作为宇宙本原的理论得到了长足发展，成为中国古代宇宙本原理论的主流。

“气”概念的产生，与古人日常生活中对空气存在的感觉分不开，所以它具有很强的物质性。古人在运用这一概念时，有时指的就是空气。例如，《庄子·齐物论》说：“夫大块噫气，其名为风。”这里的“气”即指空气。但仅仅是物质性的气，还不足以解释自然现象和各种事物。所以，古人对其性质作了补充，抽象出了元气概念，并以此作为宇宙万物本原。

以“气”作为万物本原的思想，起源相当早。《管子·内业》中提出了一种“精气”说，即可认为是这种思想的滥觞。该说认为，“凡物之精，此则为生：下生五谷，上为列星。流于天地之间，谓之鬼神，藏于胸中，谓之圣人。是故此气，杲乎如登于天，杳乎如入于渊，淖乎如在于海，萃乎如在于坻。”意思是说，世界上的一切得到精气就可以存在，地上的五谷，天上的星辰，都是精气所形成。精气流布于天地之间，神妙莫测；藏于人们胸中，

就成为圣人。其光耀如同在天上，幽微似潜入深渊，湿润像大海，峭拔如高山。这里就体现了一种用气来解释万事万物的倾向。

元气为万物本原，这一认识与古代宇宙演化学说相一致，这是它能够深入人心的原因之一。古代的宇宙演化学说，不管是主张宇宙万物生于绝对的“无”的，还是认为天地一切源于无形的“有”的，都同意浑沌不分的气是化生万物的直接来源，这就有助于人们树立气为万物本原的思想。这一思想在后世哲学家中得到了充分论述，例如王充说：“（万物）因气而生，种类相产。”（《论衡·物势篇》）三国嵇康说：“元气陶铄，众生禀焉。”（《嵇康集校注·明胆论》）北宋张载说：“凡可状者皆有也，凡有皆象也，凡象皆气也。”（《正蒙·乾称》）类似论述可以举出很多，这里不再罗列。

气化万物学说的进一步发展，是与阴阳五行学说相结合，构成一套完整的气生阴阳，阴阳生五行，五行生万物的理论框架。唐初孔颖达疏解《礼记》时，已经对之有所涉及，他说：

“案《左传》云：天有六气，降而生五行，至于含生之类，皆感五行生矣。”

这里表露出一气生五行、五行生万物的思想。嗣后李筌发展了这一思想，他指出：

“天者，阴阳之总名也。阳之精气轻清，上浮为天；阴之精气重浊，下沉为地，相连而不相离。……故知天地则阴阳之二气，气中有子，名曰五行。

五行者天地阴阳之用也，万物从而生焉。万物则五行之子也。”（《阴符经疏》）这是说，元气运动使阴阳分离形成天地，阴阳二气蕴含了五行，五行又产生了万物。这样，就构成了一个完整的由元气到阴阳、到五行、到万物的物质生成论。这一理论对后人影响很大，周敦颐从道教图录中改装过来的太极图，对这套理论作了自己的图解；朱熹对此也进行过讨论。这显示出这套理论在中国科学史和哲学史上具有极大的重要性。

当然，也有人反对这套理论。如明代哲学家王廷相就认为，在天地生成之前，万物的种子已具备于元气之中，遇到合适的条件，自然就会衍发成物，不需要加入五行这一中间环节。他说：

“夫天地之间，无非气之所为者，其性其种，已各具于太始之先矣。金有金之种，木有木之种，人有人之种，物有物之种，各各完具，不相假借。”（《五行辨》）

“天地未形，惟有太空，空即太虚，冲然元气。气不离虚，虚不离气，天地日月万形之种皆备于内，一氤氲萌蘖而万有成质矣。”（《雅述》）不管赞成与否，气为万物本原的思想，是大家都认可的。

中国古代元气本原论有一个重要特点，它把物质存在形态的离散性和连续性统一起来了。宇宙本原是呈连续形态分布的气，气聚而成物，可以为人所感知。人所感知到的物物分布在宏观上是不连续的，是离散的，在离散分布的物之间，充满了连续分布的气。离散和连续取决于气的聚散。就是说，物质存在的这两种形态，本质是统一的，它们统一于气。

作为比较，我们来看一下西方的原子论。原子论是西方一种主要的宇宙本原学说，它认为万物都是由原子构成的，虚空中也存在着原子，原子间的运动和组合构成了世界上万事万物。原子论描绘的自然界本质上是不连续的：物物之间的分布是离散的；空间中原子的分布，因为彼此间有虚空，所以也是离散的。元气说本质上是连续的，同时又以气的聚合达成离散性；原

子论本质上是离散的，它排斥连续性，这是它的不足。但原子论在分析自然时包含一种解析的思想方法，这有利于近代科学的产生，是为其优于元气说之处。元气说和原子论各有千秋，它们同为人类文明探索宇宙本原所遗留的宝贵遗产而辉耀千古。

物质守恒理论

中国古人认为，元气是宇宙万物本原，它充斥于所有空间，亘古长存，永恒运动。气聚成物，物散复气，物有存亡，气无生灭。从这些说法出发，古人又发展出一种物质守恒观念，认为在形和气的转化过程中，气的总量不生不灭，在量上是守恒的。本来，元气的分布是无限的，而无限的东西很难说其守恒与否，因为无法从量上去加以把握。古人似乎没有考虑到这一点，他们是从物和气的转化过程及气的生灭角度提出这一守恒观念的。这早在《淮南子》一书，就已经显露出一些端倪了。

《淮南子·精神训》说，“吾生也有七尺之形，吾死也有一棺之土。吾生之比于有形之类，犹吾死之沦于无形之中也。然则吾生也物不以益众，吾死也土不以加厚。”为什么会如此呢？《淮南子》解释说：“夫造化者之攫援物也，譬犹陶人之埴埴也。其取之地而已，为盆盎也，与其未离于地也无以异；其已成器而破碎漫澜而复归其故也。”“造化者之攫援物”，就是指的自然界物质的生成。《淮南子》以陶器的制成和毁灭为喻，形象地说明了物质在转化过程中的不生不灭原理，表述了十分清晰的物质守恒观念。

在《淮南子》之后，则以北宋张载和明末清初王夫之的论述最具代表性。

张载认为，气充满了整个宇宙，没有任何物质的虚空是不存在的。他说“太虚不能无气”，“气之聚散于太虚，犹冰凝释于水。”（《正蒙·太和》）因为气充斥于空间，没有固定形体的空间就不能看作虚无，“太虚无形，气之本体，”“知太虚即气，则无无。”（同上）

充斥于太虚的气处于无休止的运动之中，张载说：“气块然太虚，升降飞扬，未尝止息。”（同上）“若阴阳之气，则循环迭至，聚散相荡，升降相求，絪縕相揉，盖相兼相制，欲一之而不能，此其所以屈伸无方，运行不息，莫或使之。”（《正蒙·参两》）即气是自动不止的。

在气的诸多运动形式当中，聚和散是其基本的一种。气聚而成有形物体，气散复归无形太虚。张载说：“太虚不能无气，气不能不聚而为万物，万物不能不散而为太虚。”（《正蒙·太和》）气的聚散构成了物体有形和无形之间的转化，它不是气的生灭。张载指出：“气聚，则离明得施而有形；不聚，则离明不得施而无形。方其聚也，安得不谓之客；方其散也，安得遽谓之无。”（同上）离明，指光线，气聚成物，光线可以作用上去，才能为人所见。弥散分布的气，光线作用不上去，人也就感觉不到它的存在，但这并不等于气不存在。物只是气一时的集聚，是气变化的客形，它的本质还是气，最终还要散归为气，气是普遍存在的。

因为物由气聚而成，物散复气，可见气不会消亡。张载说：“聚亦吾体，散亦吾体，知死之不亡者，可与言性矣。”（《正蒙·太和》）这就是说，聚后形成的物、散后回归的气，都是气之体。只有认识到在物质形态转化过程中气并没有消亡，才可以与之谈论自然界的道理。气不会消亡，也不会自生，“若谓虚能生气，则虚无穷，气有限，体用殊绝，入老氏有生于无自然之论，不识所谓有无混一之常。”（《正蒙·太和》）张载强调无限的空间不能自动产生气，说如果能生的话，空间是无限的，气则是有限的，这样气的“体”与其功用（弥散分布于所有空间）就不相一致。所以，必须认为气是不生不灭、亘古长存的。这样，在物质形态转化过程中，气的总量守恒的思想，已经被张载揭示出来了。

王夫之用更清晰的语言论证并发展了张载这一思想。他首先举例说明物质不同形态转化过程中的守恒现象，说：“车薪之火，一烈已尽，而为焰、为烟、为烬，木者仍归木，水者仍归水，土者仍归土，特希微而人不见尔。一甑之炊，湿热之气，蓬蓬勃勃，必有所归，若奩盖严密，则郁而不散。汞见火则飞，不知何往，而究归于地。有形者且然，况其絪縕不可象者乎！”（《张子正蒙注·太和》）王夫之举了三个例子，来说明物质不灭。这三个例子给人的直观感觉都是原来的物消失了。王夫之强调指出，这些物并没有消亡，它们只不过是转化成了希微无形的气，人看不见而已。物本身也是气，在这些转化过程中，气总体并没有减少。气“聚散变化，而其本体不为之损益，”“散而归于太虚，复其絪縕之本体，非消灭也。”“未尝有辛勤岁月之积，一旦悉化为乌有，明矣。”（《张子正蒙注·太和篇》）

王夫之特别指出，气存在着各种形式的运动，但没有生灭。对于气，我们可以：“曰往来、曰屈伸、曰聚散、曰幽明，而不曰生灭。生灭者，释氏之陋说也，倘如散尽无余之说，则此太极浑沦之内，何处为其翕受消归之府乎？又云造化日新而不用其故，则此太虚之内，亦何从得此无尽之储，以终古趋于灭而不匮邪？”（同上）“造化日新而不用其故”，这是宋儒的语言，王夫之反对此论，他质问道：如果说气可以消灭，在宇宙之中何处是其转移消亡的地方？如果说它不断地被产生出来，宇宙中怎么会有这么多的储藏来供它不断消耗而不匮乏？王夫之的这些论述虽然是思辨产物，但它们所表述的“气”、“形”总和不生不灭，亦即物质不可创造、不可消灭的思想还是比较明确的。

中国古代这种朴素的物质不灭思想，并非仅限于张载和王夫之，例如明代哲学家吕坤亦曾提到：“元气亘万亿岁年，终不磨灭，是形化、气化之祖也。”（《呻吟语·天地》）张载和王夫之的论述，只不过更为清晰而已。

应该指出，中国古代这种物质守恒思想，并非是通过定量观察物质不同形态之间的转化、在大量科学实验基础上总结出来的科学结论，它是古人哲学思辨的产物，属于前科学阶段，尚未达到物理学上所说的物质守恒原理的高度。

元气学说应用

元气学说是中国古人在探索宇宙本原、阐释自然奥秘过程中逐渐发展起来的一种学说。在中国古代有关宇宙本原的诸多猜测中，元气学说一枝独秀，得到了长足发展，成了古代自然科学理论支柱之一，被广泛应用于对各种自然问题乃至社会问题的解说之中。

古人通过赋予元气概念以种种特异性的方法，来达到应用元气学说于理论科学的目的。在这一过程中，他们并不重视元气与气在概念上的差异，这里的讨论也同样如此。

首先，元气概念一开始就具有很强的物质性，它表示独立于人的意识活动之外的客观实在。通过总结古人运用元气概念的大量实例，不难得出这一结论。而且古人还有意识地对这一特性加以论证，明末方以智曾提出：

“世惟执形以为见，而气则微矣，然冬呵出口，其气如烟；人立日中，头上蒸歔，影腾在地；考钟伐鼓，窗棂之纸皆动，则气之为质，固可见也。充一切虚，贯一切实，更何疑焉。”（《物理小识》卷一·气论）

方以智所说的，实际是今天所谓的“空气”的一些表现，但古人没有这些概念上的区别，方以智在这里就是通过空气的表现来论证更广泛的“气”概念的客观实在性的。

气是客观存在的，这一点非常重要。只有这样，它才有资格被用于对各种自然问题的解释。就古人的思维水平来讲，纯属主观性质的东西是不可能被赋予如此重任的。

古人赋予元气的另一特性，是其分布的弥散性。这一点和今天所说的空气不同。从现代科学观点来看，空气是由一个个空气分子组成的，分子之间是虚空，即空气分布的本质是不连续的，而古人讲的气却是一种连续体，它弥漫分布于所有空间。即所谓“游乎天地之一气”（《庄子·大宗师》）“亡处亡气”（《列子·天瑞》），亦即张载所说的：“气之聚散于太虚，犹冰凝释于水，知太虚即气，则无无。”（《正蒙·太和》）

气是连续体，弥散分布于所有空间，这一特点构成了中国古代物理学不同于西方物理学的某些显著特征。曾有科学史家指出：中国古代自然观排斥原子、粒子和力学概念，偏爱连续介质理论、波、振动和谐振。这一评论基本是对的，而造成这一现象的原因，就与气的弥散分布特性有关。

元气概念的物质性与其分布的弥散性相结合，使得中国人先天地排斥真空概念。这与古希腊亚里士多德情形相仿。亚里士多德宠信连续分布理论，他用“大自然厌恶真空”解释物体运动原因。中国古代没有与元气学说相抗拒的原子论，在解释自然问题时，索性连真空概念也不用。即使事涉大气压现象，亦不例外。但其基本思想则与亚里士多德相距不远。例如，唐代王冰在注《素问》“升降出入，无器不有”之语时描述道：

“虚管溉满，捻上悬之，水固不泄，为无升气而不能降也。空瓶小口，顿溉不入，为气不出而不能入也。”（《素问注·六微旨大论篇》）

这在希腊古哲看来，是“大自然厌恶真空”的典型表现，中国人则用气的物质性和其分布的弥散性作解：气是客观存在且弥散分布，就虚管而言，其上端被封闭，气不进入则水不下降，否则，在水面上方就没有气的存在，物质的分布不再连续，这与气的弥散分布特征不符。对于向口径很小的空瓶灌水的情形，道理也一样。因为气本来就充斥于空瓶当中，是客观存在的，不将

其排出，水就不能灌入。

元气分布的弥散性，决定了它的另一性质：无限性。在多数古人看来，空间是无限的，而元气弥漫充斥于所有空间，它本身在量上当然是无限的。无限性的另一表现是，在任意微小的地方，都有元气存在。所以古人说：元气“其细无内，其大无外。”（《管子·内业》）《庄子·天下篇》提到，“至大无外，谓之大一；至小无内，谓之小一。”这里的“一”指的是宇宙万物的本原物，即气。“大一”是气的无限性在大的方面的表现，其特征是无外，即包容一切；“小一”是气的无限性在小的方面的表现，其特征是“无内”，即充斥一切。曾有人认为“小一”反映了一种原子观念，这是误解。

古人赋予元气的另一特质，是透达性。这表现在两个方面。一是所谓同气相应，即具有相同性能的气，可以相互感应，不管彼此之间相隔多么遥远，中间有无东西阻塞，其相互作用均可通达无遗。这一特性，在古人用元气学说解释自然现象时，得到了大量应用。例如，古人释共振现象、释海潮与月之作用、释静电感应、释磁石引铁、……无不如此。古人提出的一些重大的理论学说，例如天人感应、候气等，也都植基于元气学说这一特性之上。

元气透达性的另一表现，是其具有可入性，可以贯通于一切有形有质之物的内外，直接由一处透达另一处。宋代沈括有一段话，可视为元气学说这一特性的注脚：

“如细研硫黄、朱砂、乳石之类，凡能飞走融结者，皆随真气洞达肌骨，犹如天地之气，贯穿金石土木，曾无留碍。”（《梦溪笔谈》卷二十六）

气的这一特性，在古代科学范围内，常被用到。

元气还有另一至为重要的性能，能动性。这一特性是说元气充斥宇宙之中，处于无休止的运动状态，这种运动是自发的，背后没有其他力量的推动。元气运动的内部机制在于阴阳二气的相互作用。古人认为，气分为阴阳，阴阳二气处于无休止的聚散离合、屈伸往来运动之中，这些运动是气本身固有的特性，气具有能动性。张载说：“若阴阳之气，则循环迭至，聚散相荡，升降相求，姻媪相揉。盖相兼相制，欲一之而不能，此其所以屈伸无方，运行不息，莫或使之。”（《正蒙·参两篇》）

气的能动性特征，被广泛用于解释各种自然现象。例如，四季更叠，是阴阳推移的表现；雷鸣电闪，是二气激射的结果；寒暑变化，是阴阳升降所致；云霓雨雪，是阴阳的聚敛发散；地动山摇，是阴阳的压迫进发；……如此等等，不胜枚举。这些解释，皆属哲学思辨，但就古人思维水平而言，也是顺理成章之事。要由这种解释方式发展到近代科学，中间还有一段比较长的道路。

元气的恒动不息特性，也被古人用以说明万物的生死存亡，阐释物质不同形态之间的转化关系。气处于不停的离散聚合运动之中，气聚成物，物散复气，气的聚散不止导致了万物的生生不息。由这种观念出发，古人还发展出一种物质守恒观念，认为在气和物的转化过程中，元气不生不灭，总量守恒。这是一种朴素的物质守恒观念，是元气学说在哲学思辨层次获得的一个物理成果。

古人赋予元气种种特异性，目的是要运用这些性质去解释自然。在中国古代科学诸多分支中，没有哪门学科与元气学说无关。透过元气学说可以了解古人对自然界的看法，分析他们解释自然时的思想方法，从中获得有益的启迪，这就是它对中国科学史意义之所在。

格物致知

格物致知是中国古代认识论的重要命题，对古代科学发展从思想上有所影响。这一词语最早见于先秦经典《礼记·大学》：

“古人欲明明德于天下者，先治其国；欲治其国者，先齐其家；欲齐其家者，先修其身；欲修其身者，先正其心；欲正其心者，先诚其意；欲诚其意者，先致其知。致知在格物。格物而后知至，知至而后意诚，意诚而后心正，心正而后身修，身修而后家齐，家齐而后国治，国治而后天下平。”

这一段话，是儒家学派为实现自己修身、齐家、治国、平天下的政治思想而提出的阶段性行为目标。这一程序性行为纲领的起始就是格物致知。由此可见格物致知在儒家学说中的确具有极为重要的地位。

那么，格物致知的具体含义是什么呢？

这一段话，在孔子时代大概并不难解，孔氏本人未做解释，孔门弟子亦未阐发。这就容易给后人的理解造成歧义。由此，我们今天倘要明白格物致知原意，就要把它放在产生《礼记·大学》的时代，参考儒家其他经典，尤其是孔子的认识论思想，综合加以考察。据后人的研究，《礼记·大学》主要表述了孔子及其弟子曾子之意，而孔子在当时即以博物著称，知道很多别人不知道的事情，这自然与其治学方式有关。在另一儒家经典《中庸》中，孔子的孙子子思指出了儒家所主张的获取知识的方式，叫做“博学之，审问之，慎思之，明辨之，笃行之。”孔子之所以博学，其治学方式不能有异于此。由此，《中庸》的强调可以看做是对格物致知学说的注解。即通过广泛学习，细致研究某事某物，并身体力行，脚踏实地去实践体会，就可以获得真知。所以，格物致知强调的是通过对事物的考察、检验或穷究，来获取正确认识，这可以认为是其本来的含义。

这一理解与古文献并不相悖。古代“格”字用法很广，其中有训为“量度”的。《文选》载鲍照《芜城赋》：“格高五岳”。李善注引《苍颉篇》：“格，量度也。”也有训为“正”或“检”的，《尚书·周书·冏命》：“……绳愆纠谬，格其非心。”孔氏传曰：“弹正过误，检其非妄之心。”这些用法均可转义为“考究”、“考察”或“检验”。由此，《辞海》对格物致知的解释是：“谓穷究事物的原理而获得知识。”这一解释不为离谱。

“格”、“物”在古代用法均很广泛，加之孔氏等人对格物致知含义未做解释，这导致后人在理解格物致知含义时出现很多歧义，每个人都想依据自己的哲学倾向对之做出合乎己意的解释，这就使得在此问题上，真正出现了百花齐放局面。

汉儒郑玄注解：“知谓知善恶吉凶之所终始也。”“格，来也；物，犹事也。其知于善深，则来善物；其知于恶深，则来恶物。言事缘人所好来也。”这一注解有两点不可取：其一，它缩小了“知”的范围，认为“知”仅限于“知善恶吉凶之所终始”，而在《大学》中，没有这样的限制；其二，它颠倒了“格物”与“致知”的因果关系，认为“格物”是由“致知”所致。无独有偶，这样的观点也得到后人响应，例如宋代杨时即曾强调说：“致知必先于格物。”

宋代是谈论格物致知比较多的朝代。一代名儒司马光，曾专门作《致知在格物论》，畅述己意。他首先指出：“人情莫不好善而恶恶，慕是而羞非。然善且是者盖寡，恶且非者实多。何哉？皆物诱之，物迫之，而旋至于莫之

知；富贵汨其智，贫贱翳其心故也。”从这种认识出发，他解释格物致知说：“《大学》曰：‘致知在格物。’格，犹扞也，御也。能扞御外物，然后能知至道矣。”他批评郑玄说：“郑氏以格为来，或者犹未尽古人之意乎？”司马光强调要抵御物质生活的引诱，认为这样可以保持一个人的高风亮节，不为物欲遮蔽自己的聪明才智。此说当然有其不可磨灭之处，但亦未必合乎古人原意。他与郑玄一样，在此问题上都“师心自用”了。

在格物致知学说上对后人影响较大的是宋明理学，其中主要可分为两派，程（颢、颐）朱（熹）一派和陆（九渊）王（阳明）一派。程朱等人释格物致知为“即物穷理”，二程说：“格犹穷也，物犹理也，若曰穷其理云尔。穷理然后足以致知，不穷则不能致也。”（《程氏粹言》卷一）朱熹说：“所谓致知在格物者，言欲致吾之知，在即物而穷其理也。”（《大学章句·补传》）这里的“即物穷理”，是要求人们运用已知的知识，深思客观事物，达到自己内心的豁然领悟。它所强调的是一种内省式的思考过程。朱熹说：“《大学》设教，必使学者即凡天下之物，莫不因其已知之理而益穷之，以求至乎其极。至于用力之久，而一旦豁然贯通焉，则众物之表里精粗无不到，而吾心之全体大用无不明矣。此谓格物，此为知之至也。”（《大学章句·补传》）显然，朱熹所追求的是通过“即物”，达到自己内心的豁然贯通，而不是对客观事物具体内涵、特征的掌握。

王阳明实践过朱熹这套方法，他坐在自己窗前“格”院子里的竹子，冥思苦想七昼夜，仍然不得要领，人也累病了。他不去反思自己格物方法的不当，反而走得更远，连物也不格了。他说：“天下之物本无可格者，其格物之功，只在身心上做。”（《传习录下》）“若鄙心所谓‘致知格物’者，致吾心之良知于事事物物也。吾心之良知，即所谓天理也。致吾心良知之天理于事事物物，则事事物物皆得其理矣。致吾心之良知者，致知也；事事物物皆得其理者，格物也；是合心与理而为一也。”（《传习录中·答顾东桥书》），显然，他所说的“致知格物”，不是要通过研究客观事物获得知识，而是要把“心”的“良知”和“天理”强加到事物上去，使事物与“心”、“良知”、“天理”相符合。这样的“格物致知”，不会促进科学发展。

宋明理学对“格物致知”的发挥，在后世也有人表示反对。例如颜元就公开批评朱熹说：“朱门一派，口里道是即物穷理，心里见得，日间做得，却只是读、讲、论……其实莫道不曾穷理，并物亦不能即，半日静坐，半日读书，那曾去格物。”（《习斋记余·阅张氏王学质疑评》）颜元主张格物要亲自动手，实地去做，不能离物而空洞地“穷理”。这样的格物致知，有利于科学的发展。

实际上，因为格物致知学说具有研究客观事物以获取知识的含义，一些重视研究自然的有识之士也借用这一口号，赋予它新的内涵，用以阐发自己的思想。例如王夫之即曾这样说过：“密翁（方以智）与其公子为质测之学，诚学思兼致之实功。盖格物者，即物以穷理，唯质测为得之。若邵康节、蔡西山，则立一理以穷物，非格物也。”（《搔首问》）王夫之所提到的“质测之学”，是方以智的创举，它的中心内容是要求以实证方法研究自然现象。王夫之认为只有质测才是真正的格物致知，这赋予格物致知学说以崭新含义，标志着这一术语已经进入自然科学范围。

随着明末清初科学技术的传入，中国人研究自然现象的热情也高涨起来。这时人们谈论格物致知，很多情况下都意味着研究自然以获取知识。古

老的格物致知学说获得了新生，成了人们从事科学研究的理论根据。清末翻译的西方科技书籍，有些径以“格致”名之。格致一词成了声光化电等自然科学部门的统称。鲁迅先生在《呐喊自序》中写道：“在这学堂里，我才知道在这世上，还有所谓格致、算学、地理、历史、绘图和体操。”他所说的格致，就是指的这些自然科学。在中国传统科学与西方科学技术合流过程中，格物致知学说以独特方法参与并加速了这一过程，从而在科学技术史上取得了一席永久立足之地。

通几与质测

通几与质测是明末学者方以智提出的一对命题。在方以智生活的时代，传教士已经进入中国，带来了与中国学术截然不同的西方科学知识，在中国士大夫中引起了很大震动。方以智面对中西学术的交融、撞击，冷静地思考中西学术的异同，从中得到启发，认识到学术活动有不同的类型，他认为其中有两类需要大力提倡，这就是通几与质测。

方以智在其《物理小识》的“自序”中为通几与质测下了定义：

“寂感之蕴，深究其所自来，是曰通几。物有其故，实考究之，大而元

会，小而草木蠹蠕，类其性情，征其好恶，推其常变，是曰质测。”

先说“通几”。通，具有普遍、普适之义，亦可释为融会贯通。“几”是中国古代哲学一个重要范畴，古人认为物质世界处于永恒的运动变化之中，每一变化发生之前及发生过程中，总有些细微东西存在，它们体现了物质运动趋势，主导了物质运动发展方向，这就是几。《易·系辞下》说：“知几其神乎！……几者，动之微、吉之先见者也。君子见几而作，不俟终日。”方以智认为，几虽微小，却很重要，因此要“通几”，即要把握导致物质运动的根本原因。这就是“寂感之蕴，深究其所自来”的具体含义。

曾有观点认为，通几即是哲学。这种说法有一定道理，但不够准确。方以智说：“考测天地之家，象数、律历、音声、医药之说，皆质之通者也，皆物理也；专言治教，则宰理也；专言通几，则所以为物之至理也。”（《通雅》卷首之三“文章薪火”）通几以“所以为物之至理”为研究对象，与哲学旨在探讨“物质运动最基本规律”，确有相通之处。但通几强调的是“几”，几的概念似乎还不能视同于“基本规律”；另外，哲学这一概念具有广泛含义，其覆盖面远宽于通几。可以说通几是一种哲学活动，不能简单地认为它就是古代哲学，这里边存在着大概念和小概念的差异。

“通几”概念的提出，是方以智受传统学术熏陶的结果。他出身于易学世家，而“几”的概念正是在易学发展过程中被提出来的。由此，方以智认为“通几”即蕴含于《易》中，他说：“圣人通神明，类万物，藏之于《易》，呼吸图策，端几至精，历律医占，皆可引触，学者几能研极之乎？”（《物理小识·自序》）把具有深刻内涵的“通几”这一学术活动限制在《易》中，这对于它的进一步展开显然是不利的。

再说“质测”。从方以智所给出的定义可知，质测以客观事物为研究对象，要求脚踏实地地考察其变化原因。大到天体运动，小到草木昆虫，都要按特性予以整理分类，总结验证已知规律，预测未来发展变化。由此，质测有类于通常所说的自然科学。

质测概念的提出，应该说与方以智对西学的思考分不开。明朝末季，西方传教士进入我国，随之也带来了令中国士大夫耳目一新的西方科学。这些科学因其超胜于中国的传统科学，难免要引起一些中国学者的兴趣，在研习会通之余，对其本身加以思考，认识到这类学术活动与中国传统学术主流有所不同，需要为之起一个专有名称以示区别，这也是势在必然。这一任务由方以智完成了。方以智对西方科学进行过认真的思考，他说：“万历年间，远西学入，详于质测而拙于言通几。然智士推之，彼之质测犹未备也。”（《物理小识·自序》）这表明，他认为西学之长处在于其质测，也就是我们今天所说的它的自然科学那一部分。只有经过这样的学术思考，才能建立起这样

的学术分类。

方氏质测之学重视验证，强调要“征其好恶，推其常变。”“测”有验测、验证之义，质测即实测。《物理小识》多见“试之验”或“试之不验”之语，方以智次子方中通在为该书作注时也说：“老父每有所闻，分务别记，……如《山海经》、《白泽图》，张华、李石《博物志》、葛洪《抱朴子》、《本草》，采摭所言，或无征，或试之不验。此贵质测，征其确然者耳。”这里强调要经过实际验证，从而得出确定的结论，表现了一种务求实证的近代科学精神，是值得肯定的。

通几和质测均以客观事物为研究对象，目的是要获得对外界的全面了解，二者关系为：

“或质测，或通几，不相坏也。”（《物理小识·总论》）“质测即藏

通几者也。”（《物理小识·自序》）

即是说，质测和通几各有其不同的研究对象，二者相辅相成而不相抵触，质测是通几的基础。因为通几以“所以为物之至理”为研究对象，所以，“通几贵乎质测”（方中通《陪集卷一·南亩记》）但不能代替质测。方以智强调说：

“有竟扫质测而冒举通几以显其宥密之神者，其流遗物。”（《物理小识·自序》）即是说抛弃了质测，单纯追求通几，这种做法的流弊在于忽视了客观事物的存在，是不可取的。

方以智认为，自然界有些规律可以得到验证，他说：“物有则，空亦有则，……其则也，理之可征者。”（《物理小识》卷一《气论》）这些“可征之理”，即为质测研究对象。但“为物不二之至理，隐不可见。”（《物理小识》卷一《象数理气征几论》）对此，质测无能为力。由是，方以智进一步提出：“通几护质测之穷。”（方以智，《愚者智禅师语录·示中履》）即在探讨天地万物时，质测作为认识方法而不敷用之处，应由通几完成。对于通几与质测关系的方方面面，方以智的考虑可谓全面。

通几的提出反映出方以智的主张：在探究自然时，应重点把握能预示物质运动发展趋势的因素，即所谓之“几”或“端几”。但对“几”的把握，不能用实证的方法即质测得到，故此他提出“通几”来，以示其有别于“质测”，希望人们给予重视。这是方以智对物质运动所作哲学分析的结果，我们应循着这样的思路去理解通几及通几与质测的关系。

通几与质测概念的建立，在中国科学史上是一件十分重要的事情，它标志着中国人已经开始对科学这一学科本身进行思考，认识到科学是一种独立的学术活动，它有自己的研究方法，这种方法就是实证。这些认识的阐发，是为中国古代科学脱离自然哲学形态，实现向近代实验科学转化所迈出的必不可少的第一步。

机发思想

机，古文为“機”，这里所说的“机”，皆指“機”。机的本义是指机械装置中绕轴而动的部件，《庄子·天地》讲桔槔，说：“凿木为机，后重前轻，挈水若抽，数如侏汤，其名为槔。”这里的桔槔叫机，指的是一种有固定轴支点的杠杆。

最能体现机的含义的是弩机。《尚书·太甲上》有“若虞机张”。注云“机，弩牙也。”弩牙就是弩上可以绕轴而动的部件，即弩的“扳机”，通过它可以控制弩的发射。弩的发明时间，现在尚不能确定。但这一新型器具的出现，无疑引起人们很大兴趣，使得人们对其中“机”的作用加以思考，许慎《说文解字》云：“机，主发者也。”这就体现了人们对“机”所具作用的思考，而且把它抽象化了。

机在字义上从几，即古文“幾”。《说文解字》释几：“幾，微也，殆也，从 从戍，兵守也。而兵守者，危也。”几是微小而重要的东西，有危险性，须严加看守。由几的字义出发，衍发出一种以几名之的哲学概念。《易·系辞》对几的运用，即已哲学化了：

“夫易，圣人所以极深而言几也。唯深也，故能通天下之志；唯几也，故能成天下之务。”“子曰：‘知几其神乎。君子上交不谄，下交不渎，其知几乎！几者，动之微、吉之先见者也。君子见几而作，不俟终日。’《易》曰：‘……君子知微知彰，知柔知刚，万夫之望。’”孔颖达疏曰：“几，微也，是已动之微。动则心动事动。初动之时，其理未著，唯纤微而已。若其已著之后，则心事显露，不得为几；若未动之前，又寂然顿无，兼亦不得称几也。几是离无入有，在有无之际，故云动之微也。”由此，几是事物运动变化发生时表现出的很细微的征兆，它虽然微小，却体现了事物的运动趋势，把握了几，就可“见微知著”，掌握整个事物的宏观运动。

通过对“机”在弩机之类器具上所起作用的思考，并受几这一哲学概念的影响，古人对“机”这一概念也做了哲学抽象，由之形成了一种很重要的机发思想，其主要含义为：在事物的运动变化过程中，存在着一种很细微的东西，它的状态的改变，影响并决定着整个事物的运动变化。这种东西就叫机。这样，就从“几”的“见微知著”，发展到“机”的“以微制著”，构成了一个认识自然、制服自然的完整链环。

机发思想在古代科学范围内，得到了甚为广泛的应用。这里举一个典型例子。《庄子·至乐》篇中有一段话讲物种变化，即应用了这一思想：

“种有几，得水则为 ；得水土之际，则为蛙 之衣；生于陵屯，则为陵 ；……久竹生青宁，青宁生程，程生马，马生人，人又反入于机。万物皆出于机，皆入于机。”

《列子》中同有此文，只是更增加了一些中间环节。这里提到的生物进化过程中的一些种名，训释很难且不肯定，我们的兴趣不在于此。我们关心的是这一段话所隐含的进化思想。由引文中不难得出这样的结论：在进化过程中，物种之内有种极细微之物质，它具有机的作用，其状态的改变即所谓机的被触发，决定着物种的进化方向，而机被触发的方式则取决于外界环境，不同的触发方式决定了不同的变异方向。所谓“得水则为 ；得水土之际，则为蛙 之衣”等，皆可依此作解。现代生物学认为，物种变化决定于遗传基因变异，而遗传基因相对于整个物种来讲，确实是极细微而又极重要的了。

《庄》、《列》之论，当然不能与此相提并论，但它所包含的思想，也够耐人寻味的了。

机很细微，当然控制起来难度不大，但同时又很重要，因为它控制着整体的运动。这两个特点，引致了古人对机这一概念的高度重视。重视的结果，不同的学派形成了不同的态度。儒家重视政治，他们希望政治稳定，不出乱子，要求人们谨小慎微，对待政治上的“机”，要特别小心，不要轻易触发。

《易·系辞》谈政治：

“言行，君子之枢机，枢机之发，荣辱之主也。言行，君子之所以动天地也，可不慎乎。”

董仲舒《春秋繁露》，也持同样说法：

“君子者国之元，万物之枢机，枢机之发，荣辱之端也。失之毫厘，驷不及追。故为人君者，谨本详始，敬小慎微。”

做国君的，尚且要谨小慎微；一般子民，当然更要循规蹈矩了。儒家的这种谨慎，正是出于对“机”这一概念的重视。

道家向往自然，他们高声颂扬机的功能，意图通过对机的控制，实现自己的目的。南唐道士谭峭作《化书》，其中提到机：

“转万斛之舟者，由一寻之木；发千钧之弩者，由一寸之机。一目可以观大天，一人可以君兆民。太虚茫茫而有涯，太上浩浩而有家。得天地之纲，知阴阳之房，见精神之藏，则数可以夺，命可以活，天地可以反复。”

机的作用是如此之大，只要掌握了事物运动变化的机，就可以自主掌握一切，可以呼风唤雨，可以羽化长生，可以突破命运束缚，可以造成天地的翻覆。

这样说是否过于狂妄，道家说：否，这并不违背“自然之道”。在道教经典《阴符经》中：我们可以发现道家对这个问题的解释：

“日月有数，大小有定，……沈水入火，自取灭亡，……人知自然之道不可违，因而制之。”

自然规律是不可违背的，而利用机控制自然，这正是利用了自然规律。这就是道家在这个问题上的思想方法。

那么，这样的机在哪里？古人认为，就在人的自身。天人一体，人是天的缩微模型，人自身就带有天机。葛洪《抱朴子》说：“陶冶造化，莫灵于人。故达其浅者，则能役用万物；得其深者，则能长生久视。”所以，还是要求诸自身。

在人身中，能起到机发作用的，当首推人的心理活动。《阴符经》说：

“天性人也，人心机也，立天之道，以定人也。天发杀机，龙蛇起陆；

人发杀机，天地反覆。天人合德，万变定基。”

天人一体，人可以通过自己心理活动，影响到自然，这是客观事物千变万化的基础。这种影响，甚至可以导致天地反覆，不可谓不巨。之所以如此，就是因为“人心机也”，具有机的触发控制功能。一些儒生劝人向善时常说的人“善心一动，天必应之”之类语言，也是这种思想方法的表现。当然，这些只是古人的一种臆想。

在古代，更常见的则是以语言作为控制客观事物的机。儒家说“言行，君子之枢机”，认为这是“君子之所以动天地也”。道家同样持这种态度，他们幻想呼风唤雨，靠的是“呼”和“唤”。画符念咒，也是指望语言起到机的作用。而语言如何起到机的作用，则在于它的具体内容。例如在深山穿行，要辟妖邪，方法之一就是诵其名号。这些东西，我们今天看来觉得它愚

昧，但在古人却是他们机发思想的一种实践。实践的结果，当然是失败了。

总而言之，机发思想是中国古代科学思想史上一项重大成果，它起源于先秦，道家的“无为”被道教徒变为“有为”，它阐明了人与自然关系中的一个重要原理：“见微可以知著，用小可以制大。”它重视人的能力，鼓励探索精神。但在实践中一些机发论者不以求实为基础，常常想入非非，造成有害结果，这是应予指出的（参见李志超，“机发论——有为的科学观”，《自然科学史研究》9卷1期，1990年）。

动力因学说

中国人对于运动原因，很少从纯粹力学角度加以探讨，也从未上升到牛顿运动规律的高度。至于自然界广泛存在的惯性现象，他们倒是不乏观察，例如《考工记·辘人》说：“马力既竭，辘犹能一取焉。”认为马虽然不对车施加拉力了，车还能继续走一段路，从而将运动与物体惯性相联系。王充《论衡·状留篇》说：

“是故湍濑之流，沙石转而大石不移，何者？大石重而沙石轻也。……

金铁在地，森风不能动；毛芥在其间，飞扬千里。……车行于陆，船行于沟，

其满而重者行迟，空而轻者行疾。……任重，其取进疾速难矣。”

这是说，比较重的物体（实则质量大的物体），在受到同样外界作用情况下，其运动状态改变比较难。这些，都是对物体在运动过程中表现出来的惯性现象的观察与记述。

但是，仅仅观察与记述，还不足以上升到牛顿运动规律，而且中国古人也未沿着这条路继续发展下去。古人重视的是要一劳永逸地说明各种物体之所以能够运动的最终原因：既能说明地面物体受迫而动的情形，也要回答天体为何能运转，阐释禽鸟能飞翔、走兽会奔跃的现象，这就使得中国古代运动原因学说天生具有一种自然哲学倾向，是一种思辨性的学说。

类似的情况，在西方也存在。例如在古希腊，人们认为把无生命的运动同化在动物的运动里面进行探讨，是十分自然之事。古希腊哲人亚里士多德对运动的解说，也没有从纯粹力学观点出发。在近代力学产生之前，这是普遍情形。

中国古人对运动原因的解释，就某种意义而言，与他们关于气的学说分不开。古人认为，万物由气组成，而气本身是能动的，由此，物体在本质上是能动的。张载《正蒙·太和》说：“气块然太虚，升降飞扬，未尝止息，……此虚实动静之机，阴阳刚柔之始。”认为气的能动性是一切运动之源。这样，就从本原意义上说明了物体运动原因，在这个问题上排除了神的存在。

在具体探讨物体的运动时，古人是把元气说和阴阳说结合在一起加以考虑的。他们认为，物质由气组成，而气分阴阳，阴阳二气具有不同的运动性能，这样，不同的物质其阴阳属性不同，它们具有的运动性能、呈现的运动状态也就不一样。

例如，中国古代存在一种地动学说，为了说明地为什么会动，《春秋纬·元命苞》就运用了这一学说：

“地所以右转者，气浊精少，含阴而起迟，故转右迎天，佐其道。”

即使说，天是阳性的，它运旋无穷，地是阴性的，在运动状态上应该与天相对，所以它“转右迎天”。

在用阴阳学说解释物体运动原因时，古人更多地是主张阳主动，阴主静，物体运动能力的大小，取决于它所含阴阳二气的比例。例如，《礼记》说：

“著不息者，天也；著不动者，地也；一动一静者，天地之间也。”

唐代孔颖达疏曰：

“‘一动一静，天地之间也’者，动者或一物，飞走蠢动，感天之阳气也。静者或一物，安伏而止静，感地之阴气也。‘天地之间也’者，言此一动一静在天地之间，所有百物也。”

据此，物体运动能力的大小与其所秉天地之阴阳气的多少有关。天为阳，故

运行不已；地为阴，故静止不动。它物感阳气多者即可“飞走蠢动”，少者则“安伏止静”，世间万物，无不遵守这一规律。

物体所含阴阳气的多少决定了它的运动能力，而运动状态的改变，则由其他因素决定。王充说：“人之行，求有为也。”（《论衡·说日篇》）《管子》说：

“人者立于强，务于善，未于能，（原注：能未成者，习而成之。）动于故者也。（原注：凡所运动，必循于故，致也。）”（《心术上》）

“夫不能自摇者，夫或之。（原注：无识之物，皆不能自摇。有时而动，则物摇之也。）夫或者何？若然者也。”（原注：风有时摇动，谁使然也。……夫事物之动摇，则风使之然，然求风则不得。）

综合这些内容，可以得出这样的结论：有意识之物，其运动状态改变取决于意识的支配；无意识之物，则受它物作用而运动；导致它物运动之物，最终必然是自动的。这样的论述，逻辑上是严密的，而且也与人们日常经验相一致。

中国古代涉及物体运动原因的学说，尚有以下几种：

形态说。此说着眼于物体运动状态改变的难易程度，认为与其形态的方圆有关。例如《孙子·势篇》写道：

“木石之性，安则静，危则动，方则止，圆则行。”

《尹文子·大道上》说：

“圆者之转，非能转而转，不得不转也。方者之止，非能止而止，不得不止也。”

这些，大概是观察到在同样外力作用下，圆形物体比方形物体运动状态更易于改变而得出的结论。

神动说。这里的“神”非指人格神，而是指事物发展变化过程中令人感到神秘莫测的一种内在因素。《易·系辞》有“阴阳不测之谓神”，即是这种用法。宋代学者在这种用法基础上为之增添了运动变化内在动力的含义。如张载说：“天下之动，神鼓之也。”“惟神为能变化，以其一天下之动也。”（《正蒙·神化篇》）程颢说：“冬寒夏暑，阴阳也；所以运动变化者，神也。”（《遗书》卷十一）这些，均属此类用法。

火动说。金代医学家朱震亨说：“火内阴外阳而主动者也。……天恒动，人生亦恒动，皆火之为也。”（《格致余论·相火论》）明末方以智亦说：“凡运动，皆火之为也，神之属也。”（《物理小识》卷一·水）这些，都表达了同样思想。

作为比较，我们粗略回顾一下古希腊对于运动原因的探讨。希腊人认为所有运动的最后根源都是意志，地上物体的运动最终是出于人类与动物随心所欲的意志，天体的运动则出于造物主永恒不变的意志。这样，这一理论就为上帝的存在提供了证据。

相反，中国人则力图用同一因素（例如阴阳性质）统一地说明天地万物的运动，他们不重视天上和地上物体的差异。他们将物体运动的终极原因归结于其内在性质，而不去企求超自然力量的作用，从而在这个问题上排除了上帝的存在。这既是中国古代动力因理论的特点，也是它的历史价值之所在。

对运动的认识

本篇讨论古人对运动的基本认识。从物理学角度来讲，对运动有所认识的标志，首先是运动定义的建立，速度概念的掌握。在中国古代，早在先秦时期，我国先民就已经做到了这一点。

先秦典籍《墨经》讨论过运动的定义问题：

《经》“动，或从也。”

《说》“动：偏祭从，若户枢免瑟。”

对本条具体文字的解说，各家意见不一，然而大家都能同意的是：这一条是对运动所下的定义。“或”，可理解为古“域”字；“从”，指改变、变化。即运动就是空间位置的变化。《经说》举例说明《经》的定义，认为像屋门绕着门枢的旋转，就是一种运动。

《墨经》还讨论了构成运动的时空要素：

《经》：“行修以久，说在先后。”

《说》：“行：者行者必先近而后远。远近，修也；先后，久也。民行修必以久也。”

《经说》中的第一个“者”字是“诸”的省文。在这一条中，墨家明确指出空间位置的变化与时间流逝是紧密结合在一起的，这实际是对速度这一物理量的两个构成要素——空间位移和时间间隔的强调。这样，墨家虽然没用数学术语，但也确实是在向速度概念逼近。

在现存的中国古籍中，找不到速度概念的明确定义，但这并不等于说，我国先民没有掌握速度概念的内涵。实际上，早在先秦著作《管子》中，已经有了与速度有关的记载：

“天下乘马服牛，而任之轻重有制，有一宿之行，（原注：一宿有定准，则百宿可知也。）道之远近有数矣。”（《管子·乘马》）

“一宿之行”，指的是平均速度数值。以平均速度乘以所用“宿数”，则“道之远近有数矣”。在数学典籍《九章算术》中，也有明确利用速度概念编制的应用题。这些，都说明当时人们对速度、位移、时间间隔三者之间定量关系已经有了熟练的掌握。对速度概念的把握，标志着对运动的认识已经进入了量化阶段，因而十分重要。

但是，仅仅掌握了定量关系还是不够，因为速度的值决定于所选定的参照系，即物体的运动具有相对性。中国古代没有明确提出过参照系概念，但在许多讨论中都涉及到了它。例如著名的寓言传说“刻舟求剑”，谈论的实际上就是不同参照系中位置坐标转换问题，这类例子还可以举出一些，这里从略。

那么，究竟如何才能判定物体是否在运动呢？这就涉及到所谓绝对参照系问题。中国古人大都认为地是不动的，他们一般即以此为参照来描述物体运动。但是，这样有一个问题：一旦认为地也在运动，又以何为依据判断物体的运动与否？《列子·天瑞》即记述了这样的疑问：

“粥熊曰：运转亡已，天地密移，畴觉之哉？”

要解答这一问题，就需要找出一个不动的绝对参照系来。北宋张载的论述，可以说已经意识到了这一问题。他在讨论天体运动时说：

“恒星所以为昼夜者，直以地气乘机左旋于中，故使恒星河汉因北为南，日月因天隐见。太虚无体，则无以验其迁动于外也。”（《正蒙·参两篇》）

张载认为地也在运动，地的运动带动了日月星辰，使它们呈现出周日视运动。他慨叹说，因为天不是一个有形有质的壳体，所以无法检验日月星辰的这种运动。换言之，如果“太虚有体”，静止不动，以之为参照，即可判定日月星辰究竟在做何种运动。在这段话中，已经孕含了一种寻找绝对参照系的努力。

古代西方对此问题的解决，是认为天体分布在不同的球层上，处于内层的天体受到其外层天体的推动，最外层的恒星球层是由处在宇宙边缘的原动天或不动的推动者所推动。这个不动的原动天，就是一个理想的绝对参照系。这一思想随着明末传教士进入我国，也被传了进来，并为中国学者所接受。深受西学影响的《历象考成》在讨论天体运动时，说：

“欲明诸圆之理，必详诸圆之动，欲考诸圆之动，必以至静不动者准之，然后得其盈缩。……至静者自有一天，与地相为表里，故群动者运于其间而不息。若无至静者以验至动，则圣人亦无所成其能矣。人恒在地面测天，而七政之行无不可得者，正为以静验动故也。”（《清史稿·天文志一》）

这里明确提出寻找绝对参照系的必要，认为“至静者自有一天”，该天即为所要寻找的参照系。大地相对于该天静止，也是一种绝对参照系，因此在地面测天，就可以了解天体运动的真实情况。这段话是中国古代寻找绝对参照系所达到的最高认识，中西双方在此问题上走到一起来了。追求绝对参照系的努力，在科学史上已成为过去，但这种努力作为人们对物质运动性质一种较为深入的探讨，其历史价值是永存的。

在古人对运动的探讨中，还涉及到运动的迭加。所谓运动迭加，是指一物同时参与两种运动时，这两种运动按一定规则相互迭加，该物按迭加结果运动。早在《左传》书中，人们就运用运动的迭加来解释有关奇异现象。《春秋·僖公十六年》曾记载过“六鹢退飞过宋都”这样一种现象，《左传》解释说：

“六鹢退飞过宋都，风也。”

即是说，鹢本是向前飞的，可由于遇到强烈逆风，虽保持向前飞姿态不变，却被风吹得向后退去，因而看上去成了“退飞过宋都”。这就是用运动迭加的观点来解释这一奇异现象的。

在天文学中，古人常用运动迭加的观点解释天体的视运动，例如，《隋书·天文志》记叙周髀家云：

“天圆如张盖，地方如棋局。天旁转如推磨而左行，日月右行，天左转，故日月实东行，而天牵之以西没。譬之于蚁行磨石之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉。”

即是说，天壳是左旋的，日月本身是向右移动的，可是由于它们依附在天壳上，同时参与了天壳的左旋运动，二者反向迭加的结果，使得日月本身也呈现出左旋运动，但比天壳左旋速度要慢。这是一个典型的运用运动迭加观点的例子。

中国古代运动理论的一个重要成果是对相对性原理的描述，那是古人在解释古老的地动说为何与人们日常感觉不一致时提出来的，以《尚书纬·考灵曜》的说法最为典型：

“地恒动不止，而人不知。譬如人在大舟中，闭牖而坐，舟行而人不觉也。”

换成现代语言就是：在封闭的系统内，人们很难判定系统本身是否在运动。

由此，凭主观感觉不能否定大地在运动的判断。在欧洲，类似的描写最早出现于伽利略 17 世纪 30 年代出版的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》之中。伽利略的目的在于说明运动是相对的，并以此证明哥白尼日心地动说的正确。他自己并未认识到这一论述所具有的极深刻的物理意义。正确认识到伽利略陈述的内在物理价值，并称其为相对性原理，这是 20 世纪的事情。《考灵曜》的论述，情况与之类似，其作者在论证地动说正确的同时，无意中却阐发了物理学上甚为重要的力学相对性原理，尽管这一阐发在历史上并未起到多大作用，但其本身依然应该得到充分肯定。

转动理论

转动是日常生活中常见的运动现象之一，古人在对转动现象日积月累的联系过程中，也对之进行过观察与思考，从而形成了一定的转动理论。

古人没有转动惯量和动量矩之类概念，也很少从转动角速度出发对运动性质进行探讨，他们关注的是与转动中心有关的一些现象。

《庄子·天下篇》记述了：“辩者”提出的一个命题：“轮不蹶地”。这里体现的是对车轮转动过程中它与地面接触点亦即瞬时转心的重视。我们知道，轮子在作无滑滚动时，每一时刻以它和地面相接触的一点为瞬时转心来转动，随着时间推移，轮子边缘各点依次在地面印过而形成轮子转动。由于《庄子》未曾记叙“辩者”的立论依据，我们无从窥知他们在此问题上的知识状态，但无论如何，这毕竟是古人以转动为专门命题而展开的讨论，这类讨论有助于人们对转动特性认识的深化。

相比之下，《考工记》的记述则要详尽得多。其《轮人》篇讲述制车原理：

“凡察车之道，必自载于地者始也，是故察车自轮始。凡察者之道，欲其朴属而微至。不朴属，无以为完久也；不微至，无以为戚速也。”

对于车子，“载于地者”就是车轮。这段话对于车轮的制造提出了两个技术要求，一是要“朴属”，即坚固；另一是要“微至”，即尽可能的圆。汉代郑玄注释说：“朴属，犹附著坚固貌也。齐人有名疾为戚者。……微至，谓轮至地者少，言其圆甚，著地者微耳。著地者微则易转，故不微至无以为戚速。”郑玄认为，车轮越圆，它与地面接触面积就越小，就越有利于转动。这样的认识，是合乎实际的，它是古人对车轮转动时与地面接触点关系加以考察的结果。

另一方面，对于定轴转动，转动中心就在轴处。而对于像车的运动这类问题，若以车本身为参照系，则转动中心也在轴处。对转动中心的关注，使得古人对轴动现象给予了特别重视。

古人对跟物体转动轴线有关的部位有些专有名称，一般叫枢，也有叫机的。后秦姜岌《浑天论答难》提到：“天体旁倚，故日道南高而北下；运转之枢，南下而北高；二枢为毂，日道为轮，周回运移，终则复始。”这是用“枢”的例子。《管子·形势解》说：“奚仲之为车器也，方圆曲直皆中规矩钩绳，故机旋相得，用之牢利，成器坚固。”机旋相得，指转动时车轴和车毂配合得好，这是用机表示转动枢轴的例子。

物体在转动时，离开转动轴线垂直距离越远，转动线速度越大；越近，转动线速度就越小。古人在实践中观察到了这一现象，并由此想到，物体的转动既然是绕轴进行，有时是从轴动开始，那么轴就具有异乎寻常的重要性，它居于枢要地位，对物体的转动具有带动、控制作用。蔡邕《月令章句》说：

“天者，纯阳精刚，转运无穷，其体浑而包地。……其上中北偏出地三十六度，谓之北极；……其中南偏入地亦三十六度，谓之南极；……此两者，天之辐轴所在，转运之所由也。”

扬雄《太玄经》云：

“南极北极，天轴所在，转运所由，譬车之有轮，所以自行也。”

这些，都是说天体的运转是由枢轴的运动开始的。伏胜《尚书大传》把枢轴的带动控制作用描述得更为形象：

“旋机者何也？传曰：旋者还也，机者几也、微也。其变几微，而所动者大，谓之旋机。”

这里“机”指天体旋转枢轴，它在整个天体当中，十分微小，它的转动规模，当然也十分微小，但它所带动的，却是比它不知大多少倍的天球。它是天体运动的带动者。

中国古代对转动的认识，侧重于强调转动中心或转轴的作用，认为它们对整体的转动具有带动、控制作用。从力学角度来看，转动中心在人们认识转动的过程中，的确具有特殊地位，而且也确实可以通过转动中心实现对整体转动的带动和控制，但这不是唯一的，对非转动中心部位施加作用也能达到同样效果。中国人唯独重视转动中心部位，强调枢轴的作用，这与中国古代社会长期处于中央集权状态，在内涵上倒是相通的。无论如何，中国古代这种独特的转动理论对近代力学中有关转动学说的发展无多大关系，却为中国古代哲学提供了可资借鉴的素材，这是值得一提的。

老子《道德经》讨论哲学概念“有”和“无”的依存关系：

“三十辐共一毂，当其无，有车之用；……有之以为利，无之以为用。”
毂是中空的，可以置轴，也唯其中空，才可以实现车子的功用。老子注视的是车轮转动过程中轴与轴孔之关系，认为正是轴孔处的空无导致了车子功能的实现。他以车轮转动为喻进行阐发，极富启迪价值。这一命题直到今天还为人们津津乐道。

对类似转动现象的探讨，也启发庄子提出了一个重要的哲学概念——环中。环者，体圆中空，居外周环运转，变化不尽；居内立静面动，应对无穷。庄子认为，人只要立足于事物周环运转的“环中”，就可以齐是非、免争论。他说：

“是亦彼也，彼亦是也，彼亦一是非，此亦一是非，果且有彼是乎哉？

果且无彼是乎哉？彼是莫得其偶，谓之道枢，枢始得其环中，以应无穷。是亦一无穷，非亦一无穷也。”（《庄子·齐物论》）

依据庄子的观点，人们对是非的争执是无休止的，只有把握住道的枢要，就像把握住环的中空之处一样，才能立足于无是非之处，才可以应付无休止的是非争论。

这实际反映了他对转动的有关认识：立于转动中心，以不变应万变，可以自如地处理、应付，引导整体的转动。他把这一认识移植到人生哲学上来了。

枢轴在转动过程中，“其变几微，而所动者大”，由这一特点出发，并受弩机等器具启示，古人还发展出一种机发思想，由之构成了中国古代一种独特的认识论思想（参见本书“机发思想”一文）。至于古人在社会政治、组织生活中对“中枢”作用的重视和强调，更是司空见惯，尽人皆知，这里不再赘述。

无意插柳柳成荫。中国古代转动理论在哲学领域大放异彩，从另一个侧面表现了自己存在的价值，这是我们始料未及的。

对光的认识

本篇讨论古人有关光的一些学说，内容涉及到古人对于光的本性、发光和反光、光的速度、光的传播等问题的认识。

在对光本性的认识上，古人深受元气学说影响，认为气是宇宙万物本原，光亦不例外，在本质上，光是一种气。例如，春秋时医和提到：“天有六气……六气曰阴阳风雨晦明也。”（《左传·昭公元年》）晦、明同为光的表现形式，差别在于光强的不同，医和将晦、明并列，显示出他没有觉察到二者的统一性。但无论如何，“明”可以视为光的表现形式，所以他无疑是主张光是气的。

《淮南子·原道训》从万物化生角度提出了同样认识：

“夫无形者，物之大祖也；无音者，声之大宗也。其子为光，其孙为水，皆出于无形乎？”

无形，指的就是元气。这一段告诉我们：光是元气的直接产物，它本身也应该是气。后人有许多说法，直接把光说成气。例如，《朱子语类辑略》卷一记述蔡元定的话说：

“日在地中，月行天上，所以光者，以日气从地四旁周围空处进出，故月受其光。”

此处蔡元定就直接把日光说成了日气。明代医学家张介宾说得更为清楚：

“盖明者，光也，火之气也；位者，形也，火之质也。如一寸之灯，光被满室，此气之为然也；盈炉之炭，有热无焰，此质之为然也。”（《类经·素问·天元纪》）

他不仅明确表达了光为气的思想，而且还论述了光源与光的差别。

光既然为气，那么光源向外发光的过程就是光之气离开光源向外传播的过程，古人把这叫做外景。景就是光的意思。与外景相应应有内景，表示物体被照而反光。外景、内景的说法在先秦文献中已可见到，《曾子·天圆》有“火日外景而金水内景”，《荀子·解蔽》有“浊明外景，清明内景”，都属于此类用法。到了汉代，《淮南子·天文训》用气的学说对“外景”、“内景”做了解释：

“天道曰圆，地道曰方。方者主幽，圆者主明。明者吐气者也，是故火曰外景；幽者含气者也，是故水曰内景。”

“明者”指光源，例如火，它向外发光，叫吐气，是为外景；“幽者”指反射物，例如水，它能接受外来光线，反射成像，看上去如同物在其内，故此叫含气，是为内景。亦即外景、内景的区别在于吐气、含气的不同。

“外景”、“内景”也有不同的叫法。张衡《灵宪》说：“夫日譬犹火，月譬犹水，火则外光，水则含景。”这里就用“外光”代替了“外景”，用“含景”代替了“内景”。葛洪说：“羲和外景而热，望舒内鉴而寒。”（《抱朴子·内篇·释滞》）羲和指日，望舒指月，内鉴指内景。所有这些叫法，本质上是一致的，都不出《淮南子》论述的范围。

与光是气的观点相应的是光行极限说，认为光的传播有一定范围。这类说法在古代甚为常见，例如《周髀算经》卷上说：“日照四旁各十六万七千里，人望所见远近宜如日光所照。”《淮南子·地形训》：“宵明烛光在河洲，所照方千里。”唐《开元占经》引石申说：“日光旁照十六万二千里，径三十二万四千里。”《尚书纬·考灵曜》说：“日光照三十万六千里。”

这些数据，各不相同，但有一个共同特点，都主张光行有限。

光行有限观念的提出，应该与古人光为气的认识有关。光既然为气，那么由光源发出的光就只能在有限的范围内传播，不能设想有限量的气会传播到无穷远的空间中去。另外，光传播过程中近则亮、远则暗的现象，也易于使人想到它只能在有限的范围内传播。据此，古人提出光行有限说，也有其一定的内在依据，并非全出于臆想。即使以今天的知识来看，光行有限的思想，也不是全无道理。设想一个点光源，它以球面波形式向外辐射光能，在距光源一定距离之处单位面积接受到的光能与距离的平方成反比，这样，当距离增加到一定程度，单位面积上接受的光能就会低于接收器的感知阈值，这个距离就可以视为光线传播的极限距离。从这个意义上来说，光的传播范围是有限的。

另一个相关的问题是光速：光的传播是即时的，还是需要一定时间？中国人没有超距作用观念，他们先验地认为光的传播需要一定时间，即光速是有限的。古人没有就这一问题展开过专门意义的讨论，但我们可以从一些相关的材料中，间接窥知他们的态度。

《墨经·经下》记述小孔成像，《经说》在解释该实验时提到：“光之人，煦若射。”一个“射”字，就隐含了光有速度的观念。晋蔡谟《与弟书》，也明确涉及光速，原文为：

“军中耳目，当用鼓烽。烽可遥见，鼓可遥闻，形声相传，须臾百里，非人所及，想得先知耳。”

形声相传，是说光与声一样，都有一个传播过程，即是有速度的。须臾百里，则言速度甚快。

唐甘子布作《光赋》，畅论光的性质，其中提到：

“从盈空而不积，虽骏奔其如静。”

意为：光的传播纵然充盈太空，但并无质的堆积滞塞，光速极快但人们却不能直接感受。这两句话很形象地说明了光的特点，表述了古人认为光有速度的见解。

光速观念的产生，从逻辑上讲，与古人对光本性的认识有关：光既然为气，受光处被光照亮的过程，就是光之气由光源到达受光处的过程。另外，离光源近的则亮，远则暗，这也启示人们考虑光气有个传播过程。古人没有将光的传播与超距作用相联系，这样，光有速度观念的产生，是十分自然的。

本篇所要讨论的最后一个问题，是古人对光传播方式的认识：光是走直线还是走曲线？光行直线有直接观察依据，生活中也易于积累起这样的经验，古人不难掌握这方面的知识。晋朝葛洪说：“日月不能摘光于曲穴。”（《抱朴子·外篇·备阙》）又说：“震雷不能细其音以协金石之和，日月不能私其耀以就曲照之惠。”（《抱朴子·外篇·广譬》）北宋张载说：“火日外光，能直而施。”（《正蒙·参两篇》）这些，都是谈的光走直线。

另一方面，古人也有光行曲线的思想，这主要表现在与天文学有关的论述上。例如，晋朝杜预解释日环食，提出：

“日月同会，月奄日，故日蚀。……日光轮存而中食者，相奄密，故日光溢出。”（《后汉书》卷二十八刘昭注引）

依据古人的认识，日月等大，若光依直线传播，则不可能发生日环食。杜预解释说：之所以会发生日环食，是由于月掩日时，有时因相距近，日光由四周溢入月之背影中一些的缘故。他的话，显然表现了一种光可弯曲行进的认

识。

后秦姜岌解释月食，也运用了光行曲线思想：

“日之曜也，不以幽而不至，不以行而不及，赫烈照于四极之中，而光曜焕乎宇宙之内。循天而曜星月，犹火之循炎而升，及其光曜，惟冲不照，名曰暗虚。举日及天体，犹满面之贲鼓矣。”（《浑天论答难》）

这是说，日光在行进过程中，受到天球的局限，于是就沿着天球曲面向日的对冲传播，唯有正对冲之处不能照及，形成暗虚，月亮从那里经过，就产生月食。光沿着天球曲面传播，当然是走的曲线。

南宋朱熹对月亮中阴影成因的解释，也潜含了光行曲线思想。他认为月中黑影是地在月亮上的投影，指出：

“日以其光加月之魄，中间地是一块实底物事，故光照不透，而有些黑晕也。”（《朱子语类辑略》卷一）

根据古人认识，日月的尺度要远小于地，这样，大地在日光照耀下所成之阴影，不可能沿直线按几何关系投至月面上。要保持朱熹说法的成立，就必须认为日光是绕地沿曲线进行的。

综上所述，中国古人确实存在着光在远程传播，受物阻挡时，可沿曲线行进的认识。这与古人对光本性的猜测一致：光既然为气，当然不能排除它遇物阻挡时可以绕物曲行。但需要指出的是，中国古代的光行曲线之说，与现代波动光学认为光循波动规律传播的说法有本质不同，切不可将二者混为一谈。

视觉理论

研究古人的视觉理论，是物理学史关注的课题之一。中国古代对视觉问题虽未进行过专门而又系统的研究，但古人在讨论相关问题时却多曾涉及这一领域，并形成了一定的认识，值得我们重视。

讨论视觉，首当其冲的当然是光、物、目三者之间的关系。在此问题上，我国古代和西方类似，既有主张眼睛是光的接受器的，也有主张眼睛自身向外发光的。

例如，东汉王符对光、物、目三者之间的关系有较为清晰的认识。他说：

“道之于心也，犹火之于人目也。中阱深室，幽黑不见，及设盛烛，则百物彰也。此则火之耀也，非目之光也，而目假之，则为已明矣。”（《潜夫论·赞学》）

这是说，在“幽黑不见”的深院内室，一经点燃蜡烛，就能看到东西，这不是眼睛发出了光，而是眼睛借助于火光看到了物。显然，这段话表现了一种眼睛本身不向外发光，而是借助于外光才能见物的认识。它代表了持同样观点的古代学者的共同见解，与现代认识也是类似的。

另一方面，认为眼睛不需要借助外光即能见物的观点在中国也是存在的。对此，有必要多举几个例子。晋朝葛洪在批驳盖天说时提到：

“今日径千里，其中足以当小星之数十也。若日以转远之故，但当光耀不能复来照及人耳，宜犹望见其体，不应都失其所在也。”（《隋书·天文志》）日光照不到人，人仍然应该看到日，这里反映的显然是一种目不需借助外光即能视物的认识。

明末学者王夫之明确将视觉与听觉分开，指出二者在获取的方式上有所不同。他说：

“乃视者，繇中之明以烛乎外，外虽入而不能夺其中之主。耳之有听，则全乎召外以入者也。”（《庄子解·人间世》）

王夫之认为听觉的产生，完全是外界声音进入的结果，这与视觉不同。视觉的产生，“繇中之明以烛乎外，外虽入而不能夺其中之主。”既有外光进入眼中的一面，又有眼睛向外发光以照物的一面。

与王夫之同时代的方以智，更是明确主张眼睛自身发光，他说：

“晦夜昏黑，地虽遮日，空自有光。人卧暗室，忽然开目，目自有光，何讶虎泉猫鼠之夜视耶？”（《物理小识》卷一·光论）

虎泉猫鼠之类夜晚能看到东西，是因为它们的眼睛对外光比较敏感，方以智却认为这是它们眼睛自身有光的结果，并说人眼也同样如此。他的学生揭暄解释说：“气本有光，借日火而发，以气为体，非以日火为体也。……目之神光，具各种异色，从暗摇之而见，闭而摇之而亦见，可见无物不含光性，以气为体，不专日与火也。日火皆气也。”（《物理小识·卷一·光论》揭暄之注语）“闭而摇之而亦见”，可能是指人闭上眼睛，依然能感受到外界的光刺激。从这些话中可以窥知方以智等人的思想：既然“气本有光”，而万物由气组成，故“无物不含光性”，眼睛当然也就自身有光了。

眼睛对于视觉的形成具有重要作用，对此，古人有着十分清晰的认识。但他们对眼睛如何形成视觉的解说，却多数都比较模糊，属于就事论事的范围，只有清代郑复光的论述，才具有较为详明的物理图景。郑复光受到西方传教士所带来的光学知识影响，运用光线概念建立了自己的视觉理论。他说：

“目睛内有物如水晶球，故外面包裹，其形必凸，凸者返照物景恒小，能使当前全境毕照。盖视法有二，其一从目中心出两线射物上下，以取物全体而得其形；其一从睛上下两边各出一线以射物，细分而察其质。两法之线皆三角理，凸则角愈展而物景小，故全境皆收入也。”（《镜镜论痴》卷一·原目）这里描述的是视物过程中的几何关系，旨在说明以一目之微，如何能做到“使当前全境毕照”。另外，物体分布距人有远近，眼睛在观察它们过程中，如何进行调节以适应这一特点，郑复光说：

“睛形有二解，一曰外凸，有聚光能力；一曰内长，有伸缩能力。外凸之光线以广行为用，内长之光线以收展为用，故妙龄睛足，可聚成三角以察近细，亦能展示三角以瞩高远。”（同上）

即是说，通过调节眼睛晶状体的凸起程度，可以看到不同程度的物体。他进一步举例说明道：

“目前数寸，隔纱视物，合眸微启，则纱之经纬井然，而外物模糊不清。

晃其目，则外物呈露，而纱之经纬茫然矣。岂非伸缩眸子之故乎？”（同上）

晃目，即张目，郑著《费隐与知录》一书相应条目径作张目。郑复光把目能看到远近不同的物体的原因归结为眸子的伸缩，这是从物理角度对目视物主动性的描述，比之前人的某些抽象议论，向前迈进了一大步。郑复光的理论，正确与错误并存，他对具体光路的解说，大都是错误的，但他毕竟是运用光线概念，通过对眼睛结构的分析，建立起了自己的视觉理论。他的努力标志着中国人在走向建立在生理解剖和几何光学基础上的近代视觉理论的过程中，已经迈出了第一步，因而是值得肯定的。

中国古代视觉理论值得一提的另一侧面是其对视觉局限性的认识。西方科学在发展过程中，对视觉局限性的认识比较深切。曾经有过一种说法，“以视觉为基础的，无权成为科学。”这种说法本身就表现了人们对视觉局限性的警觉。中国古人对视觉局限性的强调虽然没有达到这种程度，但也是有所认识的。

《荀子·解蔽》详细列举了引起视觉错误的一些情况：

“凡观物有疑，中心不定，则外物不清。吾虑不清，则未可定然否也：冥冥而行者，见寝石以为伏虎也，见植林以为后人也，冥冥蔽其明也。醉者越百步之沟以为一步之浚也；俯而出城门，以为小之闾也；酒乱其神也。厌目而视者，视一以为两；掩耳而听者，听漠漠以为汹汹：势乱其官也。故从山上望牛者若羊，而求羊者不下牵也，远蔽其大也；从山下望木者，十仞木若箸，而求箸者不上折也，高蔽其长也。水动而景摇，人不以定美恶，水势玄也。瞽者仰视而不见星，用精惑也。”

荀子描述的视觉错误，大致可归因为：内心不定、神志不清、目受障或有病、物距不当、视觉背景反常。他的描述，是比较详备的。而且，他还意识到，视觉与意识不可分离，由于客观条件的作用，视觉会产生假象，但人经过自己的思考，可以不为假象所迷惑，达到对视觉对象的正确认识。

中国古人对视觉局限性的认识，伴随着他们对具体科学问题的探讨而得到发展。例如，东汉张衡在解释太阳早上看上去大、中午看上去小的现象时，就注意到了不同光度背景对视觉产生的影响，他说：

“繇暗视明，明无所屈，是以望之若大；……繇明视暗，暗还自夺，故望之若小。”（《灵宪》）

即是说，同样亮度的物体，在昏暗背景下看上去要大些，反之则小。张衡的

描述，是合乎实际的。

晋著作郎阳平束皙在讨论同一问题时，则强调不同空间背景所造成的视觉差异，他说：

“置器广庭，则函牛之鼎如釜；堂崇十仞，则八尺之人犹短：物有陵之，非形异也。”（《隋书·天文志上》）

由此，眼睛看到的東西不能作为判断是非的标准：

“夫物有感心，形有乱目，诚非断疑定理之主。故仰游云以观月，月常动而云不移；乘船以涉水，水去而船不徙矣。”（同上）

这种认识，倒是有些类似于西方“以视觉为基础的，无权成为科学”的信条，但又没有那么过激。

那么，如何才能获得对外界的客观认识呢？后秦姜岌有一段话，颇富启发性，他说：

“浑天之体，圆周之径，详之于天度，验之于晷影，而纷然之说，由人目也。参伐初出，在旁则其间疏，在上则其间数。以浑检之，度则均也。旁之与上，理无殊也。”（《隋书·天文志上》）

即是说，人目所见，不足为凭，需要用仪器来补正，借助客观仪器来补正人眼的不足，克服用眼睛直接观察所产生的视觉局限性。这在今天看来，是完全正确的认识。

中国古人对视觉问题的研究，大都是在借物喻理的过程中进行的，缺乏自己的内在系统性。但古人毕竟涉足到了这一领域，而且提出了自己丰富多采的视觉理论，这是值得重视的。

形像信息弥散分布说

所谓形象信息弥散分布说，是古人在探讨像信息空间分布特征时得到的一种认识。一个物体，放在那里，四面八方都可以看到，我们就说这个物体像信息弥散分布于它周围的空间之中。几何光学对这一现象的解释，是说物体对作用于它上面的光存在着漫反射，反射光散布于四面八方，也就把物体的像信息传递到了四面八方。这些携带着像信息的光线一旦遇到合适的接受器，例如人的眼睛或其他光学成像系统，就能够把物体的像显现出来，即这些弥散分布的形象信息是可以取读的。

形象信息在空间中的弥散分布是客观存在，古人对此不可能毫无察觉。对像信息分布特点的探讨，构成了中国古代独特的形象信息弥散分布说。此说认为所有物体的形象信息都弥散分布于空间之中，空间中任何一处接收到的像信息都反映了所有物体的形状。这一学说起源较早，西晋陆机（261—303年）《演连珠》即曾提到：

“鉴之积也无厚，而照有重渊之深；目之察也有畔，而视周天壤之际。”

这是说，镜子的成像功能只在一个反射面，就这个面来说，它无厚可言，却可以照见重渊之深，不论多远的物体，都可以在这个反射面处表现出来；眼睛受光之处甚小，但却可以洞察六合之广，在眼睛的瞳孔之处，汇集了天下物体的像信息。可见，陆机已经接触到了形象信息弥散分布这一命题。

佛教禅宗南宗创始人慧能从佛理角度出发，对形像信息的弥散分布有所领悟，他说：

“世界虚空能含万物色象，日月星宿、山河大地、泉源溪涧、草木丛林、恶人善人、恶法善法、天堂地狱、一切大海须弥诸山，总在空中。”（《六祖坛经·般若品》）

这里意在谈论佛理，所用的不是物理语言，但无论如何，他提出“世界虚空能含万物色象”，是包含了一些物理图景在内的。

慧能的弟子玄觉的说法，描绘了一幅更清晰的物理图像，他说：

“一性圆通一切性，一法遍含一切法，一月普现一切水，一切水月一月摄。”（《永嘉证道歌》）

天上的月亮只有一个，却能映现在一切江河湖海之中。江河湖海中映现的千千万个月亮虽因观者而异，但每一个都不是天上月亮的部分，而是同具它的全体。这里显然涉及到形象信息的弥散分布现象，月亮的形象信息是弥漫于所有空间之中的，只要遇到合适的显现条件（如水），就能映现出来。

唐末道士谭峭对形象信息的弥散分布也有所提及，他说：

“游云无质，故五色含焉；明镜无瑕，故万物象焉。谓水之含天也，必天含水也。夫百步之外，镜则见人，人不见影，斯为验也。是知太虚之中，无所不有；万跃之内，无所不见，而世人且知心仰寥廓而不知迹处虚空，寥廓无所间，神明且不远，是以君子常正其心，常俨其容，则可以游泳于寥廓，交及于神明而无咎也。”（谭峭：《化书》卷一《游云》）

“游云”、“明镜”之喻，意在说明虚能含物。形象信息能弥漫于空间之中，也是因为空间是空虚无物的，谭峭论证说，拿面镜子，可以照见百步之外的人的像，在同一处，没有镜子则不见像，说明像素还是存在于这一处的，镜子是使像得以显现的条件。由此，他得出结论说：“太虚之中，无所不有，万跃之内，无所不见。”人处在虚空之中，一举一动，形象皆塞于天地，因

此“君子”必须“常正其心，常俨其容”，不可有稍许懈怠。他这是由形象信息的弥散分布，引申到“君子”的为人处事之道上去了。

明代僧人真可亦提及“影散百川”的现象，他说：

“圣人促万劫为一瞬，延一刻为千古；散一物为万物，如片月在天，影临万水也；卷万物为一物，如影散百川，一月所摄也。此非神力为之，吾性分如是耳。”（《紫柏尊者全集》，卷一，《法语》）

和慧能玄觉一样，真可也是用形象信息弥散分布这种物理现象来说明佛理。他更进一步，甚至把这种现象推演到了时间信息的分布上去了。

对形象信息弥散分布特征作出物理性总括并加以深入说明的，是清初的揭暄，他在《物理小识》卷一“气论”条注语中写道：

“所以为气，吾师言之矣。气既包虚实而为体，原不碍万物之鼓其中，而依附以为用也。凡诸有形色、有声闻，莫不赅而存之天地之间，岂有丝毫空隙哉！”

赅，兼备、完全也。揭暄说万物之形声皆赅而存于天地之间，不留一隙，这是说的气中波信息的广延和分散特性。下文中他又进一步说明：

“气之统体，若一大镜，万物之丽于地者，悉映于天，故山市海市、暗室一隙，皆得转吸而见之。大镜之中，不碍其分为各小镜也，不碍小镜之即大镜也。万其水即万其月，万其目即万其影，住去毕具，无有分别。”

这是对形象信息弥散分布特点的具体说明。气是一个整体，居附于地上的万物经过波传播方式（转吸）全被映入气中，其中任何一部分都包含了整体的信息，小中有大，大中有小，可以通过小范围的读取获取整体的信息。揭暄的陈述，实际涉及波像信息的弥散性和取读的全息性两个方面。这两者本质上是一致的，只是用于不同场合而已。若重在信息取读，则全息性合用，指从任一存贮单元取读的光信息都是“全息的”；若重在信息存贮，则应用弥散性，指物的整体信息弥散分布于全部存贮介质之中。弥散是全息的基础，没有“弥散”的分布，就没有“全息”的取读，揭暄所谓“悉映于天”、“皆得转吸而见之”，指的是光信息分布的弥散性；“不碍小镜之即大镜”、“万其目即万其影，住去毕具，无有分别”，指的是取读的全息性。由此，他的叙述是很全面的。

揭暄接下去说：“此其可见者，其不可见者则以音传，如风声、水声、人声、鸟声、诸乐作声，一时异响杂奏，历历伦类，不相蒙掩。即重垣昏夜间，十方一耳，可使达也。”这里描述的是波的独立传播现象，它是波信息弥散分布特征的物理基础。揭暄将二者置于一起，有可能窥到了它们之间的某些联系。

需要指出，全息是相对的，有量的非均衡衰减，所以不是一切物等效可见。古人提出的形象信息弥散分布说，对此未多加阐述。我们今天在理解这一学说时，却不能不考虑到这一点。

还应指出，古人对光信息弥散分布特征的探讨，大多是要通过这一物理现象说明某一深奥的哲理。前述慧能、玄觉、真可等佛门弟子皆然。这一特点在一些儒士身上也同样存在。之所以出现这一情况，是因为这一原理本身就含有深刻的认识论含义。今天我们从现代物理学知道，物质存在形式的一个侧面是波，可以通过对部分波的研究获得对整体的认识。菲涅耳—惠更斯衍射积分公式告诉我们：波信息的二维全息性是基本的普遍的原则。所以，这种思想方法有其深厚的自然科学基础。现代激光全息术的发明，进一步证

明了这一点。生物全息律的出现，表明这种思想方法在其他学科中也在展开着。由此，对中国古人提出形象信息弥散分布说的哲学和科学意义，是不可低估的。

格术

格术是中国古代一种重要的几何光学成像方法。它以光的直线传播性质为基础，认为在小孔成像和凹面镜成像过程中，存在一个约束点，该点使得物和它的像形成“本末相格”的对应关系。这是古人运用相似几何学方法处理成像问题的一种尝试。它在一定程度上揭示了相应的成像机理。

格术一词的明确提出，最早见于北宋沈括的《梦溪笔谈》卷

“阳燧照物皆倒，中间有碍故也，算家谓之格术。如人摇橹，橈为之碍故也。若鸢飞空中，其影随鸢而移；或中间为窗隙所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东。又如窗中楼塔之影，中间为窗隙所束，亦皆倒垂，与阳燧一也。阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。其无所见处，正如窗隙、橹橈，腰鼓碍之，本末相格，遂成摇橹之势。故举手则影愈下，下手则影愈上，此其可见。（沈括原注：阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内。离镜一二寸，光聚为一点，大如麻菽，著物则火发，此则腰鼓最细处也。）”

沈括在这里列举了凹面镜成像和小孔成像两种情况。引文中阳燧指凹面镜，窗隙则相当于小孔成像中的孔。沈括统一用格术解释它们的成像机理，认为其成像过程就像船工摇橹一样，橹绕着其支点“橈”转动，从而使得支点两侧橹的运动形成一种“本末相格”的几何关系。同样，在凹面镜和小孔成像过程中，也有一个特殊点“碍”存在（碍，在凹面镜成像为焦点，在小孔成像为小孔），它相当于摇橹时的“橈”，光线受其约束，在“碍”处会聚，导致生成与物具有“本末相格”之势的像。

格术是几何光学成像中的基本方法。它的适用范围并不局限于小孔和凹面镜，也包括凸面镜和透镜，甚至对一些波动光学元件也成立。相应的约束点“碍”也不仅限于小孔或焦点，也可以是曲率中心或光心。用它既可以说明倒像的形成机理，也能够解释正像的生成原因。现行的几何光学成像作图法，本质上都是格术。如图 a 所示凹面镜成像的作图法，就是分别以焦点 F 和曲率中心 C 为碍连用两次格术操作的结果。图 b 所示凸透镜成像的作图法，则是以焦点 F 和光心 O 为碍连用两次格术操作的结果。一般说来，小孔成像只需用一次格术操作即可，球面镜和透镜成像而须连用两次格术操作，才能最终确定像的大小、倒正和位置。

成像问题可用格术操作解决，这有其内在道理。像的定义要求像与物之间成点点对应的空间变换关系，而格术是满足这一要求的最简单的空间变换——点投影变换。进一步的研究表明，成像过程的格术也符合波动光学基本规律。由此，格术概念是包含有极其深刻的物理内涵的。当然，这些只是我们今天的认识，古人并未达到这样的深度。

格术作为一种几何光学成像操作方法，在沈括之前已经存在。《墨经》对凹面镜成像的解释，在本质上就是格术。《经》记述凹面镜成像特征，说：“鉴洼，景一小而易，一大而正，说在中之外内。”即是说，凹镜的像，一种是缩小的倒像，一种是放大的正像，原因是物位于“中”的内外不同。《经说》解释道：“鉴：中之内，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小；而必正。起于中缘正而长其直也。中之外，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小；而必易。合于中而长其直也。”这里“中”的概念十分重要，由引文及《墨经》的几何知识来看，“中”显然

指的是一个点。物体位于“中”的外内，决定了成像的倒正，符合这一条件的点只能是焦点。墨家意思是说：物体位于焦点里面时，靠近焦点，则照在镜面上的投影要大些，生成的像也大；远离焦点，照在镜面上的投影要小些，生成的像也小，但都是正像。这是因为物体在镜面上的投影是从焦点出发，依照正立的姿态而投射上去的。物体在焦点外的成像情况与之类似，只是所成的像都是倒像，这是由于由物体发出的光线先在焦点处聚合，然后才投射到镜面上去的缘故。需要指出，《经》文并未将凹面镜成像的三种情况（小而易、大而易、大而正）完全记录下来，但《经说》对成像机理的解释则涵盖了这些情况，而且在本质上与格术概念一致。此外，墨家还提出像的大小决定于物离开焦点的远近，这是完全正确的。但由于《墨经》语言的隐晦和后世墨学的衰微，墨家用以解释凹面镜成像的这套理论，长期不为人们所知。一直到了宋代，沈括才记叙并发展了类似的方法，并且赋予它专门名称，叫做格术了。

无论墨家还是沈括，都没有充分认识到格术所具有的深刻物理学含义。他们在讨论凹面镜成像时，只运用了一次格术操作，这只能解决像的大小和倒正，不能同时确定成像位置。但无论如何，格术概念的提出，毕竟标志着古人不但开始从光线进行角度分析成像情况，而且抓到了成像本质，这为中国古代几何光学的进一步发展奠定了基础。清代郑复光曾利用格术概念探讨过具体光学问题，邹伯奇则以《格术补》作为他的几何光学著作的书名，在其他书籍中也可见到用格术思想解释小孔成倒像的例子，这表明格术概念对中国古代几何光学发展产生了一定影响。时至今日，我们依然可以从这一概念中获取许多有益的启示，这正是它的历史价值之所在（参见李志超、徐启平：《中国古代光学的格术》，《物理》14卷12期，1985年）。

光的波动学说

在中国古代光学的百花园中，曾经出现过一支奇葩，那就是明末学者方以智在其《物理小识》中提出的光的波动学说。

方以智在对光本性的认识上，修改了前人的学说。中国古代讨论光的本性，通常认为光本身是一种特殊的气，发光过程就是光之气由光源到达接受者的过程。方以智则认为，光是气的表现，是气的一种特殊运动形式，他说：“光理贯明暗，犹阳之统阴阳也，火无体，而因物见光以为体。”（《物理小识》卷一·光论）他的学生揭暄注解道：“气本有光，借日火而发，以气为体，非以日火为体也。故日火所不及处，虚窗空中皆有之，则余映也。”即是说，光源的作用在于激发气中本来已经蕴含的光，光以气为体，它不是直接由光源发出的，这与前人主张光为气的学说显然不一样。

那么，气究竟如何表现为光呢？方以智描述道：

“气凝为形，发为光声，犹有未凝形之空气与之摩荡嘘吸，故形之用，止于其分，而光声之用，常溢于其余。气无空隙，互相转应也。”（《物理小识》卷一·光论）

形，指有一定形体质地的物质；分，指“形”所占据的空间。方氏意为光声的发出是空气被激发的结果。有形之物，固定占有相当于其体积的空间，无形的光声，则由其激发之处向四外传播。按方氏看法，“空皆气所实也”（方以智：《物理小识》，卷一·气论），即气体弥漫整个空间，毫无间隙，这样，倘一处受激，必致处处牵动，“摩荡嘘吸”、“互相转应”，空气一层一层地将扰动由内向外传播开去。这有如水上投石，石激水荡，纹漪既生，连环不断。方以智的描述，显然是一幅清晰的波动图像，我们姑且名之为气光波动说。

方以智的气光波动说十分原始，因为它不讲周期，也缺乏明确的对振动的描述，但它确实确实是波动说。有一种较普遍但不正确的观念，认为非周期性振动的传播便不是波。其实，依据物理学的定义，“波是在介质中传播的一种扰动”，进一步，状态变化的传播即为波。周期性并非形成波的必要条件，脉冲波也是波。现代数理方程教科书中在波动方程部分给出的普遍解是： $f_1(x+vt) + f_2(x-vt)$ ，它并不规定周期性。不谈周期性才是抓住了波的共性，说“没有周期性便不是波”，倒是错误的。而且西方光波动说的早期提倡者如笛卡尔（Descartes, 1596—1650年）、惠更斯（Huygens, 1629—1695年）等，亦未曾提到光的周期性问题的，不能唯独要求方以智做到这一点。

中国古人对声的波动性认识较为深入，如王充、宋应星皆然。今人对此没有什么异议。在《物理小识》中，方以智多处将光、声并论，认为二者以同样方式发生、传播，这是其光波动思想的自然表露。我们既然认为古人对声的认识是一种朴素的波动理论，那么对于具有同样形态的方以智的光学理论，为什么就不愿意承认它是一种波动学说呢？当然，方以智的光波动说与今所言之波动光学不可同日而语，在方氏理论中，光是气之间相互作用的传播，是纵波；而近代光学则认为光是电磁作用在空间的传播，是横波。方以智对光的描述，更类似于近人对声波动性的认识，这从一个侧面证实了它确为波动学说。

从光的波动性出发，方以智等人还对光的传播方式作了独具特色的探

讨。根据气光波动说，光依靠“摩荡嘘吸”、“互相转应”的方式向外传播，这样，一旦遇到障碍，光自然会向阴影区弥漫。据此，方以智提出了一个极其重要的概念——光肥影瘦，其意为光总向几何光学的阴影范围内侵入，使有光区扩大、阴影区缩小。即光线可以循曲线传播。这是方氏气光波动说的自然推论。

方以智是在评论西学测算日径的方法时提出这一概念的。不知何故，他误解了传教士讲的太阳直径数，说人家讲的是：太阳到地球距离约为太阳直径的3倍多，这样违反常识的说法当然是方以智所不能接受的。他经过分析，认为是传教士未曾考虑光肥影瘦因素，因而测算结果大于太阳实际直径。他说：

“皆因西学不一家，各以术取捷算，于理尚膜，诂可据乎？细考则以圭角长直线夹地于中，而取日影之尽处，故日大如此耳。不知日光常肥，地影自瘦（见图1），不可以圭角直线取也。何也？物为形碍，其影易尽，声与光常溢于物之数，声不可见矣，光可见、测，而测不准也。”

方以智提出的“日光常肥，地影自瘦”，是说太阳光在受到地球遮蔽时，要向其几何投影处弯进去一些，从而使得地的投影变小了，如图1所示。他特别提到，光的这一性质与声音相同，声音遇到障碍物阻挡时，会绕到障碍物后面，光亦如此。声音不能看到，光却是可以看见，并能加以测量的，但这种基于光线直进性质对发光体方向进行的测量是“测不准”的。

揭暄为《物理小识》光肥影瘦说所做的注解有助于我们正确理解这一学说本义。他说：

“日之为光者，火也。火气恒散，天圆体，散之不得，则必循天而转，以合于对极。中亦抱地而转，以合于前冲，若水流包砥而后合也。余尝于日没时，观其影射气中，自西徂东，抱地若环桥，始知其影非直行，能随物曲附，不可以直线取也。……光肥影瘦亦然，光小于物，光亦肥，仍不可以直线取也。”

这段话的中心意思，是说光在传播过程中，若无物阻碍，则沿直线进行；若遇物阻挡，则“随物曲附，不可以直线取也”。光沿曲线传播，这是造成光肥影瘦的主要原因。

方以智等人还运用光的波动学说对一些常见光学现象如小孔成像、海市蜃楼等做了解释。今天看来，这些解释大都牵强，但它反映了方氏学派为坚持其理论体系一贯性所作的努力，也是值得一提的。

方以智提出的气光波动学说，除了其光肥影瘦之论对后世历法推算有所影响之外，就整体而言是被湮没了的。这既与外部因素有关，也与其本身先天不足分不开。这一理论基本上未脱离思辨形态，加之数学手段缺乏，对常见光学现象的解释也很难令人信服。与西方传进来的几何光学相比较，它的不足显而易见，被人们所遗忘是理所当然的。

对声音本性的认识

中国古代对声音波动性的认识，远未达到近代科学的水平。古人对声音本性的探讨，从物理学角度来看，还处于对各类发声现象的描述和思辨的状态。但在这些描述和思辨中，不乏真知灼见，对声音的波动性，也有所触及。

古人探讨声的本质，有一个显著特点，就是与气的学说密切相关。这一方面是由于元气学说作为宇宙万物本原理论，广泛影响并深入到各门具体科学，另一方面也是由于古人在长期的观察实践中，体会到声音的产生、传播的确与气的存在分不开。这两方面的结合，有助于人们向正确认识声音的波动性方面发展。

早在先秦，《庄子》一书就已涉及到自然界空气流动造成的发声现象，《齐物论》篇说：

“夫大块噫气，其名为风。是唯无作，作则万窍怒号。……大木百围之窍穴，似鼻、似口、似耳、似、似圈、似臼、似洼者、似污者、激者、謫者、叱者、吸者、叫者、譟者、突者、咬者，前者唱于，而随者唱喁。泠风则小和，飘风则大和。厉风济，则众窍为虚。”

这一段，就列举了树木上各种各样的窍穴，说当它们受到风的吹击时，就会发出各种各样不同的声音。风有大小不同，声音也随之变化。当烈风止息时（济，作停止讲），由这些窍穴发出的声音也同时停止，万籁俱静，同处于虚静状态。

这段话把自然界一些声现象与空气流动结合了起来，是对这些声现象产生原因的一种解释，但这一解释与声的波动说无涉，因为流动、振动、波动毕竟是完全不同的概念。

《齐物论》篇又提到：“夫言非吹也，言者有言，其所言者特未定也。果有言邪？其未尝有言邪？其以为异于鼗音，亦有辨乎？其无辨乎？”鼗音，注者以为将要破壳而出之鸟音。吹，指上段空气的吹动。人讲话不同于风刮动时发出的声音，自然是因为话带有信息，可以起到交流作用。但语言的本质到底是什么？人讲话与刚破壳而出的小鸟的唧唧声究竟有什么不同？庄子此论，本意是要说明语言作为人们相互交流的工具，彼此间的差别是相对的，但它在无意中却可以启发人们想到：各种声音现象背后，有没有共同的本质存在？从今天的知识出发，我们可以肯定回答：各类声音，无不表现为空气的振动，这就是它们的共同本质。那么古人对此有什么样的认识呢？

东汉王充认识到声音现象是空气的一种特殊运动形式，他称其为“括”，说：

“生人所以言语吁呼者，气括口喉之中，动摇其舌，张歛其口，故能成言。譬犹吹箫笙，箫笙折破，气越不括，手无所弄，则不成音。夫箫笙之管，扰人之口喉也；手弄其孔，犹人之动舌也。”（《论衡·论死篇》）

生人，指活着的人。王充认为人的说话与箫笙之类乐器发音有内在的同一性，都表现为气的“括越”。这里的“括越”，应该理解为气的振动。

王充还谈到了声音的传播，他说：“人坐楼台之上，察地之蚁蝼，尚不见其体，安能闻其声。何则，蝼蚁之体细，不若人形大，声音孔气不能达也。”（《论衡·变虚篇》）这是说，蝼蚁身体小，即使有声音，离人稍远也就不能听到，因为它传播的距离近。王充又说：“鱼长一尺，动于水中，振旁侧之水，不过数尺，大若不过与人同，所振荡者不过百步，而一里之外澹然澄

清，离之远也。今人操行变气，远近宜与鱼等，气应而变，宜与水均。”（同上）一尺长的鱼，在水中游动，振起的水波，也不过向外传播百步远，一里之外，水面依然清澈平静。同样，人的行为（当然也包括说话）使周围气的状态改变，这一变化向外传播的范围，与鱼振荡水引起的水波向外传播情况也是类似的。值得注意的是：王充不仅用水波来比拟声音的向外传播，而且明确指出声音向外传播的方式是“气应而变”，即通过气与气之间的相互作用向外传播出去。这与我们今天对声波向外传播方式的认是相通的。

唐末谭峭对声音特性的认识值得一提，他在评价音乐的作用时说：

“以其和也，召阳气，化融风，生万物也；其不和也，作以气，化厉风，辱万物也。气由声也，声由气也，气动则声发，声发则气振，气振则风行而万物变化也。”（《化书·声气》）

“气由声也”，是说音乐的作用决定于它所发出的声音。“声由气也”，则说声音本身的发出则决定于气。这两句话中的“气”含义不同，前者系指人之德行、操化之气，后者则指自然之气，可以理解为空气。谭峭明确指出，“气动则声发，声发则气振”，他把声音的产生及传播与气的振动联系起来，很有见地。进一步，谭峭还对声音信息分布的弥散性做了描述，他说：

“形气相乖而成声。耳非听声也，而声自投之；谷非应响也，而响自满之。耳，小窍也；谷，大窍也；山泽，小谷也；天地，大谷也。一窍鸣，万窍皆鸣；一谷闻，万谷皆闻。声导气，……气含声，相导相含，虽秋蚊之翩翩、苍蝇之营营，无所不至也。”（《化书·大含》）

形，指有一定形状一定质地的物体，它与空气相互作用而产生声音，“声发则气振”，而气是弥漫充斥于所有空间的，这样它势必以振动这种形式，将声音向四面八方传播开去，造成声音的弥漫分布。王充之论，涉及声音传播范围的有限；谭峭所言，则强调声音分布的弥散性。合二者而观之，可以获得对这一问题比较完整的认识。

明末科学家宋应星对于声音本质也做了内容较为广泛的探讨。和前人一样，他也是在气的学说基础上讨论声音的发生和传播等问题。他认为，气在空间中的弥漫分布，是造成声音现象的必要条件，但不是充分条件。他说：“气本浑沦之物，分寸之间，亦具生声之理，然而不能自为生。”（《论气·气声二》）要形成声音，必须对弥漫分布的气施以剧烈作用方可。这可以是“两气相轧而成声”，如风声；也可以是“人气轧气而成声”，如笙簧之类；还可以是“以形破气而为声”。对于后者，宋应星列举了飞矢、跃鞭、弹弦、裂缙、鼓掌、持物击物等发声现象进行论证，认为所有这些声音现象都是由于物体急速运动冲击空气而产生的。他特别强调说：“凡以形破气而为声也，急则成，缓则否；劲则成，懦则否。”（《论气·气声二》）理由是，“盖浑沦之气，其偶逢逼轧，而旋复静满之位，曾不移刻。故急冲急破，归措无方，而其声方起。”（《论气·气声二》）他这是从空气中之所以能形成声音的内部机理上去进行分析，所用语言尽管与近代科学相距还远，结论也未说到点子上，但他毕竟是从空气内部运动模式出发进行分析，标志着古人对声音本性的探讨进一步物理化了。

宋应星还讨论了声音的传播，他说：

“物之冲气也，如其激水然。气与水，同一易动之物。以石投水，水面迎石之位，一拳而止，而其文浪以次而开，至纵横寻丈而犹未歇。其荡气也亦犹是焉，特微渺而不得闻耳。”（《论气·气声七》）

将声音的向外传播比喻成水波的传播，这当然不够确切，因为声波是纵波，而水波则是由于表面张力和重力联合作用而产生的较复杂的波。但无论如何，这种类比是古人对声音波动性认识的自然表露，在当时历史背景下，也是一种比较好的说明，因而是有其一定历史价值的。

最后，我们考察一下古人对有关声音独立传播现象的记述和认识。清初揭暄在为《物理小识》卷一·“气论”所作的注解中，对这一现象有所涉及，他说：

“气既包虚实而为体，原不碍万物之鼓其中，而依附以为用也。凡诸有形色、有声闻，莫不赅而存之。天地之间，岂有丝毫空隙哉！……如风声、水声、人声、鸟声，诸乐作声，一时异响杂奏，历历伦类，不相蒙掩。即重垣昏夜间，十方一耳，可使达也。”这是说，空气是弥散分布的，声音在空气中的传播，当然也是弥散的，向四面八方，到处都有。但是这些弥散传播的声音，彼此之间都互不影响。在同一地点，由四面八方传来的声音可谓“异响杂奏”，但却“历历伦类，不相蒙掩”。揭暄所说的，实际就是声波的独立传播现象。至于这一现象被冠以原理二字，并从机制上得到阐明，则是人们对声音波动性的认识步入近代科学之后的事情了。

音律学说

中国古代具有悠久的重视音乐的传统。在这一传统的影响下，音律学说得到了充分发展，构成了古代声学的重要组成部分。

古人谈论音乐，常提到五声、八音、十二律，《汉书·律历志》解释说：

“声者，宫、商、角、徵、羽也。……八音：土曰埙，匏曰笙，皮曰鼓，竹曰管，丝曰弦，石曰磬，金曰钟，木曰祝。五声和，八音谐，而乐成。”

显然，所谓八音，是指上古的八类乐器，称为土匏革竹丝石金木，分别指埙、笙、鼓、管箫、琴瑟、磬、钟镛、祝敌。它们和五声配合，才能形成音乐。五声名为宫商角徵羽，有时又称为五音，大致相当于现代音乐简谱上的1(do)2(re)3(mi)5(sol)6(la)。把它们从宫到羽，按照音的高低排列起来，就形成一个五声音阶，宫商角徵羽就是五声音阶上的五个音级：

宫 商 角 徵 羽
1 2 3 5 6

宫是这一音阶的起点。《淮南子·原道训》说：“故音者，宫立而五音形矣，”就是说的这件事情。后来又加上变宫、变徵，称为七声。变宫、变徵一般认为和现代简谱上的7(si)和#4(fis)大致相当，这样就形成一个七声音阶：

宫 商 角 变徵 徵 羽 变宫
1 2 3 #4 5 6 7

从古代律学发展来看，五声早于七声。古七声音阶的完整形式最早出现在西汉《淮南子·天文训》中（《天文训》把变宫叫做和，变徵叫做缪。后世变宫又有叫做闰的），所以古人认为，“自殷以前，但有五声。”（杜佑《通典》）与七声相比，古文献中反映出的五声出现的年代要早得多。《礼记》中说：“昔者，舜作五弦之琴以歌南风。夔始制乐以赏诸侯。”（《礼记》卷十一）五弦，是指宫、商、角、徵、羽，由此，五声出现时间，可以上溯到舜的时代。实际上，古音阶在中国出现的时间，比传说中的尧舜时代还要早。80年代中期，文物考古工作者在河南舞阳贾湖的早期新石器时代遗址中，发现了一些距今8000年前的骨笛，这些骨笛多有7个按孔，通过对其中一只笛各孔的音高及其音阶结构的考察，有学者认为，该笛的音阶结构是以C为宫，带有“二变”——变徵、变宫，并以五声音阶的羽、宫、商、角四正声为核心的传统六声音阶，也有学者认为不能排除是七声齐备的古老的下徵调音阶。无论如何，贾湖骨笛的出土，表明古音阶的初步形成时间，比人们传统上所想象的要早得多，而且，这还不是简单的五声音阶。

贾湖骨笛上按孔的位置表明，孔间的距离是经过周密计算的，有的骨笛尚存有开孔前计算开孔位置的刻纹标志。但当时的人是如何进行计算的，对此不可能有任何文献记载，我们只有通过测定其音阶结构加以逆推。这种方法虽然唯一可行，但不同的人对其音阶结构的不同理解，也导致了不同意见的产生。倒是先秦典籍《管子·地员》篇，详细记载了五声音阶的计算方法：

“凡将起五音，凡首，先主一而三之，四开以合九九，以是生黄钟小素之首以成宫。三分而益之以一，为百有八，为徵。不无有三分而去其乘，适足，以是生商。有三分而复于其所，以是成羽。有三分去其乘，适足，以是成角。”

这就是音律史上著名的三分损益法。它以一条被定为基音的弦的长度为准，将其三等分，然后依次加上一分（益一，即乘以4/3）或减去一分（损一，

即乘以 $2/3$)，以定出其他各音阶相应弦长。根据《管子》的描述，这里的五声音阶是这样推算的：

令黄钟宫音弦长为（一而三之，四开以合九九）：

$$1 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$$

$$\text{则徵音弦长：} 81 \times \frac{4}{3} = 108$$

$$\text{商音弦长：} 108 \times \frac{2}{3} = 72$$

$$\text{羽音弦长：} 72 \times \frac{4}{3} = 96$$

$$\text{角音弦长：} 96 \times \frac{2}{3} = 64$$

将这五个音依弦长大小排列，则为：

徵	羽	宫	商	角
108	96	81	72	64

即依此计算出来的是五声徵调的音阶。其与现代简谱粗略对应关系为：

徵	羽	宫	商	角
5	6	1	2	3

这种音阶以徵作为居于乐曲旋律中位于核心地位的主音，是五声音阶诸多调式中的一种。

三分损益法法则简单，便于掌握和应用，运用它产生的音阶进行演奏，能给人以和谐悦耳的音感，因而这一方法在中国古代音乐实践中得到广泛应用，是音律学史上的一个重要发明。

五声音阶反映的是声调高度的改变值。也就是说，它表现的是相对音高，相邻两音之间的距离固定不变，但绝对音高则随着调子的转移而转移。这样，在演奏时，就必须定出一个音高，以之作为音阶的起点。为此，古人发明了十二律，以之作为十二个高度不同的标准音，用于确定乐音的高低。

十二律发明的具体年代，现在已很难考。《国语·周语》记载了周景王时伶州鸠的一段话，其中提到了十二律的全部名称。显然，十二律产生的时间，肯定要早于这个时期。十二律有其特定的名称和固定的音高，一般认为它和现代音乐的对应关系大致为：

1. 黄钟	2. 大吕	3. 太簇	4. 夹钟	5. 姑洗	6. 中吕
C	#C	D	#D	E	F
7. 蕤宾	8. 林钟	9. 夷则	10. 南吕	11. 无射	12. 应钟
#F	G	#G	A	#A	B

十二律又分为两类，奇数六律为阳，称为六律；偶数六律为阴，称为六吕，合称为律吕。古书上说的六律，通常是包举阴阳各六的十二律说的。

十二律的实现，通常是用律管，最早是用竹管。《吕氏春秋·季夏记·古乐篇》云：“昔黄帝令伶伦作为律，伶伦自大夏之西，乃之阮隃之阴，取竹子溪之谷，以生空窍厚钧者，断两节间，其长三寸九分而吹之，以为黄钟之宫。”这里描述的细节是否真实，可以存疑，但这一记载反映的人们最早是用竹管来定律的这一事实，却是可信的。以管定律，叫管律。后来也有用钟或弦定律的，就叫做钟律、弦律。应用最广泛的，还是管律。因为钟律制作调试繁难，弦律则易于受到空气温度、湿度变化的影响而偏离原来基准，

管律则不存在这些问题。

在具体确定十二律时，古人一般先选定黄钟律，以其管（或弦）长为基准，运用三分损益法计算出其余各律。《吕氏春秋·季夏记·音律篇》对十二律算法有具体记载：

“黄钟生林钟，林钟生太簇，太簇生南吕，南吕生姑洗，姑洗生应钟，应钟生蕤宾，蕤宾生大吕，大吕生夷则，夷则生夹钟，夹钟生无射，无射生仲吕。三分所生，益之一分，以上生；三分所生，去其一分，以下生。黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑洗、仲吕、蕤宾为上，林钟、夷则、南吕、无射、应钟为下。”

所谓“三分所生”，就是从一个被认为基音的弦（或管）的长度出发，将其三等分，“上生”，就是加长三分之一，“下生”，就是减去三分之一。这与计算五声的三分损益法完全相同。具体来说，就是以黄钟为准，将黄钟管长三分减一，即为林钟；林钟管长三分增一，则得太簇；太簇三分减一，得南吕；下面依次是姑洗、应钟、蕤宾、大吕、夷则、夹钟、无射、仲吕。其中除由应钟到蕤宾，由蕤宾到大吕都是三分增一外，其余皆为先三分减一，后三分增一。这样的最后结果，就可以在管（或弦）上，得出比基音约略低或高一倍的音，这也就完成了一个音阶中十二律的计算。

古人重视音律，并非全从音乐本身着眼，他们赋予音律特别的社会意义。例如，他们认为五声和四季、五方、五行相配：

五声：	角	徵	宫	商	羽
四季：	春	夏	季夏	秋	冬
五方：	东	南	中	西	北
五行：	木	火	土	金	水

亦即五声反映了时空不同地点的不同性质。按古人的理解，这些差异甚至还与社会人事相关，当然不可轻视。至于十二律，古人认为它表现了天地之气的推移变化，与一年十二个月相互对应，依照《礼记·月令》，这种对应关系为：

孟春	仲春	季春	孟夏	仲夏	季夏
太簇	夹钟	姑洗	仲吕	蕤宾	林钟
孟秋	仲秋	季秋	孟冬	仲冬	季冬
夷则	南吕	无射	应钟	黄钟	大吕

因为十二律决定于天地阴阳之气的推移变化，而古人认为一年二十四节气的形成也决定于此，这样十二律与古代历法也发生了密切关系，成了古人在制历过程中经常谈论的一个因素。当然，古人把十二律应用于制定历法的实践并不成功，因为二者实际上是没有多少关系的。音律学说产生于古人的音乐实践，也只有在他们的音乐实践中才能得到发展，这是不言而喻的。

十二平均律

中国古代的音律学说，很长时间以三分损益法作为其数学运算工具，这固然有许多优点，在音律史上有不可磨灭的历史地位，但也有不足。其不足主要表现在两个方面：其一，依三分损益律得出的十二个音，音程大小不一，相邻两律间的音分差各不相等，它们与现行十二平均律的相应音分差的偏差平均约为 13 音分，是一种不平均律；其二，当某律比基音高（或低）八度时，与之相应的弦长并不恰好等于基音弦长的一半（或二倍）。我们知道，所谓音升高八度，是指该音与基音的频率比为 2 : 1，而根据物理学知识，频率与弦长成反比，这样，与高八度音相应的弦长也就应该等于基音弦长的一半。但依据三分损益律得出的结果不是这样。例如设基音弦长为 9 尺，依三分损益法，较之高八度的音的弦长为 4.44 尺，而不是 4.50 尺。也就是说，三分损益法定出的高八度的音，实际上并不是准确的高八度。这些缺陷，使得它不适于进行旋宫转调。

所谓旋宫转调，是就五声（或七声）与十二律的搭配而言的。在五声音阶宫、商、角、徵、羽中，古人通常以宫作为音阶的第一级音，但实际上，商、角、徵、羽也可以作为第一级音，充任在乐曲旋律中最重要的居于核心地位的主音角色（七声音阶情况类似）。音阶第一级音的不同，意味着调式的不同。这样，五声音阶就有五种主音不同的调式。我们知道，五声只反映了相对音高，在实际音乐中，它们的音高要用律来确定。十二律为它们提供了十二个绝对音高，这十二个音高任何一个都可以作为五声音阶的第一级音。第一级音一经确定，其余各音用哪几个律，也都随之确定。例如，以黄钟作为宫音的黄钟宫，其各音与律的对应关系为：

十二律名	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑洗	仲吕	蕤宾	林钟	夷则	南吕	无射	应钟	清黄钟
五声音阶	宫		商		角			徵		羽			清宫
七声音阶	宫		商		角		变徵	徵		羽		变宫	清宫

表中清黄钟表示比黄钟高八度的音。依次类推，还可以有清大吕、清太簇……这是黄钟宫。还可以以大吕作为宫音，叫做大吕宫。理论上十二律都可以用来确定宫的音高，即它们可以轮流做宫，这就叫旋宫。旋宫的结果，就有十二种不同音高的宫调式。商角徵羽各调式情况与此类似。这样，十二律与五声组合，可以得到六十种调式（与七声组合，有八十四种调式）。古人把实际音乐中这些不同调式之间的转换就叫做旋宫转调。通俗地讲，旋宫就是调高的改变。

显然依三分损益法得到的十二律，不适宜于旋宫转调。

针对三分损益律的缺陷，历代音律学者做了大量的探索。例如，依据三分损益法，当生到第十二律后，不能回到出发的律上，使十二律不能周而复始。对此，西汉京房采用增加律数的方法加以解决。他依照三分损益法，从黄钟起相生十一次后到中吕，从中吕起继续往下生，一直生到六十律。实际上，这样推到第五十三律时，已经与出发律极相似，再推下去则出现差误了。因为第五十四音的音高，就高于原音四个古代音差，约为一律了。京房为使

律数与历数相结合，一直凑到六十律，他把六十律中的每一律，代表一天至八天，六十律正合一年三百六十六天。这样的牵强附会，使得这种方法必然要走上脱离音乐实际的道路。后来，南朝宋的钱乐之、梁的沈重继之又推到三百六十律，想以律数去附会一年三百六十天，这样的繁琐，使得这种定律在演奏实践和乐器制造方面都遇到了困难，因而没有实用价值。

南北朝时期的何承天则另辟蹊径，他反对京房、钱乐之等人一味增加律数的做法，而是在十二律的内部进行调整。他改革的思路是，首先设定音程每相差八度时，相应的弦长必须呈整数倍关系，如基音的弦长为 9.00 尺，较高八度的音的弦长为 4.50 尺，再高八度的音的弦长为 2.25 尺，等等。在这一设定基础上，对依三分损益法所得到的各律弦长做适当调整。调整的办法是，把达不到弦长（或管长）的差数分为十二份，分别加在相应各律弦长，这就保证了十二律中最后一律能回到出发律上。他这样做的结果，虽然与由频率比所得的准确平均律不同，但差别不大，从听音效果来说，人耳已很难分辨出二者间的差别。后来，五代时期的王朴在何承天思路的基础上又做了进一步的改进，他打破了何承天平均分配弦长差数的办法，从而使得结果更趋准确。

但是，无论是何承天还是王朴，都没有最终解决问题。他们只是在按照律管长度来分配差数上下功夫，而不是按照频率来分配差数，这使得各律间音程紊乱，转调更加困难，不便于实用。但是他们的努力打破了三分损益生的陈规，为后人彻底解决这一问题做了准备。

最终出路只有一条，选择十二平均律。

所谓十二平均律，是严格地将八度音程分成十二个音程相等的半音的音律系统。显然，为了彻底解决旋宫转调问题，要求音律系统至少满足两点，其一，就八度音程而言，必须十分严格、准确；其二，各个半音音程必须相等。否则，对一定的旋律来说，就只能从八度中的某一固定的音开始，这就限制了曲调的范围和发展。三分损益律不能满足这两个要求。何承天、王朴的工作解决了第一个问题，但对后者的尝试则不能认为成功。只有十二平均律才能满足这些要求。所以，在现代音乐实践中，十二平均律得到了广泛应用。

实现十二平均律的关键在于按照等比数列方式分配各律相应的弦长。因为十二平均律要求各个半音音程相等，而音程相等意味着相邻各音频率比值相等，由此就自然构成了呈现等比数列分布的相应各律弦长。显然，问题的症结在于找出这个数列的公比。设主音的频率为 m ，它的八度音的频率为 $2m$ ，在这两个音之间分成十二个等程的半音，令相邻两半音比值为 t ，则

$$2m = mt^{12}$$

$$\text{故 } t = \sqrt[12]{2}$$

t 的倒数就是计算弦长分布时所用等比数列的公比。即如果基音弦长为 1，则

以下各律的相应弦长依次为 $2^{-\frac{1}{12}}1$ ， $2^{-\frac{2}{12}}1$ ，…… $2^{-\frac{11}{12}}1$ ，由此确定的各律就是十二平均律，它完全能够满足音乐实践中的旋宫转调、演奏和声等要求。

在音律学史上，是明代科学家朱载堉最先发明了十二平均律。在他的成书于 1584 年的《律学新说》中，朱载堉首次阐述了十二平均律的理论，随之在其《律吕精义》（成书于 1596 年）中作了进一步的讨论，并在其数学著作《嘉量算经》中，记述了关于十二平均律的详细的数学演算，为后人留下了

珍贵的文化遗产。

朱载堉没有频率、音程这些现代概念，他怎么能够发明十二平均律呢？实际上，这些概念并非发明十二平均律的必要条件，在朱载堉之前，追求乐曲演奏中的旋宫转调，是相当一部分音律学家们梦寐以求之事，他们的追求为朱载堉的工作奠定了基础。例如，朱载堉的父亲朱厚烷就有可能窥到了十二平均率的某些奥秘，他曾对朱载堉说：“仲吕顺生黄钟，返本还元；黄钟逆生仲吕，循环无端。实无往而不返之理。笙琴互证，则知三分损益之法非精义也。”（《律吕精义·序》）这些话表明，他可能已经初步找到了可以达到旋宫的调律法，所需要的就是准确的数学表示方法。这对朱载堉的工作当然是有很大帮助的。就朱载堉而言，他知道两个相隔八度的弦长比为 2，同时这中间的十二个律数又不能变，这样要实现转宫的可能，关键是要用某种数学方法为十二律定位。朱载堉具有很高的数学才能，又具有浓厚的音乐实践基础，他通过大量的数学计算和声学实验，终于发现

十二平均律是以 $\sqrt[12]{2}$ 为公比的等比数列，并且找到了等比数列已知首项和末项，如何求解中项的方法，并将其应用于十二平均律，从而为世人提供了完整的十二平均律的计算方法。

朱载堉发明出十二平均律后，并没有得到多少人的响应。清朝康熙、乾隆皇帝都曾经反对过这一学说。但这一学说传到国外以后，却引起了很大震动，得到热情赞扬。西方学者找到十二平均律，有可能受到朱载堉音律理论影响所致。这一律制在理论和实践两方面被人们普遍接受，是发生在西方，并由之传遍世界。在这整个过程当中，朱载堉走在了最前列。

热的本性

中国古代对热本性的探讨，未能上升到理论和实验相结合的阶段，一直停留在抽象的思辨和猜测上。这些思辨和猜测，大致可分为两类，一类主张热是一种物质，另一类则主张热是某种物质特定形式的运动。

主张热是一种物质的，在五行说中已经有所表现。五行说以为金、木、水、火、土是构成世界万物的五种基本元素。即是说，火也是一种物质。火虽然不能视同于热，但二者是密切相关的，古人对之一般也未做严格区分，所以，五行说隐含了热是物质这种认识的思想萌芽。

成书于南北朝时期的《关尹子》对于热的物质性有更为清晰的认识。该书写道：

“ 曰寒暑温凉之变，如瓦石之类，置之火则热，置之水则寒，呵之即温，吹之即凉，特因外物有去有来，而彼瓦石实无去来。 ”

《关尹子》认为热是一种物质，因为它的“去来”，使得瓦石有“寒暑温凉之变”，这有些类似于西方科学史上的热质说。热质说认为热的本质是一种很细微的粒子，当加热物体时，这种粒子进入被加热物体的内部，从而引起被加热物体温度的升高。热质说能定量解释一些热现象，但它不能解释摩擦生热，所以最终被热动说所取代。中国古代的热是一种物质的认识，尚未发展到西方热质说那样的程度，尽管如此，它作为人们探索热本性的一种成果，与热质说一样，其历史价值是永存的。

热是物质，是一种什么形态的物质？古人答复说：是气。王充说：“寒温之气，系于天地而统于阴阳，人事国政，安能动之？”（《论衡·变动篇》）这是说寒温是一种客观的气，它只受自然因素支配，不受人事影响。又说：“夫近水则寒，近火则温，远之渐微。何则？气之所加，远近有差也。”（《论衡·寒温篇》）这里解释热辐射现象，用的也是冷热是气的观点。《文子·上德》写道：“今有一炭然，掇之烂指；万石俱熏，去之十步而不死：同气者而异积。”大意是说：一块木炭燃烧，用手去拿，会把指头烧烂，而在整座山石都被烧红了的情况下，离开它一定距离，就可以安然无恙。燃烧的木炭和熏红的山石所蕴含的热物质是同一种气，之所以会对人造成不同的作用，是因为它们传播给人的热气多少不同。这也是用气的观点解释热传播现象，涉及到热的传导和辐射两种不同情况。历史上认为热是一种气的论述很多，这里不再引证。

为了更具体地说明冷和热的不同，古人对气的性质做了界定，认为冷和热分别相应于不同的气。例如王充就曾说过：“火与温气同，水与寒气类。”（《论衡·寒温篇》）《周髀算经》卷下说：“故冬至从坎，阳在子，日出巽而入坤，见日光少，故曰寒；夏至从离，阴在午，日出艮而入乾，见日光多，故曰暑。”这是将寒热与太阳光照相联系。三国时姚信则将寒热与北天气和南天气相联系，说：“冬至……日去人远，斗去人近，北天气至，故冰寒也；……夏至……斗去人远，日去人近，南天气至，故蒸热也。”（《听天论》）这些都是将冷热与气的不同种类对应了起来。

上述说法的抽象化就是冷、热的阴阳说，认为阳气热，阴气冷。这是古代相当普遍的说法。例如，《淮南子·天文训》说：“积阳之热气生火，火气之精者为日；积阴之寒气为水，水气之精者为月。”柳宗元说：“寒而暑者，世谓之阴阳。”（《天说》）赵友钦说：“阳气积多而暑”，“阴气积

多而寒”（《革象新书·日至之景》）。历史上类似说法很多，这些说法，强调了冷和热的对立性，忽略了它们本质上的同一性，这是其不足之处。

用运动观念来解释冷热的在中国历史上也大有人在，这就是所谓的“吁炎吹冷”之说。吁，指缓慢向外呼气。《庄子·子宥》有“鸿蒙仰而视云将，曰吁。”《释文》云：“吁，亦作呼。”清郭庆藩案：“《释文》‘吁亦作呼’，呼，吁，古通用字。”人缓慢向外呵气，以手试之，可感觉气触手是热的；而用力向外吹气，则可感觉气触手是凉的。古人大概就是从这一现象出发，提出了气的吁炎吹冷之说。

吁炎吹冷之说，在汉代已经比较常见。《淮南子·天文训》提到“烛龙”这一神化传说动物，汉高诱注曰：“……龙衔烛以照太阳，盖长千里，视为昼，瞑为夜，吹为冬，呼为夏。”这里所反映的，就是一种吁炎吹冷之说。

吁，亦作嘘。汉代张升极力夸大吁炎吹冷之说，曰：

“嘘枯则冬荣，吹生则夏落。”（《反论》）

意为：即使在寒冬，当气以“嘘”的方式作用在枯树上时，枯树也会发芽，万物回春，欣欣向荣；时令虽在盛夏，当气以“吹”的方式运动时，也会造成绿茵枯萎、万木凋零的冬景。张升的描写，将吁炎吹冷说推向了极端。

王充则从量的角度反对这一学说，他说：

“物生统于阳，物死系于阴也，故以口气吹人，人不能寒；吁人，人不能温。使见吹吁之人，涉冬触夏，将有冻暄之患矣。”（《论衡·变动篇》）以口气吹或吁人，能量太小，不足以使人寒或温。但整个自然界的阴阳变化，则是人所不能抗御的。王充的反对从另一个侧面证明，当时确实存在着这样一种学说。

汉代以后，吁炎吹冷说继续存在。例如唐代柳宗元在解答屈原《天问》中“阴阳三合，何本何化”之语时说：

“合焉者三，一以统同。吁炎吹冷，交错而功。”（《天对》）

即气的缓慢流动，造成炎热天气；迅疾流动，造成寒冷天气。炎热和寒冷交替出现，成就了自然界的千变万化。

南宋杨万里也明确主张冷和热是气不同运动方式的表现，他说：

“阴阳之合以三，而元气统之以一。炎者，元气之吁也；冷者，元气之吹也。”（《诚斋集》卷九十五）

也有将“吹气”改为吸气的，例如朱熹即曾说过：

“譬如口中之气，嘘则为温，吸则为寒耳。”（《朱子语类》卷九十五）

这与吁炎吹冷之说本质上是一致的，都认为气的迅疾流动导致寒冷，缓慢流动，造成炎热。

吁炎吹冷说在发展过程中与气的阴阳说协调了起来，认为嘘是阳气的运动，而吸则为阴气的运动。北宋苏轼有一段话，就是用阴阳说来解释嘘温吸冷现象的，他说：

“夫阳动而外，其于人也为嘘，嘘之气温然而为湿；阴动而内，其于人也为噓，噓之气冷然而为燥。”（《苏东坡全集》，中国书店出版，1986年，573页）

中国古代的吁炎吹冷之说，将冷热与气的运动联系起来，在思想方法上亦有其可取之处，因为它意味着，冷和热在本质上是统一的。但是必须指出，吁炎吹冷说与物理学上所说的热动说有质的差异。热动说认为物体的冷热决定于其内部分子运动的剧烈程度，分子的平均运动速率越大，物体表现出来

的温度也就越高。而吁炎吹冷说则认为冷和热决定于气整体运动的快慢。气流动愈快，天气就愈冷，流动得缓慢，则表现为炎热。这也许有一些气象观测经验做依据，但它与热动说则是完全相反的。

中国古代对摩擦生热现象也多有记载，钻木取火就是摩擦生热所致。对此，古人一般将其归结为运动。南唐谭峭说：

“动静相磨，所以化火也。”（《化书·动静》）

宋程颐说：

“动极则阳形也。是故钻木戛竹皆可以得火。夫二物者，未尝有火也，以动而取之故也。击石火出亦然。惟金不可以得火，至阴之精也。然轧磨既极，则亦然热矣，阳未尝无也。”（《程氏粹言》卷二）

程颐这是以运动解释磨擦生热，并将其与阴阳说相结合，认为是磨擦这一运动造成了隐伏在物体中的阳气的外现。明初叶子奇说：“两木相磨则火，至动而后生也。”（《草木子·管窥篇》）所有这些，都将磨擦生热的原因归结为运动，这当然是对的。但从物理学角度来看，运动与生热究竟是如何联系的，古人并未讲清楚。限于其知识结构，他们大概也讲不清楚。

炼丹术

炼丹术是化学史的重要内容，但它的产生和发展却和历史上人们追求长生不老的活动息息相关。

中国古代追求长生不老的活动起源很早。战国时期，燕、齐等地就兴起过神仙说，长生药的概念和传说盛行。到了秦汉，追求长生的活动更是昌盛。千古一帝的秦始皇在实现了统一天下的愿望之后，幻想长生。在他的周围，聚集了众多方士，这些人出于各种目的，积极帮他寻找各种仙药，探求长生之术。在这过程中，也出现了炼制丹药的活动，从而揭开了中国炼丹史的序幕。

汉武帝时期是炼丹术大发展的时期。汉武帝这位卓有作为的一代帝王，在完成了空前的军事伟业之后，也沉溺于长生不老之术，相继召来许多方士，要求他们帮助自己实现长生之梦。其中有一个方士叫李少君，他向汉武帝进言道：

“祠灶则致物，致物则丹砂可化为黄金，黄金成以为饮食器，则益寿。

益寿而海中蓬莱仙者乃可见，见之以封禅则不死。”

意思是说，祭奠炊灶就能招致鬼神，招致鬼神就能使丹砂变黄金，用这种黄金制作的食器进食食物就会增加寿命，这样就能见到海上蓬莱岛上的仙人，见到他们就可以通过祈祷祭祀而实现长生不老。经过他这一番鼓吹，武帝怦然心动：

“于是天子始亲祠灶，遣方士入海求蓬莱安期生之属，而事化丹砂诸药

齐为黄金矣。”（《史记·封禅书》）

武帝按照李少君所说，开始用丹砂等药剂去炼黄金了。

用人工方法制造黄金（当然是伪金），在西汉并不罕见，所以，汉景帝时还曾下过诏令，禁止民间私造伪黄金，违者处斩。尽管如此，李少君的话依然非常重要，因为它明确提出用丹砂冶炼黄金，是实现长生不老的一个重要环节，由此奠定了中国古代炼丹术黄白与仙丹并举的思想基础。在当时，有李少君这种认识的并非仅此一例。史载汉武帝时，淮南王刘安，“招致宾客、方术之士数千人，作为内书二十一篇，外书甚众，又有中篇八卷，言神仙黄白之术，亦二十余万言。”（《汉书·淮南王传》），刘安也是将长生不老与黄白之术联系在一起的。他的炼丹规模比汉武帝还大，而且还有专门著作记载。刘安炼丹著作已失传，但他和李少君等把用丹砂炼制黄金作为长生不老术的一个环节则是确实的。

需要指出，在西方早期化学史上，同样存在炼金术，但那是以致富为目的。而中国的炼金术，则是做为长生术的一种手段而展开着。正如炼丹家葛洪引用其师郑隐的话道：

“至于真人作金，自欲饵服之致神仙，不以致富也。”（《抱朴子·黄

白》）

这表现了中西双方在炼金术上最后企求的不同。

进入东汉，炼丹术进一步发展，炼丹家们不仅尝试用丹砂炼制黄金，而且也进行用丹砂和其他药物炼制丹药的实验，认为用丹砂炼制的仙药服后可使人长生。这段时期，还出现了一批炼丹术著作，现存著名的《周易参同契》，就是其中之一。

东汉末年，道教创立，道教追求修道成仙，长生不老。这与炼丹术的目

的正相契合，双方的结合也就成为必然。嗣后，从事炼丹术者，就多为道士，道家炼丹术基本上就成了道教练丹术。

魏晋南北朝时代，道士们的足迹已遍及各地名山，主要从事炼丹活动。其中出现了像葛洪、陶弘景这样的大炼丹家兼大医药学家。他们不仅躬身于炼丹实践，而且著书立说，从理论上予以总结、阐释，为后世炼丹术的进一步发展奠定了基础。他们的所为，标志着炼丹术在理论和实践上都已经趋向成熟。

炼丹术以追求长生为目的，它也有自己的理论。这一理论首先植基于长生可求、神仙可致这样的信念之上。像汉武帝这样雄才大略、聪明过人的帝王，在李少君病死之后，还认为他是尸解仙去，为此而惋惜不已，可见这种信念是何等根深蒂固。在这样的信念上面，炼丹家们构筑了自己的理论。他们认为，自然界一切都在变化，人的生老病死也是一种变化。自然界的一些变化可以人为实现，例如烧炼丹砂即是如此。对于人体，也可以用类似的方法，借助外物的力量使之永生，这就是服食金丹。葛洪对之有具体论证，他说：

“夫金丹之为物，烧之愈久，变化愈妙。黄金入火，百炼不消，埋之毕天不朽。服此二物，炼人身体，故能令人不老不死。此盖假求于外物以自坚固，有如脂之养火而不可灭。铜青涂脚，入水不腐，此是借铜之劲以扞其肉也。金丹入身中，沾洽荣卫，非但铜青之外傅也。”（《抱朴子·金丹》）

这就是说，仙丹、黄金都是百炼不消、愈变愈妙的。人服食了它们，吸收了它们的精华，就具有了它们的特性，就会像它们一样万世不朽。这叫“假求于外物以自坚固”。这段话，可以说是炼丹术的基本思想，虽然它在实践中行不通，但却是多少年来一直为炼丹家们所笃信的。

有了理论，再加上积累了几百年的炼丹实践，这就为唐、五代时期炼丹术的大发展奠定了基础。唐朝提倡道教，炼丹术也随之进一步昌盛。昌盛的标志，一方面在于炼丹者人数的众多，这中间出现了像孙思邈这样的大医学家兼炼丹家；炼丹术著作也大量涌现；同时，金丹与黄白丹法进一步分化，专门从事黄白术以致富的行为也多了起来。另一方面，服食丹药的人数也大量增加，不像南北朝时，对服食丹药持慎重态度。考察唐代帝王死亡原因，有许多都是服食丹药所致。文臣武将，士绅宦民，因服食金丹而致死的屡见不鲜，教训非常惨重。从技术上，这个时期炼丹术也有了进一步提高，表现在用药品种增加，尤其是植物药料逐渐增加，用药量也进一步精密化，由过去的每味药动辄数斤进化到以两和钱计，炼丹设备也有了进一步的发展。正是由于技术的提高和理论上的鼓吹，才导致了服食者的剧增，从而在客观上为金丹术的衰败做了准备。

到了宋代，情况有所变化。宋人鉴于唐代的教训，由服食金丹转而重视黄白。长生无望，能够招财进宝也好。但在古代知识背景，人工合成金银绝无可能，故此进入元明，黄白术不再受帝王青睐，转入民间，流于骗术。明代小说中对于丹家利用黄白术行骗有生动的描写，确实是当时社会的写照。至于服食丹药追求长生，明代虽曾有过昙花一现的复兴，但随着嘉靖帝服食丹药中毒而死，遗诏归罪方士，大行诛杀，外丹术一蹶不振。延至清朝，金丹、黄白术更趋式微，虽然偶而也还有个别笃信者，但整体来讲，炼丹术已经步入了它的末日。

时至今日，虽然炼丹术已成为往日陈迹，但它在历史上的地位是不容忽

视的。尽管古人追求长生的梦想未曾实现，但炼丹术对于人们增进健康、延年益寿确也起到了它独特的作用，这就是所谓的内丹术。内丹术强调人体内部的调养修炼，由古代的导引、胎息演变而来。历史上的炼丹家多强调内修和外养兼顾。外养以金液、还丹为要，俗称外丹；内修则强调行气导引、胎息守一、调动阴阳等，是谓内丹。炼丹家们把人体作为一个炼丹系统，借用外丹术语、概念，建立了丰富多采的内丹理论。尤其是宋元以后，一些丹家鉴于长生无望，转而专攻内丹，更促进了内丹术的发展。内丹术作为养生功法，流传至今。目前广为普及的各类气功，相当一部分就是内丹术的现代表现。虽然气功界良莠混杂，但气功锻炼可以起到强身健体之用，则是大家都承认的，这其中自然也有炼丹术的贡献。

另外，炼丹术是一种具有实验性的活动。不管炼丹家的本意如何，他们毕竟是用实验的方法探索物质间的转化关系，这样就有可能获得对其实验所用物质性质的正确理解，从而增加人类科学知识的积累。例如炼丹家们常说的“丹砂烧之成水银”，就是对硫化汞加热生成汞和二氧化硫这一化学现象的正确表述。这类例子可以举出很多。

炼丹术有一个非常值得一提的成就，那就是黑火药的发明。黑火药以木炭、硝石、硫磺为制造原料，这三者的混合物能够燃烧爆炸的现象，清清楚楚地记叙在炼丹家的著作之中。火药的发明直接改变了人类社会的发展进程，这一发明的源头是炼丹术。

近代化学产生于西方，它的来源是西方的炼金术。西方炼金术有自己的独立起源，但也受中国炼丹术的影响。中国炼丹术唐代开始外传，经过印度、阿拉伯、拜占庭，最后传到欧洲。西方炼金术士的一些思想明显受到中国炼丹术的影响，他们惯用硫黄和水银，这也与中国炼丹术相似。西方炼金术最终演变为近代化学，这其中也包含着中国炼丹术的贡献。

还丹与金液

还丹与金液是古代丹家们热切追求的两种炼丹制剂，被认为是长生不老术的关键。晋朝葛洪曾这样描述过它们的重要性：

“余考览养性之书，鸠集久视之方，曾所披涉篇卷，以千计矣，莫不皆以还丹金液为大要者焉。然则此二事，盖仙道之极也。服此而不仙，则古来无仙矣。”（《抱朴子·内篇·金丹》）

那么，什么是还丹，什么是金液呢？

“还丹”二字，早在西汉末问世的《神农本草经》中，已经被提到了，该书说：“水银……熔化，还复为丹。”这句话告诉我们，水银是由“丹”（天然丹砂）提炼出来的，所以后面才说“还复为丹”。另外，因为水银通常呈现液体状态，所以这里的“熔化”不能按现代的用法，解释为加热使之呈现液态，而应理解为加热和变化。这样，我们就可以明了古人赋予“还丹”二字的含义了：烧炼丹砂，可以得到水银；加热水银，就又回复为丹砂。因此叫还丹。

必须指出，按《神农本草经》的描述，实际上回复的并不是“丹”。因为烧炼丹砂得到水银，再对水银加热，得到的是红色固态的氧化汞，而不是丹砂。不过由于丹砂是红色的，而氧化汞也是红色的，古人未能将二者区别开来，于是就错误地认为得到了“还丹”。

还丹在炼丹史上地位十分重要，炼丹家们主张服食还丹是获致长生的重要途径。他们认为，自然界中的一切都在不断变化，而以还丹所经历的这种回归初始状态的变化最为奇妙。人服了还丹之后，就能汲取还丹的精华，像还丹那样回归到原来的状态，这自然就实现了长生不老。炼丹家葛洪指出：“凡草木烧之即烬，而丹砂烧之成水银，积变又还成丹砂，其去草木亦远矣，故能令人长生。”（《抱朴子·内篇·金丹》）这就是炼丹家们主张服食还丹的理论依据。

为了增强服食还丹的效果，古人把炼制还丹所经历的那套加热分解、化合以及升华的过程反复进行，这样所得到的最终反应产物称为七转还丹、九转还丹等。炼丹家们希望通过服食这些“还丹”，达到脱胎换骨、飞升成仙的目的。当然，炼丹家们的目的是不可能实现的，但他们为实现自己的目的而付出的艰巨劳动，却使他们积累了大量的化学知识。这是他们炼制还丹的历史价值之所在。

从炼丹家们的言行和实践来看，他们炼制还丹的活动大致可分为三类：硫汞类、唯汞类、铅汞类。

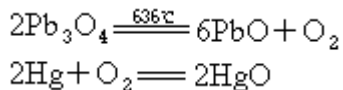
硫汞类的炼制活动最为符合“还丹”定义。这派炼丹家们在炼制“还丹”的过程中使用了硫黄。他们用丹砂加热分解，使之析出汞（水银）来，汞再与硫重新化合，生成黑色硫化汞，黑色硫化汞经过加热升华，就又回复为红色硫化汞，即丹砂。这一过程真正实现了向丹砂的回归。但这种炼制还丹的方法出现时间较晚，最早的记述见于隋代罗浮山方士苏元明（青霞子）所撰《太清石壁记》，唐初孙思邈《太清丹经要诀》有所收录，名为“小还丹法”。在古人炼制“还丹”的实践中，这类规模最小，影响也不大。

“唯汞类”炼丹家修炼还丹，以水银一味为原料。他们从丹砂中炼制出水银，再用水银炼制还丹。孙思邈在《太清丹经要诀》中，就曾按“水银一味独幽玄”的主张，记录了这种方法：

“七返丹砂法：汞一大斤，安瓷瓶中，瓷碗合之。用六一泥固济讫。以文火渐烧，数至六七日，即武火一日，成。如此七转，堪服。其火，每转须减损之，如不减，恐药不住也。”

这种“七返丹砂法”的产物，显然不是丹砂，只能是氧化汞。而且整个反应过程中采取的每一步骤，都有利于氧化汞的生成。比如用“六一泥”密封，可以防止汞或氧化汞的大量损失，同时这种密封方式也不会使容器成为完全密闭的高压釜，而这一反应正需要使空气进入，以便补充氧气使之与汞作用。另外，开始时用文火加热，温度较低，可以避免容器中空气膨胀过急，造成器壁裂缝；最后用武火，则有助于使反应和升华得以完成。还有，在反复炼制过程中，安排有一定的冷却时间，冷却时容器内气压降低，促使空气透过六一泥进入器内，补充氧气，确保最终产物氧化汞的生成。当然，炼丹家们并不知道这样得到的产物是氧化汞，不是丹砂。

在古人炼制还丹的三种方式中，铅汞类起源最早，规模最大，影响也最大，以至于中国炼丹术无论外丹还是内丹皆有“铅汞术”之称。这种炼丹方式只以铅（更多的是铅丹）、汞两味为原料，也不用硫，所以它的生成物不可能是硫化汞（丹砂），只能是氧化铅（PbO）与氧化汞（HgO）的混合物。我们知道，金属铅受热时，在一定温度下，会被氧化成四氧化三铅（Pb₃O₄），古人称其为黄丹、玄黄、黄精、黄芽等。黄丹在 500℃ 以上开始分解，生成氧化铅（PbO）和氧气。在温度达到 636℃ 时，氧的分压力达到一个大气压。如果黄丹与汞共炼，就会将汞氧化，反应过程为：



生成的氧化汞升华在容器顶部。这派炼丹家们认为，这就是他们所要的还丹。这种还丹炼制法，在西汉末东汉初问世的《黄帝九鼎神丹经》中，已经有记载了。后世的记述更多，可谓源远流长。

铅汞类在流传过程中，由于炼丹家们对铅汞的组分没有规定严格的化合量关系，因而导致了許多流派的产生。各派炼制方法也不完全一致，但无论如何，在不使用硫黄的情况下，他们得不到原来意义的“还丹”（即丹砂），这是可以肯定的。

炼丹家们认为，服食还丹，可以实现长生，但他们又觉得还丹炼制复杂，因而又推崇另一种丹药——金液。葛洪说：“九丹诚为仙药之上法，然合作之所用，杂药甚多，……又当起火，昼夜数十日伺候火力，不可令失其适，勤苦至难，故不及合金液之易也。金液唯金为难得耳。”（《抱朴子·内篇·金丹》）

服食金液可以长生的思想，源于古人对黄金性能的重视。《周易参同契》说：“金性不败朽，故为万物宝。”《抱朴子·内篇·金丹》说：“黄金入火，百炼不消；埋之，毕天不朽。”正是由于黄金有如此稳定的性能，启发炼丹家们想到，如果服食黄金，吸取它的精华，人身岂不也可以万世长存了吗？但是，黄金是固体，无法直接服食消化，需要将其化为液体，这就导致了人们对“金液”的追求。

那么，如何制取“金液”呢？葛洪在《金丹》篇中介绍了一种方法：

“金液，太乙所服而仙者也。不减九丹矣。合之用古秤黄金一斤，并用元明龙膏、太乙旬首中石、冰石、紫游女、玄水液、金化石、丹砂，封之成水。”这就是“金液”。葛洪对之非常器重，认为“若服半两，则长生不死。万害

百毒，不能伤之。可以畜妻子、居官秩，任意所欲，无所禁也。”如果厌倦了人世生活，想白日飞升，“乃可斋戒，更服一两，便飞仙矣。”（《抱朴子·内篇·金丹》）

服食“金液”可以长生，这当然是无稽之谈，但古人由此摸索出一套溶解黄金的方法，却是化学史上的重要成就。例如这里提到的“元明龙膏”，又名“玄明龙膏”，这一名称可以代表水银，也可以代表醋和复盆子。未成熟的复盆子果实中含有氢氰酸，与其他药物中提供的钾、钠离子化合可生成碱金属氰化物，在醋浸液中能够把黄金慢慢溶化。由此，葛洪的记载是有道理的。

“金液”方可以说是古代炼丹术水法反应的一种。古代的炼丹术著作，一般多为火法与水法并用，而纯粹的水法炼丹则见于《三十六水法》和《轩辕黄帝水经药法》两书。因为这两种书也是以炼制长生药为目的，因此它们的记载，也可以说是广义的“金液”方。但无论哪种方法，都不可能使人长生，这是可以肯定的。

度量衡起源学说

在我国古代，度量衡是指专门用于测量长度、容量、重量的单位和器具，有时也指这种测量本身。关于度量衡起源问题，学术界有不同的观点。有的学者认为，度量衡的起源和人类交换行为的发展分不开。人类最早的交换，是简单的物物交换，没有度量衡。当交换发展到一定程度，为了做到交易的公平，人们产生了对度量衡的需要，这样，度量衡才得以产生并逐渐发展起来。

也有学者不同意这种观点，认为早期的物物交换形式，在历史上延续了很长时间，这种形式的交换，对度量衡的需求并不迫切，而在此之前的夏、商朝代，都已经建立了自己的赋税制度，赋税制度的实施，离不开度量衡，因此，度量衡是赋税制度的必然产物。

两种观点都有其一定道理。当早期的物物交换发展成为商品活动时，度量衡就会成为其必需。第一种观点着眼于交换行为对度量衡起源的促成作用，就此而言是成立的。但相比之下，第二种观点的思考更为深入一些，赋税制度对于度量衡的形成和发展，确实具有极大的重要性。因为交换一般是个人与个人之间进行，而赋税则是直接面对公众的。实际上，度量衡起源因素可归结为一句话：社会化的测量需求。商品交换有这种需求，赋税制度尤其如此，而一些大型集体生产活动如建造村落、治水等，同样是导致产生度量衡制度的契机。在古籍的一些记载中，字里行间也透露出这种认识。例如《史记·夏本纪》中提到禹巡九州，通九道时“左准绳，有规矩”，这实际反映的是一种测量行为。这种测量行为的前提条件是必须建立长度单位和统一的长度标准，否则就无法进行。而这就是度量衡的起源。《周髀算经》卷上在提及勾股术时说：“故禹之所以治天下者，此数之所由生也。”这就是说，在禹治理洪水的实践中实现了测量的定量化。既然测量结果可以用数表示出来，这意味着大禹治水时必然建立了统一的长度标准。《夏本纪》中说禹“声为律，身为度，称以生”，认为禹以自己的身长和体重定出长度和重量标准。这里所反映的，无疑是人们最初建立度量衡制度的努力，表现了度量衡起源时的一些情况。

就古人的论述而言，真正可以称得上是比较完整的度量衡起源学说的，就是乐律累黍说。这一学说的起源时间还是比较早的，《尚书·舜典》中即曾提到“协时月正日，同律度量衡”，嗣后的文献中也常可见到同律度量衡之说，但其具体意思，则不甚了了。到了西汉末年，律历学家刘歆，为了迎合王莽在政治上的需要，征集一批学者，系统讨论了这一问题。《汉书·律历志》收录了刘歆根据讨论结果所作的“典领条奏”，从而成为我国古代度量衡最系统、最权威的著作。

根据《汉书》的记载，刘歆“典领条奏”的有关内容为：

“度者，分、寸、尺、丈、引也。所以度长短也。本起黄钟之长，以子谷秬黍中者，一黍之广，度之九十分，黄钟之长。一为一分，十分为寸，十寸为尺，十尺为丈，十丈为引，而五度审矣。……量者，龠、合、升、斗、斛也，所以量多少也。本起于黄钟之龠，用度数审其容，以子谷秬黍中者千有二百实其龠，以井水准其概。合龠为合，十合为升，十升为斗，十斗为斛，而五量嘉矣。……权者，铢、两、斤、钧、石也，所以称物平施，知轻重也。本起于黄钟之重。一龠容千二百黍，重十二铢，两之为两，二十四铢为两，十六两为斤，

三十斤为钧，四钧为石。”

《汉书·律历志》详述了度量衡各单位的由来，认为所有这些单位均以黄钟为本，通过秬黍的参验校正得以实现，此即度量衡起源的乐律累黍说。

乐律累黍说的提出，反映了古人为建立统一的度量衡基准所做的努力。我们知道，选择基准是度量衡发展的关键之所在。从现代计量科学来看，计量基准应该具备以下几个特点：具有很高的稳定性，不能因人、因地、因时而异；具有可复现性，能够按照一定的技术要求在不同的时间、地点复现；具有很高的精度；同时，要求测量的基本量尽可能地少。换言之，计量基准应该尽可能的统一。古代度量衡由于受到科学技术水平的限制，在建立基准时难以达到这些要求，但古人确实是为实现这些标准做了他们的努力。

在早期的测量实践中，古人是用自己身体上的某些部位作为测量工具的。《孔子家语·王言解》载云：“夫布指知寸，布手知尺，舒肘知寻，斯不远之则也。”这里记载的就是这种情况。以身体部位作基准，尽管测量时取用近便，是“不远之则”，但这些基准因人而异，不具备通用性，因而也就没有生命力。另一方面，大禹治水时，“身为度，称以出”，已经考虑到测量基准的唯一性问题，依之可以定出标准器来，当然具备了通用性。但这样的标准器只是实物样板，不便于复现，一旦丢失或损坏，将不复存在。因此，这种方法必须改进。

在实践中，古人愈来愈考虑到应该选择自然物作为度量衡基准。《孙子算经》卷上说：“度之所起，起于忽。……蚕吐丝为忽，十忽为秒，十秒为毫，十毫为厘，十厘为分。”《淮南子·天文训》说：“十二粟而当一寸。”《易纬·通卦验》说：“十马尾为一分”等等。这些说法，虽然和现在已知的当时长度单位不合，但它们无疑表现了古人试图选择自然物为度量衡基准的思想。

另外，在建立度量衡基准的实践中，古人还进行了把度、量、衡三者基准相统一的尝试。战国时期制造的标准量器“栗氏量”，就是这种尝试的结果。《考工记·栗氏》记叙了栗氏量的特点：

“栗氏为量，……深尺，内方尺而圆其外，其实一龠（f，釜）；其臀一寸，其实一豆；其耳三寸，其实一升；重一钧；其声中黄钟之宫……其铭曰：时文思索，允臻其极，嘉量既成，以观四国，永启厥后，兹器维则。”

栗氏量的形制如下图所示。它“以度审容”，将“度”与“量”联系在一起，这很有道理，因为这样便于复现标准容量，推广统一的量值。同时，栗氏量还对重量有要求，要求它“重一钧”，这样便可以从一件器物上得到度量衡三个单位的量值，实现了三者在一个形器上的统一。古人找到了这一关系后，非常喜悦，希望能将这一关系传承万代，器上的铭文，充分表现了他们的这一心情。

栗氏量在制造中要求“声中黄钟之宫”。黄钟即为十二律中的黄钟律。这里已经将度量衡与黄钟律相联系，但是语焉不详。乐律累黍说的提出，明确了这一联系，并且综合了古人寻求自然物作为度量衡基准的思想，从而把中国古代度量衡起源学说向前推进了一大步。

所谓乐律累黍说，关键在于以黄钟律管的长度作为长度基准，以黍子作为中介物，通过黍子的参验校正，建立度、量、衡三者之间的内在联系。古人这一做法，有一定的科学道理。从理论上来说，在温度和口径不变的情况

下，一定长度的笛管所发出的音律也是一定的。由此，在选定音律情况下，笛管的尺寸也就确定了，因此它可以作为测量的基准。古人认识到这一点以后，就用累黍的方法将律管的长度、管径记录和固定下来，并由此进行度、量、衡三个量的相互校正。曾有学者对乐律累黍说做过反复验证，证实黄钟与黍和尺三者是互为参证的，但黄钟与黍和量、衡之间的参证关系却未被证实。这表明古人提出乐律累黍说，有其一定的实验基础，同时也有一定的设想成分在内。尽管如此，这一学说本身所包含的思想，还是十分先进的。

乐律累黍说在技术上有许多要求，实现起来有相当的难度，因此，在古人的实践过程中曾引发过许多争论，也未能保证历代度量衡单位量值的稳定不变。但无论如何，这一理论毕竟引导了中国近两千年来度量衡的发展，而且其本身又包含了甚为先进的科学思想，因而是应该肯定的。

候气学说

候气是中国古代音律与历法在发展过程中诞生的一种学说，它以十二音律与二十四节气中的十二中气为对象，试图通过实验的方法，将二者的联系固定下来。候气学说的具体内容，最早记载于《后汉书·律历志》中：

“候气之法，为室三重，户闭，涂衅必周，密布缦。室中以木为案，每律各一，内庳外高。从其方位，加律其上，以葭莩灰抑其内端，案历而候之。气至者灰动。其为气所动者，其灰散；人及风所动者，其灰聚。”

根据这段描写，所谓候气，就是在一密闭性能良好，温度、湿度变化不大的屋子里，按一定方位，排列十二个桌子，桌面做成内卑外高的倾斜状态，将十二律管管尾填塞上芦苇衣灰，然后，依次摆放在相应桌子上，按照历法观测管内芦苇灰的状态。根据古人的说法，十二律与一年十二个月相对应，这样当各月所属中气到来时，与之相应的律管内的芦苇衣灰就会飞散，这种飞散与人的走动形成的风所造成的吹散，在状态上可以区分开来。从而就可以将十二律确定下来。

候气的目的是为了确定十二律提供一个客观指标。古人认为音律对于社会具有极大的重要性，它不但是度量衡的基础，而且对于社会教化、国泰民安都具有不可忽视的作用，而要音律发挥作用，它本身必须十分准确，这就涉及到如何准确判定十二律的问题。为此，古人动了许多脑筋，首先是发明了准，《后汉书·律历志》记道：

“截管为律，吹以考声，列以物气，道之本也。术家以其声微而体难知，其分数不明，故作准以代之。”

准是一种弦乐器，把它的中弦调整得与黄钟律一致时，就可以用它代替管律作为标准。但弦律调整起来需要相当的技巧，流传不易。所以自从西汉京房发明准以后，到了东汉元和年间，就已经“官无晓六十律以准调音者”，“自此律家莫能为准施弦。”（《后汉书·律历志》）再往后，“史官能辨清浊者遂绝，其可以相传者，唯大摧常数及候气而已。”（同上）

所谓“大摧常数”，即用数字记下律管尺寸，作为再现的标准。东汉蔡邕对这种方法有过分析，他在其《月令章句》中说：

“古之为钟律者，以耳齐其声，后不能则假数以正其度，度数正则音亦正矣。……以度量者，可以文载口传，与众共知，然不如耳决之明也。”

即是说，虽然音律标准的最终判定，要依靠人耳的听觉，但这种方法主观性很强，而通过规定律管的长度和容积，则可以为确定音律提供一个客观标准。

蔡邕的话虽然有一定道理，但他忽略了一点：在同律度量衡中，度量衡基准是由黄钟律管来确定的，而现在又要用度量来正律管，这显然是一种循环校正，从理论上说是不允许的。所以，《晋书·律历志》在引述该段文字时，就把它改成：“史官能辨清浊者遂绝，其可以相传者，唯候气而已。”删去了“大摧常数”。

对于候气学说的理论基础，《后汉书·律历志》有所陈述：

“夫五音生于阴阳，分为十二律，转生六十，皆所以纪斗气、效物类也。

天效以景，地效以响，即律也。阴阳和则景至，律气应则灰除。”

这是说，音律生于阴阳，与天地相通，可以用来标志节气的变化，表现万物的生杀。自然界节气的变化，在天文上是通过太阳南北位置的不同表示出来，在地上则由律管反映出来。只要节气一到，该气相对应的律管中的灰就会自

动飞出。

候气学说的思想起源较早。在《汉书·律历志》中提到“备数、和声、审度、嘉量、权衡”时说，“参五以变，错综其数，稽之于古今，效之于气物，和之于心耳，考之于经传，咸得其实，靡不协同。”这里“效之于气物”一语，已经昭示着候气学说的产生。而在刘向的《说苑·修文》中则提到：“天地之气合以生风，日至则日行其风，以生十二律，……天地之风气正，十二律至矣。”并详细列举了十二律与相应季节的生成关系。更早些的《淮南子·天文训》，则将二十四节气与十二律相联系。《后汉书·律历志》记述的候气方法，就是古人在上述思想基础上，所发展出来的检验这种联系的具体方法。

从古人的知识背景来看，用候气方法判定音律，是确实可行的。古人特别重视在冬至夏至期间候气，因为二至前后有很多特征现象，通过这些特征现象可以将二至点准确判定下来，从而就可以利用候气判定音律，这就避免了循环验证。《后汉书·律历志》记载道：

“天子常以日冬至，御前殿，合八能之士，陈八音，听乐均，度晷景，候钟律，权土灰，放阴阳。冬至阳气应，则乐均清，景长极，黄钟通，土灰轻而衡仰；夏至阴气应，则乐均浊，景短极，蕤宾通，土灰重而衡低。进退于先后五日之中，八能各以候状闻。太史封上。效则和，否则占。”

这里记载的就是判定二至点的方法。里面提到了二至来临时相应的一些特异现象，例如冬至时音乐发出高八度音调，晷影最长，黄钟律管的灰飞散出来，炭变轻等。这些特异现象并非全是古人的臆想，例如冬至时“景长极”就有坚实的观测依据，中国历史上对冬至点的确定，就是依据这一条进行的。当然，这里面包含了古人的假想在内，故此用以判定二至点，也会出现各人主张不一的情况，这时就需要占卜，看是否要发生什么灾变了。根据这样的分析，用候气法判定音律，在逻辑上就成立了。只要这个方法的前提条件——十二音律与二十四节气有严格的内在联系——成立，而二十四节气又可以通过别的途径加以确定，就可以利用候气将十二律确定下来。而在中国，古人对于候气学说的前提条件是坚信不疑的。例如，杰出的科学家祖冲之在谈论历法改革时即曾提到：

“若夫测以定形，据以实效：悬象著明，尺表之验可推；动气幽微，寸管之候不忒。”（《宋书·律历志下》）

这里祖冲之就把候气看得与立竿测影同等重要。祖冲之精通历法，又富有学术变革精神，他尚且如此，更何况别人。这种信念是导致候气学说在中国历史上长达一千多年大流行的主要原因。在流行过程中，古人一直在孜孜不倦地讨论、实践这一学说，并不断予以改正，以求得到肯定的结果。例如，在《后汉书·律历志》中，律管是摆放在“内卑外高”的桌案上的，而到了《晋书·律历志》中，则已经有了这样的记载：

“或云，以律著室中，随十二辰埋之，上与地平，以竹葶灰实律中，以罗縠覆律吕，气至吹灰动縠。”

这里已经将律管埋到了地下，体现了古人在实践过程中对这一方法的发展。

在围绕候气学说的讨论中，这一学说的理论本身也得到了发展，例如宋代大科学家沈括就曾用自己的观点对传统的“气至则灰除”现象做了解释，他说：

“冬至阳气距地面九寸而止，唯黄钟一琯达之，故黄钟为之应。正月阳

气距地面八寸而止，自太簇以上皆达，黄钟大吕已先虚，故唯太簇一律飞灰。”

（《梦溪笔谈》）

但是，不管是对这一方法本身进行增补改良，还是从理论上加以探讨，都未能确保古人在候气实践中摆脱屡遭挫败的困境，这种状态终于引起了人们对这一方法的怀疑。明代的律历学者从理论和实践两方面都对候气学说进行了批判。到了清代，候气学说被中法派作为对抗西方天文学的武器之一，在测候当中一败涂地，更引起了人们的不信任。康熙、乾隆等帝王相继表示候气不可信，这样，流传了一千多年的候气学说才慢慢消声匿迹，最后趋于终结。

候气是中国历史上一种重要的文化现象，它充分表现了古人有关律、历及度量衡问题的认识和思想，具有很高的史学研究价值。至于候气学说所描述的现象是否存在，则还需要通过严格而又科学的模拟实验来加以判决。

对测量的认识

测量是物理学的基础，测量史是科技史研究的重要组成部分。研究古人对测量的基本认识，是测量史不可或缺的内容。

所谓测量，就是通过各种手段，把被测物体与给定的测量单位进行比较，以求得其间的数量关系，借以把握被测物体某种性质。古人对于测量没有一个通用的抽象定义，但对于测量目的是要从数量上把握被测物体某种性质这一点，则是有所认识的。《荀子·致士篇》说：

“程者，物之准也；……程以立数。”

唐杨倞注曰：“程者，度量之总名也；……言有程则可以立一二之数。”由此，程，指用于测量的基准器，其用途在于“立数”，即把物体相应性质的量通过比较用数表示出来。对于测量和物体相应性质的量及数之间的关系，《后汉书·律历志》有十分清晰的论述：

“夫一、十、百、千、万，所用同也；律、度、量、衡、历，其别用也。

故体有长短，检以度；物有多少，受以量；量有轻重，平以权衡；声有清浊，

协以律吕；三光运行，纪以历数。然后幽隐之情，精微之变，可得而综也。”

即是说，测量中要用到数，这些数之间的关系到处都一样，但对于不同的测量，它们所代表的含义不同。物体性质不同，对之所采用的测量方式也不同，但测量结果要用数表示出来，这一点却是相同的。这里实际讲的是测量的定量化问题。《后汉书》认为，只有实现了这种定量化要求，事物的“幽隐之情，精微之变”，才可“得而综也”。这段话清楚地表明了中国古人的定量观念。

在历史上，类似《后汉书》这种论述的文献很多，其中有些在时间上还更早。例如《汉书·律历志》中所记述的刘歆的“典领条奏”，就充分表达了这一思想。对此，这里就不再赘述了。

测量的目的既然是要建立被测物与测量单位之间的数量关系，那么对于事物不能定量表示的那些性质，也就不能进行测量。《孙子·用间》提到：“先知者，不可取于鬼神，不可象于事，不可验于度。”唐李荃注曰：“夫长短阔狭，远近小大，即可验之于度数。人之情伪，度不能知也。”这里所涉及的，就是对那些无法量化的性质，不能进行测量。

即使对事物可被测量的性质而言，也还存在着一个测量范围的问题。《淮南子·泰族训》说：

“凡可度者，小也；可数者，少也；至大，非度之所能及也，至众，非

数之所能领也。”意为：测量只能对有限量进行，无限的东西，不能用数去表达，（至众，非数之所能领也），也就不能去进行测量（至大，非度之所能及也）。这里提出的无穷不能用具体数表示出来的思想，也标志着古人对无穷大性质认识的深化。

至大无外，不可量度；至小无内，亦不可测知。《淮南子·本经训》说：“夫至大，天地弗能含也；至微，神明弗能领也。”天地弗能含，神明弗能领，都是无从把握的。由此，至大、至微之物，都是不可被测知的。

测量的实质是一种将被测物与测量标准进行比较的过程。这一比较本身当然也有一定的规则要求。《墨经》曾对这种比较作过讨论。《经下》第六条记载了墨家的认识：

《经》：“异类不毗，说在量。”

《说》：“异：木与夜孰长？智与粟孰多？爵、亲、行、贾，四者孰贵？
麋与霍孰霍？与瑟孰瑟？”

吡，同比。《墨经》的意思是说，对于测量，不是同类的东西不能相互比较。《经说》举例对墨经加以解释。在其所举的例子中，有可以量化但性质不同的事物，也有不能量化而且性质也不同的事物，墨家认为它们相互之间不能进行比较。测量是一种比较，比较必须在同类物之间进行。墨家能明确指出这一点，也是很可贵的。

除了对测量的性质加以探讨以外，古人还对如何保证测量的客观性和准确性，从认识和实践两方面都做了孜孜不倦的探索。这首先表现在对度量衡基准的选择上。选择的结果，产生了同律度量衡的理论，即所谓的乐律累黍说。对此，我们在“度量衡起源学说”中有所论述，这里不再多说。

另一方面，古人非常重视仪器在测量中的作用，认为那是确保使测量做到准确而又客观的必要条件。《商君书·修权》说：

“先王悬权衡，立尺寸，而至今法之，其分明也。夫释权衡而断轻重，废尺寸而意长短，虽察，商贾不用，为其不必也。”

利用权衡尺寸进行测量，结果的轻重长短一目了然。不用权衡而去判断轻重，废除尺寸而去臆测长短，虽然也可以做到比较清楚，但人们并不采用，因为它得到的不是必然结果，不能准确地反映被测物体的量值。

对于仪器在测量中的作用，北宋苏轼从理论上作过阐释，他说：

“人之所信者，手足耳目也。目识多寡，手知重轻，然人未有以手量而目计者，必付之于度量与权衡，岂不自信而信物？盖以为无意无我，然后得万物之情。”（《苏东坡全集》卷二十）

人有认识事物的能力，可以凭借感官感知事物。但要进行测量，必须借助仪器，不能凭感官去臆断。因为人凭感觉去臆断事物的量，易受主观因素影响，不能获得对事物的客观认识，而借助于仪器，可以做到“无意无我”，摒弃主观影响，获得正确认识。

使用仪器进行测量，亦要选择合适的器具。《慎子》说：

“厝钧石，使禹察锱铢之重，则不识也。悬于权衡，则鼈发之不可差，则不待禹之智，中人之知莫不足以识之矣。”

厝音 cuò，放置之意。以钧石来“察锱铢之重”，虽圣如大禹，亦将茫然不识，测具不当之故也。而用天平称量，则一般人即可测知结果。这里所涉及的，就是要选择合适的测具。

对于测量的社会作用，古人一般从度量衡角度出发给予了高度重视。《管子·七法》说：“尺寸也、绳墨也、规矩也、衡石也、斗斛也、角量也谓之法。”认为需要把它们作为立国要略之一加以考虑。《淮南子·本经训》说：“谨于权衡准绳，审乎轻重，足以治其境内。”这些，都反映了同样的认识。出于这种认识，古人把度量衡的颁定视为权力的象征，并制定了严格的管理制度，从行政、法律和技术几方面进行管理，力争维护度量衡制度的连续性和稳定性。古籍中关于这方面的记载比比皆是，这里不再赘述。

对于测量在促进科技进步的作用方面，古人虽然没有专门的论述，但在实践中也多有涉及，并有所体会。例如，始于西汉年间的浑盖之争，其在中国历史上延续时间之长，争论程度之热烈，都是罕见的。如何判断双方孰是孰非，大家都认为应当通过实地观测验证。梁朝祖暅赞成浑天说，他的理由是：

“仰观辰极，傍瞩四维，睹日月之升降，察五星之见伏，校之以仪象，覆之以晷漏，则浑天之理，信而有征。”（《隋书·天文志》）
可见，他就是通过观测立论的。祖暅还直接斥责那些在科学问题上夸夸其谈、不重实际测验的做法，说：

“先儒弗斯取验，虚繁翰墨，夷途顿辔，雄辞析辩，不亦迂哉！”（同上）

隋代刘焯怀疑地隔千里影差一寸的传统，他也是提出要通过实地测量进行验证。他的设想到了唐代，被一行和尚组织实施了。再如，中国古代判定历法优劣，历来都主张以观测结果为准。这些，都反映了一种重视测量、重视验证的观念。这一观念在古人的科学活动中占有一定地位，促进了古代科学的发展。

测长原理

长度测量是一切测量的基础，不论古今皆然。对于长度测量，古人一般是用选定的标准和被测物直接加以比较而实现的，这就是所谓的直接测量。

直接测量是长度测量的基本形式，其过程直观结果具有说服力，因而深得古人信服。《汉书·律历志》记载的西汉人对长度单位分、寸、尺、丈、引的解说，就充分表明了这一点：

“分者，自三微而成著，可分别也。寸者，忖也。尺者，夔也。丈者，张也。引者，信也。夫度者，别于分，忖于寸，夔于尺，张于丈，信于引。引者，信天下也。”

这里引述的五个长度单位，都是从直接比较的角度着眼的，每一个单位名称都隐喻着一种测量动作。其中信读为伸，与伸义同。显然，在古人心目中，长度测量的基本形式就是直接比较，所以他们才会这样去解说这些长度单位。

有时，古人为了表明自己所提出的数字是正确的，往往宣称那是实测的结果。例如，《淮南子·地形训》在探讨大地尺寸时，就有这样一段话：

“禹乃使太章步自东极，至于西极，二亿三万三千五百里七十五步；使竖亥步自北极，至于南极，二亿三万三千五百里七十五步。”

太章、竖亥，都是传说中大禹时代的人物，说他们善于步行。《淮南子》这里提出的数据，绝非实测之结果，然而古人言之旦旦，强调说这是太章、竖亥步量所得。这种现象，充分表明了他们对直接测量方式的崇信。

对于远距离的粗略估量，古人有利用速度、时间、路程三者之关系加以测算的。方法是根据经验确定所行速度，再以速度乘以所行时间，即得所要估测之距离。早在《管子·乘马》中，就有这种测法的反映：

“天下乘马服牛，而任之轻重有制，有一宿之行，（原注：一宿有定准，则百宿可知也。）道之远近有数矣。是知诸侯之地、千乘之国者，所以知地之小大也。”

所谓“任之轻重有制”，是说要使马或牛的负重量一定。这可以保证速度的实际值与经验值相接近，避免测算结果误差过大。这种算法的出现，标志着中国人已经掌握了速度概念。在别的一些古籍中，也多处可见这类算法，表明这是古代常见的粗略测算距离的方法。

利用速度概念求解距离，其前提条件是测量者（或他人）须曾亲历待测之处，否则不能测知所用时间。此法实质是用对时间的测量取代了对长度的实测，通过简单计算转化为对长度的测量。因为对较大单位的时间的粗略测量易于实现（例如，以日为单位），因此这种方法的长处在于它的简便性。但在测量者无法亲历的情况下，这种方法就失效了。直接比较当然更不能使用，必须另觅蹊径。

古人的解决方法是借助于数学工具来扩展测量范围。他们所运用的数学工具主要是勾股定理和相似三角形对应边成比例的性质。《周髀算经》开卷伊始就借周公之口向商高提问道：“夫天不可阶而升，地不可将尺寸而度，请问数从安出？”商高回答说：“折矩以为，勾广三，股修四，径隅五，……此数之所生也。”这里提到了矩。从史料及出土文物考证，矩是我国古代一种用途很广的制图和测量工具，很像现在的“拐尺”。矩边上有刻度，可直接用以画直线、直角、测量长度。商高提到“折矩以为”，是指用矩构成直

角三角形,利用勾、股、弦三者之间的关系确定被测物之数。文中给出的“三”、“四”、“五”,是勾股定理特例,但后文中有“若求邪至日者,以日下为勾,日高为股,勾股各自乘,并而开方除之,得邪至日。”显示《周髀》对于勾股定理的一般形式,也是掌握了。

接下去,《周髀算经》列举了利用矩进行测量的基本方式:

“周公曰:大哉言数,请问用矩之道?商高曰:平矩以正绳,偃矩以望高,覆矩以测深,卧矩以知远,环矩以为圆,合矩以为方。……智出于勾,勾出于矩,夫矩之于数,其裁制万物唯所为耳。周公曰:善哉。”这里列举了平、偃、覆、卧、环、合六种用矩方法,其中第一种用于准正,后两种用于构形。我们测重于介绍中间三种。

先说偃矩。偃者,仰卧也,此处指股在下、勾直立以测高之法,如图 1 所示。ED 为待测物之高,则

$$ED = \frac{CB \times DA}{BA}$$

再说覆矩。覆者,倒也,将矩倒立以测深,如图 2 所示。DE 为待测之深,则

$$DE = \frac{BC \times DC}{BA}$$

还有卧矩。卧者,平放也,是指测水平方向宽远之法,如图 3 所示。DE 为待测之物(例如河宽),则

$$DE = \frac{AB \times CD}{CB}$$

古人通过探索直角三角形性质,摸索出了一些对不可直接测量物的测量办法,因而喜出望外,感叹说:“智出于勾,勾出于矩,夫矩之于数,其裁制万物唯所为耳。”喜悦自豪之情,洋溢言表。

但是,偃矩、覆矩、卧矩都是用一次矩或表的简单测量方法,这种方法的使用有一定局限性,例如在图 1 中,如果不知道 DA 之长,则待测物之高 ED 也是不可得知的。为此,古人发明了利用两次矩或表分别测量,并根据测得数据的“差”进行计算的方法。这种方法在古代叫做“重差术”。魏晋时刘徽在为其《九章算术注》所作的序中总结说:

“凡望极高、测绝深而兼知其远者必用重差。勾股则必以重差为率,故曰重差也。”

即是说,“在测量中,凡是测望不知距离的目的物之高、深或远时,必然使用重差术。”(白尚恕:《九章算术注释》,科学出版社,1983 年版,第 7 页)

接着,刘徽介绍了利用重差术测量日之高远的方法:

“立两表于洛阳之城,今高八尺。南北各尽平地,同日度其正中之景。以景差为法,表高乘表间为实,实如法而一,所得加表高,则日去地也。以南表之景乘表间为实,实如法而一,即为从南表至南戴日下也。以南戴日下及日去地为勾、股,为之求弦,即日去人也。”

刘徽介绍的这种方法,隐含着两个物理假设:其一,光行直线;其二,地形

为平的。在这两条假设之上，运用重差术，可求得日与地的垂直距离、日与测量者之间直线距离、日与测量者之间的水平距离。根据刘徽的描述，我们作图进行分析。如图 4，日位于图中 S 处，求日高 H、日与测量者（前表）之间水平距离 OA，直线距离 SB。刘徽所给出的公式若用图示符号表示则为：

$$H = \frac{AC \cdot h}{CD - AB} + h$$
$$OA = \frac{AC \cdot AB}{CD - AB}$$

刘徽并未说明他是如何得到这些公式的，但这些公式是正确的，这一点并不难证明。

得出了日高 H、日与测量者之间的水平距离 OA 以后，就可以利用勾股定理求出日与测量者之间的直线距离 SB 来，

$$SB = \sqrt{H^2 + (OA + AB)^2}$$

刘徽就是这么求的。

这里我们以刘徽对日之高远的计算为例介绍了重差术的应用。需要指出的是，重差术的出现是在刘徽之前，《周髀算经》、张衡《灵宪》、《淮南子》中都可以窥见重差术的影子，刘徽的贡献在于将这一命题理论化了，并且给出了明确的求解公式。他还撰写了《海岛算经》一书，详细讨论各种测望问题。在利用数学工具协助测量方面，刘徽功不可没。

总而言之，中国古代在进行长度测量时，除了直接比较方法以外，还广泛利用数学工具进行辅助测算。这些测算一般是通过利用直角三角形有关性质而得以实现的，由此也促进了定量几何学的发展，使之能够基本满足古代社会的测量需求。

测重原理

测重是度量衡一项基本任务。在古代，这一任务一般是通过天平和杆秤完成的。利用天平和杆秤称重，所得结果实际是物质的质量。古人没有现代物理学意义上的质量定义，他们对质量与重量的概念区分不清，在习惯上总是把称得的质量认为是物体的重量。为与古人知识状态相应，我们在叙述中对此二者也不加区分。

古人把各种测重仪器都叫做衡。《汉书·律历志》说：

“衡权者，衡，平也；权，重也。衡所以任权而均物平轻重也。”

衡的形式包括等臂天平、不等臂天平、杆秤。相应地，权就是砝码或秤砣。衡器的三种形式有一个演变过程，这一过程与人们对杠杆原理认识的深化及巧妙应用分不开。

衡器出现的时间很早，它的最初形式是等臂天平。迄至目前，考古发掘的较早而且完整的权衡器是湖南长沙左家公山一座战国时代楚墓中的木衡铜环权，那就是个等臂天平。环权制作精细，大小成套，显然是作为砝码来用。类似的成套环权出土还有一些，这反映春秋战国时期，等臂天平是得到普遍应用的。

在古人对衡器的议论中，有很多是指的等臂天平。《汉书·律历志》说：“权与物钧而生衡。”权与物等重，衡器就平而不斜，这只能指等臂天平。《淮南子·主术训》说：

“衡之于左右，无积轻重，故可以为平。……夫权轻重，不差首。”

这也是指的等臂天平，而且说其精度很高。在左家公山出土的铜环权中，最小的重不足一克，这表明当时天平的确达到很高精度。

从物理学角度来说，等臂天平的运作一定要满足杠杆原理，但这并不意味着最初的制作者已经掌握了这一原理。这是因为，杠杆原理是量化了的，它要求在平衡条件下，力和力臂的乘积在量值上要相等。只有把握了这一定量关系，才算是基本掌握了杠杆原理。而这种把握，必须是科学发展到一定程度才有可能实现。现在还没有证据表明在衡器最初出现的时候，人们已经掌握了杠杆原理。

那么，古人是依据什么原理制作出等臂天平的呢？我们认为，这是基于直观思辨的结果。等臂天平支（或悬）点在中央，两臂等长，由此，若两端悬挂重物不等，它必然会向重的一侧倾斜，这是可以直接想象出来的，不必运用杠杆原理知识。《淮南子·说山训》说“重钧则衡不倾”，指的就是这种现象。

透过古人的有关论述，可以更清楚地看到这一点。《慎子》说：

“权左轻则右重，右重则左轻，轻重迭相橛，天地之理也。”

“右重则左轻”，应为“左重则右轻”之误。所谓“天地之理”，自然而然之意也。古人制作天平，依据的就是这种“天地之理”。

等臂天平使用时间很长，直到《汉书·律历志》还要把它作为衡器主要形式加以记载，此即所谓之“五权制”：

“权者，铢、两、斤、钧、石也，所以称物平施，知轻重也。……五权

之制，以义立之，以物钧之，其余小大之差，以轻重为宜。”

这种五权制，是一种大天平制度，它的砝码可以大到以石相论。但《汉书》的记载并不表明在汉朝之前没有不等臂天平。等臂天平在使用过程中有许多

不便。首先，它的测量数据是离散的，如果物重与砝码重量（包括组合砝码）不等，就无法进行准确测量，只好如班固所说：“其余小大之差，以轻重为宜。”精确的数值，只有靠估测了。再者，等臂天平的测量范围也受到限制，即以五权制而言，其测重范围也仅限于“石”的量级，要扩大测量范围，很是麻烦。还有，用天平测量时，砝码的移上挪下，操作起来多有不便。为此，古人必然要探索衡器新的形式，作为这种探索的初级产物，不等臂天平应运而生。

最早从理论上探讨不等臂天平的，当属《墨经》。《墨经》的《经下》篇涉及了这一问题。

《经》：“衡而必正，说在得。”

《说》：“衡：加重于其一旁，必捶，权重相若也相衡。则本短标长，

两加焉，重相若，则标必下，标得权也。”

大意是说，在称衡物体时，天平一定要平正，这是由于物和权要相互得宜之故。《经说》的前半段指等臂天平，后半段指不等臂天平，意思是说：在天平一侧放置重物，天平必然倾斜，只有当物重和砝码重相等时天平才可能平衡。如果衡器两臂不等长，同时在两侧放置等重的砝码和重物，则臂长的一侧必然向下倾斜，这是因为它多得了权重的缘故。

对《墨经》此条的解说，学术界尚未完全一致，但无论如何，说这一条涉及到不等臂天平的工作原理，则是大家基本都同意的。而能够运用不等臂天平称重，必然掌握了杠杆原理，这是不言而喻的。当然，除了《墨经》的记载以外，我们还需要从文物和文献两方面做进一步考察，以确切了解古人究竟何时开始使用不等臂天平称重。

在我国现存的古代衡器中，中国历史博物馆藏的两件战国铜衡，有可能就是作为不等臂天平使用的。这两件衡衡体扁平，衡长相当于战国时一尺，正中有鼻纽，可以悬吊使用。纽孔内有沟状磨损，显示它是经过长期使用的。衡正面有纵贯衡面的十等分刻度线。衡上刻有“王”字，因此人们称其为“王”铜衡。“王”铜衡的鼻纽孔在正中，这符合等臂天平的特点。但等臂天平不需要在衡面上标出刻度线，纵贯衡面的十等分刻度线，使它具有了不等臂天平的功用。在使用时，物和权分别悬挂在两臂，找得一定的位置使之平衡，从悬挂位置的刻度和权的标重，就可以计算出所称物的重量。

文献传说中也透露出同样的信息。南北宋之际吴曾《能改斋漫录》引《符子》的一段话，就与不等臂天平测重有关。原文为：

“《符子》曰：朔人献燕昭王以大豕，曰养奚若。……王乃命豕宰养之。

十五年，大如沙坟，足如不胜其体。王异之，令衡官桥而量之，折十桥，豕不量，命水官浮舟而量之，其重千钧。”

“衡官”，专职称重的官员。“桥”，即战国时代所谓之桔槔。刘向《说苑·反质》载曰：“为机，重其后，轻其前，命曰桥。”由此，“桥而量之”，即利用杠杆方式称重。这一记载与“王”铜衡及《墨经》相互参校，可证我国先民至晚在战国时期已经掌握了杠杆原理。

运用不等臂天平进行测量，较之等臂天平，有一定的优越性。首先，这在原理上是一种突破。它标志着古人已经掌握了杠杆原理，这为称重仪器的改进奠定了科学基础；其次，测量数据由离散的变为连续的；第三，测量范围有了大幅度增加，不再仅限于砝码的量级。但是这种方法也有其不便之处，主要是它每次都需要经过运算才能得出结果，这就限制了它的被推广使用。

经过长时间的探索，一种新形式的衡器——提系杆秤出现了。这种衡器的出现，标志着古人对杠杆原理的运用，已经达到炉火纯青的地步。对于衡器而言，表达杠杆原理的数学公式可以通俗地写成：

$$\text{权重} \times \text{权臂} = \text{物重} \times \text{物臂}$$

就上述“王”铜衡而言，权重是固定的，其余的三个因素是可变的，由此，要确定物重，就必须经过运算。而在提系杆秤中，权重是固定的，物臂长也是固定的，这样，物重变化与权臂长变化就有一个正比关系，因此，物体的重量可以单一地由权臂相应长度表示出来，即对重量的测量转化成了对相应权臂长度的测量，这就带来了莫大的优越性。南宋陈淳对提系杆秤的使用有个形象的说明：

“权字乃就秤锤上取义。秤锤之为物，能权轻重以取平，故名之曰权。

权者，变也。在衡有星两之不齐，权便移来移去，随物以取平。”（陈淳：《北溪字义·卷下·经权》）

移来移去，这正是变重量测量为长度测量的特征。这一特征使得称重变成简单易行之事。

天平的测量数据是离散的，而提系杆秤不需经过换算即可得到所需要的连续分布的测量数据，这是它较之天平优越的另一特点。

提系杆秤的测量范围和精度完全决定于提纽的位置。相当多的杆秤上有两个提纽，在待测物较轻的情况下，使用后一个提纽，这样物臂增加，可获得较高的测量精度；在待测物较重情况下，使用前一个提纽，这样物臂缩短，增加了测量范围。这种特性也是天平所不具有的。

提系杆秤的灵敏度比之精心设计的天平而言，要逊色些，但这对社会生活而言，并不重要。

因为提系杆秤具有如此诸多长处，所以它出现以后，很快得到普及，成为中国古代最常见的衡器，提系杆秤是古人成功运用杠杆原理的范例，是古人智慧的结晶。

测角度原理

中国古代角度概念不发达，但古人在其科学活动和日常生活中，不可避免地要涉及角度，这就存在着一个如何测量问题。由于中国古代不像西方那样，存在着一个对任何问题都适用的 360° 圆心角分度体系，古人的角度测量，归根结底就成了一个角度体系规定问题，只要规定了所论对象的角度体系，测量问题也就迎刃而解了。

古人规定的角度体系大致可分为三类：一类属于技术规范，一类用于标志地平方位，另一类则专门用于天文观测。

属于技术规范这一类的，在《考工记·车人之事》条中有清晰的规定：

“车人之事：半矩谓之宣，一宣有半谓之，一有半谓之柯，一柯有半谓之磬折。”

这里矩、宣、 $\frac{1}{2}$ 、柯、磬折等表示的就是这套角度的具体名称。矩为直角。若用现行分度法表示，则

$$\text{—矩} = 90^\circ$$

$$\text{—宣} = \frac{1}{2} \times 90^\circ = 45^\circ$$

$$\text{—} = 45^\circ + \frac{1}{2} \times 45^\circ = 67^\circ 30'$$

$$\text{—柯} = 67^\circ 30' + \frac{1}{2} \times 67^\circ 30' = 101^\circ 15'$$

$$\text{—磬折} = 101^\circ 15' + \frac{1}{2} \times 101^\circ 15' = 151^\circ 52' 30''$$

显然，这套角度是这样确定的：选择一个人们最熟悉而又易于实现的角为基本单位，通过简单数学运算，确定其他角的大小。

这种定义方法与古巴比伦分圆为 360° 的等分定义法完全不同，它只是某些特定的角，是工匠制物的规范。因为这套角度数值是规定好了的，在实用当中只需拿标准去比对即可，不一致即不符合要求，因此在测量上并不复杂。

磬折的概念，源自古代编磬，编磬的鼓上边与股上边所成的夹角与这里“磬折”角的大小差不多，于是古人就借用了这一名词，使之成为矩、宣、 $\frac{1}{2}$ 、柯、磬折这一体系的一员。

磬折概念虽然源于编磬，但它并非制作编磬的技术规范。《考工记》在涉及编磬制作时专门为该角规定了一个名称，叫倨句。倨句的大小也是以矩为基础来定义的。《考工记·磬氏为磬》条规定说：“倨句一矩有半”，据此，

$$\text{—倨句} = 90^\circ + \frac{1}{2} \times 90^\circ = 135^\circ$$

近半个多世纪以来，随着编磬的大量出土，人们发现它的相应角度与这一数值甚为接近，证明《考工记》对倨句大小的规定，在古代基本上得到贯彻执行了的。

磬折倨句这些概念作为技术规范，在《考工记》中多处被提及，甚至在古代社会生活中也有所应用。例如《礼记·曲礼下》就规定，凡是捧执君主之器，要求“立则磬折垂佩”，即是说，站在那里要保持鞠躬姿势，鞠躬程

度大致要符合罄折角度，这样，身上佩带的玉佩自然也就悬垂于身前了。这表明这套角度体系在古代还是得到一定程度的应用了的。

当然，作为技术规范，这一角度体系是远不敷用的，因为它只覆盖了几个特殊的角度，不具备普遍意义。由此，在一些特定情况下，古人还补充了一些特殊规定，以适应生产发展之需求。例如，《考工记·弓人为弓》条就针对弓的制作这一具体事件规定说：

“为天子之弓，合九而成规；为诸侯之弓，合七而成规；大夫之弓，合五而成规；士之弓，合三而成规。”

这是用圆心角的大小来规定了弓背的曲率。同样，在《筑氏为削》条里也有类似规定：

“筑氏为削，长尺博寸，合六而成规。”

中国古代几何角度概念不发达，对于涉及角度的一些技术问题，只有依靠这些特殊规定，上述例子很清楚地表明了这一点。

角度体系一重要用途是标示方位，而《考工记》所载之角度概念不能胜任此工作。对此，古人采用的是另一种方法，用十二地支（子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥）表示十二个地平方位，其中子代表北方，卯代表东方，午南西西。这种表示方法在汉代很常见，《周髀算经》卷下有“冬至昼极短，日出辰而入申，阳照三不覆九，……夏至昼极长，日出寅而入戌，阳照九不覆三”，就是这种用法。这种表示方法在历史上流布很广，宋代沈括在其《浑仪议》中提到浑仪上地平环的作用，说它“若车轮之仆，以考地际，周赋十二辰，以定八方”。可见在天文仪器上，这种地平方位表示方法也曾被用到。

为了更精确地表示地平方位，古人又用四维（艮、巽、坤、乾）、八干（甲、乙、丙、丁、庚、辛、壬、癸）、十二支来表示二十四个方位，如图所示。这种方法当然也可以视为一种角度体系，它的每一名称都对应于一个特定方位，虽然限制了角度概念的深化，但也可以满足一定的实用需求，因而在古代社会中，也得到了比较广泛的应用。在现存的古罗盘上，经常可以看到这种分度方式。

因为在上述地平方位表示体系中，每一个名称与特定方向相对应，这样在应用这一角度体系时，就必须首先将其按实际方位对正，换言之，即准确判定东西南北四向。“四向既正，则轮盘二十四向皆正矣。”（《革象新书·地有偏向》）

判定东西南北四向的方法，在古代中国产生很早。其中《考工记》“匠人”条的论述为最具代表性：

“匠人建国，水地以悬，置以悬。为规，识日出之景与日入之景。昼参诸日中之景，夜考之极星，以正朝夕。”

这里“ ”是木质的表，把垂直竖立于地面，以之为圆心作圆，把日出和日没时表影与圆周相交的两点记下来，这两点连接起来就是东西的方向，这样来得到比较正确的东西方向。东西南北四向确定以后，上述地平方位角的测量也就不成问题了。

除了上述地平方位表示方法以外，古代还存在八卦、六十四卦等地平方位表示法，这些表示法的应用在测量原理上与二十四方位表示法相同，这里就不再多述。

四维、八干、十二支表示方法，是用以表示地平方位，在需要标示天体方位情况下，古人则采用分圆周为 $365\frac{1}{4}$ 段的分度方法。古人在观测实践中发现，太阳每 $365\frac{1}{4}$ 日在恒星背景上绕天球运行一周，由此启发他们想到，若分天周为 $365\frac{1}{4}$ 段，则太阳每天在天球背景上运行一段，据此即可确定一年四季太阳的空间方位，而这对于制定历法非常重要。古人把这些分段叫做“度”。这些度在概念上不能视同于我们今天所说的圆心角，它只是表示一种弧长比例单位，一度表示分圆周为 $365\frac{1}{4}$ 份时每份的长度。

$365\frac{1}{4}$ 分度体系的测定方法受宇宙结构学说的影响。中国古代主要的宇宙结构学说有两家：盖天说和浑天说，它们各有其不同的测定方法。

盖天说的代表著作《周髀算经》卷下所载的“立二十八宿以周天历度”，详细介绍了该学说应用 $365\frac{1}{4}$ 分度体系进行测量的方法，具体是，在平地上作一“径一百二十一尺七寸五分”的大圆，则依“径一周三”，圆周为 $365\frac{1}{4}$ 尺，再从圆周上正南一点起，每一尺作为一度，分圆周为 $365\frac{1}{4}$ 度，然后即可测量。测量的具体过程是：

“立表正南北之中央，以绳系颠，希望牵牛中央星之中，则复望须女之星先至者，如复以表绳希望须女先至定中，即以一游仪，希望牵牛中央星，出中正表西几何度，各如游仪所至之尺为度数，游在于八尺之上，故知牵牛八度。

其次星放此以尽，二十八宿度则之矣。”

文中所说的希望，为瞄准之意。“放此以尽”，“放”通仿。这段话所反映的是一种比例对应测量思想。天空大圆 $365\frac{1}{4}$ 度，在地面上也做一个与之对应的圆，然后把星辰在天空上的位置相应地标在地面这个圆上，这就把二十八宿在这一分度体系中的距度确定了下来。今天看来，用这种方法确定的实际是二十八宿依次转到正南时之地平方位角，不是其赤经差。但这毕竟是对其方位的标示，对人们了解日月星辰在天空中的大致位置，还是有帮助的。

浑天说继承了盖天说的这种比例对应测量思想，并依照自己的宇宙结构模式对之做了相应调整。浑天说认为天是个圆球，天包着地，这样要测定环绕天球分布的二十八宿的距度，就不能像《周髀》那样在平地上作圆，而必须以与天赤道平行的方式竖一个立圆，这就导致了浑仪的产生。

初期的浑仪仅设一个与赤道平行的规环，后世的浑天家在与该规环垂直的方向又竖起了一个与之共心的规环，在这些规环上刻上了标志 $365\frac{1}{4}$ 分度的刻线，并依据万向轴工作原理，设置了可指向星空任一位置的衡管，以衡管的瞄准代替了《周髀》中的“以表绳希望”。这样，天空中任一星体的位置，都可以通过这两个规环上的有关读数，用入宿度和去极度这样一对相互垂直的坐标表示出来。这一过程，在东汉时已经完成。

古人圆心角概念薄弱，他们根据自己的理解对浑仪测天原理做了说明，其中北宋沈括的解说颇具代表性，其《浑仪议》提出：

“周天之体，日别之谓之度。……度在天者也。为之玑衡，则度在器。度在器，则日月五星可持乎器中，而天无所豫也。天无所豫，则在天者不为难知也。”（《浑仪议》）

这段话表明，浑天说测定天体空间方位，所信奉的也是比例测度思想：按日附天之行分天为一定之度，将其缩小至浑仪上，则度在浑仪，通过瞄准所要测量之天体，观察其在浑仪上的相应位置，即可知其在天之度。

尽管 $365\frac{1}{4}$ 分度方法的产生是基于比例测度思想，但分度一旦确定，圆弧上每一段都与一定的圆心角相对应，据此转动浑仪上的窥管进行观测，实际上是角度测量。由此在讨论古人观测结果时，可以直接把他们的记录视同角度。不过，古人所说的度数，与现行 360° 圆心角分度的数值稍有差异，这是应予注意的。

误差理论

误差理论是测量学说的重要组成部分。随着测量实践的展开，中国古人对误差理论也进行了内容丰富的探讨。他们已经认识到，在测量中误差不可避免，并讨论了产生误差的原因和相应减少测量误差的方法，还对误差概念从理论上作了分析。

在对测量行为可信性的分析上，古人认为，正确的测量本身是可以信赖的，它是人们认识事物的一种可靠手段。《隋书·律历志》说：

“一十百千万，所同由也；律、度、量、衡、历、率，其别用也。故体有长短，检之以度，则不失毫厘；物有多少，受之以器，则不失圭撮；量有轻重，平之以权衡，则不失黍丝；……故隐幽之情，精微之变，可得而综也。”

这里表达的思想来自刘歆的“典领条奏”，意思是说，测量中要用到数的概念，用数字表示的测量结果可以达到很高的精确度。就长度而言，其差不到毫厘；就体积而言，其差不到圭撮；就重量而言，其差不到黍丝。这样的准确程度，确保了人们能够获得对事物的正确认识。

另一方面，再准确的测量，也总还会有误差存在，《淮南子·说林训》指出：

“水虽平，必有波；衡虽正，必有差；尺寸虽齐，必有诡。非规矩不能定方圆，非准绳不能正曲直，用规矩准绳者，亦有规矩准绳焉。”

意思是说，水面即使平静，也有波纹存在；权衡即使平正，结果也会有偏差；尺寸即使已经对齐，读数也会有不一致处。没有仪器不能进行测量，使用仪器必须遵守相应的操作规则。这段话甚为重要，它反映了古人在误差概念上获得的一个重要进展：在测量中，误差不可避免。

古人在自己的测量实践中，广泛涉及到了误差的产生原因。这些涉及，丰富了古代误差学说的内容。

《荀子·正名篇》说：“衡不正，则重悬于仰，而人以为轻；轻悬于俛，而人以为重。此人所以惑于轻重也。”“衡不正”，是说天平没有调到平衡状态，这时进行称重，它就不能反映被测物的实际重量。这里所涉及的，就是不遵守操作规则而导致的过失误差。

《慎子》说：“厝钧石，使禹察锱铢之重，则不识也。”厝，放置之意。以钧、石这样大的量器来“察锱铢之重”，即使圣如大禹，亦将茫然不识。这是测具不当，单位过大，使测量无法进行的例子。

《淮南子·泰族训》说：“寸而度之，至丈必差；铢而称之，至石必过。石称丈量，径而寡失。”径而寡失，是古人在测量实践中得到的重要认识，也是测量工作应该遵循的一条基本原则。这一条涉及到累计误差，它要求人们尽量选择合适测具，减少测量次数。古人类似说法很多，例如，《宋史·律历志》也说：“物铢铢而较之，至石必差。”这反映了同样认识。

观测要用仪器，仪器因各种原因有时会产生系统误差。古人对之也有所涉及，这主要表现在他们观测天体的实践上。例如，东汉学者贾逵在讨论用赤道仪观测日月运动时出现的“或月行多而日月相去反少”的误差现象时，就曾说过：

“赤道者为中天，去极俱九十度，非日月道，而以遥准度日月，失其实行故也。”（《后汉书·律历志》）

日月都是沿着黄道运动的，而当时的浑仪只有赤道坐标，以之量度日月，不

能反映其实际运动情况，由此带来的误差，就是用赤道仪观测日月运动的系统误差。贾逵所谈论的，就是这件事情。

古人对观测中产生的系统误差有时还有定量分析。例如，沈括《浑仪议》即曾提到：

“李淳风尝谓斛兰所作铁仪，赤道不动，乃如胶柱，以考月行，差或至十七度，少不减十度。此正谓直以赤道候月行，其差如此。”

这里给出了误差分布范围：介于十七度到十度之间。也指出了误差产生原因：“直以赤道候月行。”这明白无误告诉我们，这里所论的是斛兰浑仪的系统误差。

测量有一定的数理依据，这一依据本身有时也会成为产生误差的根源。古人对此多有涉及，例如，三国时王蕃在讨论天球大小时，对陆绩的结果表示不满，说陆绩不准确的原因在于他用了“周三径一”这样不准确的圆周率，因而导致计算结果有误。梁朝祖暅也有过类似的批评。（《浑天论》）这些，是通过对产生最后测算结果所依据的数学关系的分析，指出了产生误差的原因。

古人进行天文测量的物理依据之一是光行直线，这一依据遭到了明末方以智的否定。方以智评论当时流行的计算日体大小的方法时说：

“细考则以圭角长直线夹地于中，而取日影之尽处，故日大如此耳。不知日光常肥，地影自瘦，不可以圭角直线取也。何也？物为形碍，其影易尽，声与光常溢于物之数，声不可见矣，光可见、测，而测不准也。”（《物理小识》卷一）

“光肥影瘦”是方以智提出的重要概念，其中心意思是说光不走直线，光在传播过程中常向几何投影的阴影处侵入，因此运用建立在光行直线基础上的几何测算方法进行测量是“测不准”的。它是导致这类测量产生误差的主要原因。方以智的论述未必恰当，但他注意到了测量时物理依据的可靠性问题，这也是难得的。

中国古代的误差理论，还涉及到了测量的精确度和准确度的概念。《礼记·经解》说：“易曰：君子慎始，差若鬲厘，缪以千里。”可以这样理解这句话：在行为的开始和终结，其准确度一样，但精确度却大不相同。换言之，相对误差不变，绝对误差则大大增加了。

《礼记》的引述，只能说是对精确度和准确度概念的朴素涉及，真正从理论上对这些概念加以探讨的，则是宋代沈括，他是在讨论用浑仪测天有关问题时涉及到此内容的。他反对那种认为浑仪置于高台之上，观测日月出没时不与地平相当，因而增加了误差的观点，说：

“天地之广大，不为一台之高下有所推迁。盖浑仪考天地之体，有实数，有准数。所谓实者，此数即彼数也。……所谓准者，以此准彼，此之一分，则准彼之几千里之谓也。今台之高下乃所谓实数，一台之高不过数丈，彼之所差者亦不过此，天地之大，岂数丈足累其高下？若衡之低昂，则所谓准数者也。衡移一分，则彼不知其几千里，则衡之低昂当审，而台之高下非所当卹也。”

（《浑仪议》）

沈括所谓的“实数”，与测量精确度有关，它所影响的是测量绝对值，相应的误差是绝对误差。“准数”，是测量的相对值，是用浑仪观测天体时反映在仪器上的读数，由此产生的误差直接影响了最后测算结果的准确度。在沈括所举的例子中，台子高下是“实数”，在此基础上进行测量导致的绝对误

差可达“数丈”之巨，但它对相对误差的影响却近似于零，所以沈括说，“天地之大，岂数丈足累其高下？”另一方面，窥管在浑仪上的读数是“准数”，它本身的误差也许不大，但因其反映的是相对测量数据，“衡移一分，则彼不知其几千里”，所以对最后结果影响还是很大的。沈括的分析表明，在判断误差对测量结果的影响方面，他已有清晰而正确的认识。

在如何减少测量误差方面，古人一般是“对症下药”，针对产生误差的原因加以改正。除此之外，他们还特别重视保持测量标准的稳定。《淮南子·主术训》说：“今夫权衡规矩，一定而不易，不为秦楚变节，不为胡越改容，常一而不邪，方行而不流，一日刑之，万世传之，而以无为为之。”这里讲的，就是人们所向往的理想状况。另一方面，与测量中误差不可避免的思想相一致，古人也意识到测量器具不可能绝对符合标准，于是，他们还规定了度量衡器具在使用中的允许误差范围。例如在《睡虎地秦墓竹简》的《效律》条中，就记述了秦朝法律对此的有关规定。这种规定的目的，当然是为了阻止和减少度量衡器具在使用时的测量误差。

在古人为减少误差而采取的种种措施中，有两种做法特别值得一提，因为它们很巧妙地运用了误差理论。

一种做法是减少测量中的相对误差，这在古人立表测影的演变过程中有所反映。早期的测影，表高一般八尺。到了元代，郭守敬立的表高达四十尺，而到了明万历年间，邢云路在兰州建造的表则高达六十尺。竖立高表，增加了表影的测量值，在绝对误差变化不大情况下，相对误差自然就降低了。古人说：“表长而晷景长，尺寸纵有毫秒之差则少矣。”（叶子奇《草木子·杂制篇》）指的就是这个道理。

另一种方法是宋末赵友钦在测量恒星赤径差时采用的，意在避免过失误差，减少偶然误差。为保证观测结果的可靠性，他把观测人员分为两组，用同样的设备，观测相同的恒星，所得结果相互参校。他说：“必置四壶，立两架，同时参验，庶无差忒。”（《革象新书·测经度法》）他的做法与现在人们取用多次测量的平均值作为真值的思想内涵是一致的。

中国古代对误差问题的讨论，一般散见于各类书文之中，因而显得有些零散，没有形成自己首尾一贯的系统。即使如此，古人对误差理论的探讨还是达到了一定的深度和广度，是值得予以认真总结的。

观测实验

对弓体弹力的测试

弓（包括弩）是古代一种重要武器，在战争及狩猎活动中具有不可替代的作用。对弓弩的重视，使得古人孜孜不倦地探求其制作之道，并由此形成了定量测试弓体弹力的方法。

古人测弓体弹力，目的有二，一是得到弓体的额定弹力（即弓弦拉到规定长度时弓体所产生的弹力），以之作为表征弓的性能的定量标准。古人经常以钧石这些重量单位表示弓的弹力。宋人沈括说：“挽蹶弓弩，古人以钧石率之。”（《梦溪笔谈·卷三》）指的就是此事。另一目的是以之做为弓弩制作中的一种技术手段，来保证弓弩的制作能够符合要求。

中国古代最早全面记述弓的制作规范和技术的著作是《考工记》，《考工记》中已经涉及对弓弹力的测量问题，其“弓人为弓”条说：

角不胜干，干不胜筋，谓之叁均。量其力，有三均，均者三，谓之九和。”所谓角、干、筋，都是制作弓体的材料。古人做弓，以坚韧之木或竹为干，内衬以角，外附以筋，张以丝弦而成。角、干、筋对弓的弹性都有影响。古人希望这三者的作用均等，角不胜干，干不胜筋，指的就是这种意思，古人把三者均等的这种理想情况称为三均。“量其力”一语，表明当时人们已经掌握了测试弓体弹力的方法，并把这种方法用于弓体制作过程，使之成为保证弓的质量符合要求的技术措施。

那么，当时人们是如何测定弓的弹力的呢？东汉郑玄对《考工记》该段文字的注解，为我们提供了解答这一问题的线索：

“叁均者，谓若干胜一石，加角而胜二石，被筋而胜三石，引之中三尺。

假令弓力胜三石，引之中三尺，弛其弦，以绳缓擗之，每加物一石，则张一尺，故书胜。”

唐代贾公彦对郑玄这段话又做了疏解：

“此言谓弓未成时，干未有角，称之胜一石；后又按角，胜二石；后被筋，称之即胜三石。引之中三尺者，此据干角筋三者具总，称物三石，得三尺。若据初空干时，称物一石，亦三尺；更加角，称物二石，亦三尺；又被筋，称物三石，亦三尺。郑又云假令弓力胜三石，引之中三尺者，此即三石力弓也。必知弓力三石者，当弛其弦，以绳缓擗之者，谓不张之，别以一条绳系两箫，乃加物，一石张一尺，二石张二尺，三石张三尺。”郑玄、贾公彦这些注疏，包含十分丰富的内容，它记录了测定弓体弹力的方法及其不同的应用。根据这些注疏，古人在测定弓体弹力时，首先松开张紧在弓上的弦，让弓处于松弛状态，再用绳系在弓的两箫（即弓两端架弦之处，也叫峻），保持弓不受力，然后在绳上悬吊重物，调节物体重量，使得弓被拉开的长度为三尺，这时物体的重量就反映了弓的弹力的大小。若物体重为三石，则该弓弹力为三石，此即郑、贾所谓之“三石力弓”。

上述步骤中，在测试之前，先让弓处于松弛状态，这一做法很有道理。因为弓是一个弹性体，它的弹力与外力造成的形变成正比，当弓处于松弛状态时，它的弹力为零，这时开始测试，得到的将是弓的净弹力。另外，在测弓力时，要求“引之中三尺”，这也是有原因的，贾公彦在这一篇的疏解中说：“引之皆三尺，以其矢长三尺，须满故也。”可见，在弓被拉开三尺情

况下，所测出的是弓的额定弹力。

古人除了用这种方法测出弓的额定弹力以外，还将其用于弓的刚性的调整上。弓体主要是由干、角、筋构成，古人希望这三者对弓的刚性强度有同样贡献，他们就是通过测定其相应弹力来实现这一点的。根据贾公彦的疏解，开始要先选择合适的弓干，使其在悬一石重的物体时恰被引至三尺。然后在弓干上衬角，衬后悬二石重物体，使其亦被引至三尺；之后，在弓干上附筋，然后悬三石重物体，如果这时也恰被引至三尺，则说明角、筋、干三者对弓刚性强度的影响相等，这就达到了古人所说的“三均”。

这种做法是有道理的。我们知道，物体在发生弹性形变时，它所受的外力在量值上等于其刚性系数与形变量的乘积。而在上述测量中，弓的形变量是保持不变的，这样通过衬角、附筋以后，弓的刚性系数的改变就唯一地与所悬外物的重量成正比了。因此，可以通过所悬外物重量直接判定角、筋、干三者的组合是否符合要求。

从物理学角度来看，古人对弓体弹力的测定是一件很有价值的事情。在一般情况下，古人用衡器测物重，实际上测出的是质量，而这里测出来的却是实实在在的力。衡器测重依据的是杠杆原理，弹力测定则遵从的是弹性定律（也叫胡克定律），这是不一样的。

另外，古人在不知道弹性定律情况下，很巧妙地应用了这一定律，他们在测量时限定把弓引长至三尺，这一方面可以直接得到弓的额定弹力，另一方面也省去了制作弓弩时每次测量中繁琐的形变量的计算，而且能够保证制作出来的弓弩符合要求。更重要的是，贾公彦在疏解中提到：

“加物一石，张一尺；二石张二尺，三石张三尺。”

这里似乎昭示着他已掌握了在弓弩这一特定弹性体条件下的弹性定律。当然，是否如此，我们还不能肯定，因为还缺乏足够的证据证明这里的一尺、二尺、三尺代表的是弓的形变量。但无论如何，贾公彦把弓所悬物重与其被拉开的程度联系起来，是有可能找到二者之间关系的正确表达式的，这是一条通向发现弹性定律的正确道路。

古人测定弓体弹力，除上述用途外，还用于提高弓弩射程方面。北宋韩琦的《别录》一书，曾记叙了这方面的内容：

“魏丕作场使，旧制床子弩止七百步，上令丕增造至千步，求规于信。

信令悬弓于架，以重坠其两端，弩势圆。取所坠之物较之，但于二分增一分，

以坠新弩，则自可千步矣。如其制造，果不差。”

这里所记载的，就是古人通过测定弓体弹力来改善弓弩射程的一次尝试。这种尝试是合乎逻辑的，因为弩的射程远近当然取决于其弹力的大小，要提高射程，只有从增加弹力着手。不过，弹力与射程之间不成简单的正比关系，因此，由这次尝试所得到的结论并不完全可靠。尽管如此，这一尝试还是有意义的，因为它反映了古人从理论上探求二者之间关系的努力。

古人测定弓体弹力的方法在古代得到了广泛应用，古籍中经常可以见到对弓体额定弹力的提及。明末宋应星《天工开物》，也详细记载了测定弓体额定弹力的方法，这些都表明这一方法是发展成熟而且被普遍应用了的，它在我国古代弓弩制作及测试过程中，发挥了不可磨灭的作用。

小孔成像

小孔成像是古典光学中一种重要成像现象，在中国古代光学发展过程中得到过透彻研究，是古人在光学领域取得成就的一个重要方面。

最早从实验角度观察和解释小孔成像的，当推《墨经》。《墨经》的《经下》篇记录了墨家对此问题的认识：

《经》：“景到，在午有端，与景长，说在端。”

《说》：“景：光之人，煦若射。下者之人也高，高者之人也下。足蔽

下光，故成景于上；首蔽上光，故成景于下。在远近有端与于光，故景库内也。”

对本条具体文字的解说，学界有不同意见，但基本上都同意这是用光行直线原理对小孔成像现象的解释。一般认为，“到”同“倒”，“午”指光线的交叉，“端”指光线交叉后在暗室壁小孔处形成的光点。有学者认为，文中的“人”字为“入”之误，此说是有道理的。墨家大意是说，在小孔成像情况下，由于小孔的存在，使得入射光线在小孔处形成交叉，从下边射入的光线进入暗室以后，来到了上边，从上边射入的光线则来到了下边，因此就在暗室中生成了倒像。

这里提到的“像”是广义的，它也可以是投影。例如人站在太阳和小孔之间，在合适条件下，孔后的屏上在太阳均匀的光像之中就出现了一个人的倒影，这就是投影。《墨经》中提到首足蔽光之语，表明当时实验中所观察到的可能确为投影，而不是像。无论是投影还是像，它们具有倒像特征是相同的，给人的启迪也一样，那就是光沿直线传播，由于暗室小孔的约束，进入室内后生成倒像。从《墨经》本条来看，墨家对此是有清晰认识的。

由于墨学的衰微，《墨经》在很长时间不为人们所解，墨家在小孔成像实验中所获得的认识也就没有被很好地继承下来。秦汉以降，对小孔成像的研究还处于重新发现现象、从头探讨机理的状态。其中被提及较多的是所谓“倒塔影”，唐代段成式《酉阳杂俎》曾有“海翻则塔影倒”之语，表明他不解此理。宋代陆游《老学庵笔记》、元代杨瑀《山居新话》，均曾提及此现象。延至明清，记述者更为多见，甚至还有人专门搜集各地“倒塔影”的实例，这表明“倒塔影”这种物理现象是受到人们普遍注意了的。

在对小孔成像现象重新发现过程中，梁朝沈约值得一提，他的《咏月诗》说：

“月华临静夜，夜静灭氛埃，方晖竟户入，圆影隙中来。”（《艺文类

聚》卷一）

他这里描述了两种现象，一种是“方晖竟户入”，即月光从屋门中射入，按门的形状，在室内地上投射出方形光斑；另一种是“圆影隙中来”，室外满月高悬，透过壁上小孔，投在室内地上仍然是圆月一轮。这两种情况，隙是小孔，月光通过小孔后在室内生成的是月亮的像，在满月情况下，这一像当然也是圆的，与小孔形状无关；而对于屋门，它的尺度相应于室内成像的距离而言，已远远大于小孔成像之要求，这时月光可被视为平行光，它这时投影到地上的是门的形状，而不是月亮的像。沈约以这样两种现象作对比，说明他对这二者的差异是有所察觉的。而产生这种现象的原因是什么，则还要等到宋末元初的赵友钦乃至更晚至清末的郑复光，才得以揭示出来。

在沈约之后，明确对小孔成像现象作出理论阐释的是宋代沈括。他用“格术”对之作解，认为是由物出发的入射光线受小孔约束，而生成与物具有“本

未相格”之势的像，即倒像。其具体内涵与《墨经》颇类，本书已有论述，这里不再多说。

完全从实验角度出发，详细探讨小孔成像机理的，当推赵友钦。他首先观察到了日、月通过壁间小孔成像的情况，发现：壁间小孔的形状虽然千奇怪状，但透过小孔的日光所成的像都是圆的；而且孔的大小可以不一样，但生成的日的像的大小都一样，只不过孔大的生成的像亮些，孔小的生成的像淡。日食时，室内日的像上也出现相应状况，其食分与室外相等。他还发现，当孔径大到可以容纳日月的视直径时，室内出现的就不再是日的像，而是孔本身的投影了，即所谓“大隙之景必随其隙之方圆长短以为形。”（《革象新书·小罅光景》）赵友钦的描述类同于沈约的发现而更为细致。非但如此，他还精心设计了一个大型的小孔成像实验，对成像过程各因素的作用做了认真探讨。

他以楼房为实验室，在左右两个房间各挖圆阱，阱直径四尺，左阱深八尺，右阱深四尺。再作两块直径均为四尺的木板，每块上面都插上一千根蜡烛。实验时，左面阱中可放一张四尺高的桌子，然后将两块插有蜡烛的板分别放在左右阱中，用板盖住阱口，左边盖阱口的板中央挖去了一个边长为一寸的方孔，右边板中央则挖去边长为一寸半的方孔（如图）。烛光就透过方孔将光线投射到楼板上，在需要改变像距时，则在楼板下面悬上大木板，以之作为像屏。

赵友钦这样的布置很有道理，这使得他可以任意固定或调节各种成像因素，从而弄清它们在成像过程中的作用，揭开小孔成像奥秘。用他自己话来说：“于是烛也、光也、窍也、景也，四者之间消长盈虚之故，从可考矣。”

在实验中，他首先保持光源、小孔、像屏三者距离不变，观察孔的大小和形状对像的影响，发现两个像大小相似，只是浓淡不同。他用像素叠加和光线直进观念进行解释，说：“千烛自有千景，其景随小窍点点而方。”每一支烛光都透过小孔在楼板上投下一个光斑，这些光斑每一个都像小孔一样，呈现方形，其位置透过小孔与烛相对。虽然每个光斑都是方的，但“偏中之景千数交错，周遍叠砌，则总成一景而圆。”对于大孔，每一支烛光透过去的光都要多些，叠加的结果，像的亮度自然要强些。

然后，他做“小景随日月亏食”的模拟实验，“向右阱东边减却五百烛，观其右间楼板之景缺其半于西，乃小景随日月亏食之理也。”接着，他进一步调节光源，灭去阱中大部分蜡烛，只剩下疏密相间的二三十支，这时楼板下的像，就由这互不相连的二三十个“方景”组成一个圆形，而且很淡，这直观地表明，像屏上圆形的像的确是由方形的光斑组成的。最后，他只点燃一支蜡烛，这时像屏上只剩下一个“方景”，赵友钦解释说：这是因为“窍小而光形尤小，窍内可以尽容其光。”这就是“大景随空罅之像”的道理。

赵友钦还分别改变了物距和像距，并做了大孔成像实验，最后得出结论说：“是故小景随光之形，大景随空之像，断乎无可疑者。”王锦光等曾详细研究了赵友钦的小孔成像实验，并列表总结了赵友钦实验的内容（王锦光、洪震寰《中国光学史》，湖南教育出版社，1986年版，86页），对于我们了解这一实验，很有裨益。该表主要内容如下：

改变的项目		像的大小	像的浓淡(照度)
小方孔	1寸	几乎相同	淡
	1寸半		浓
光源	1千支蜡烛	几乎相同	浓
	二三十支蜡烛		淡
像距	大	大	淡
	小	小	浓
物距	大	小	几乎相同
	小	大	

由此表可见，凡是小孔成像所涉及到的因素赵友钦几乎都做了探讨。非但如此，他还从理论上对实验现象做了解说，其解说的出发点是像素叠加和光行直线，这是正确的。

赵友钦之后，清代郑复光对小孔成像做了进一步研究，他的《镜镜詵痴》和《费隐与知录》对之都有专条描述。不过，这已经是19世纪中叶的事情了。

在小孔成像的应用方面，元代郭守敬发明的景符引人注目，对此，本书有专文讨论，这里就不再多说了。

透镜成像

透镜成像是基于光的折射性质，而折射是几何光学的重要研究内容，这样，透镜成像在几何光学中也就占有极其重要的地位，而古人对透镜成像所做的探讨，也就成了光学史不可或缺的内容。

中国古代对透镜成像的研究起步较晚，这大概与古人未曾发展出成熟的玻璃制作技术有关。时至今日，玻璃透镜在中国出现的最早时间尚不能确定。已经出土的汉代一些玻璃器物，有些具有透镜的放大功能，但在当时，它们是否就是作为透镜来用，学术界还有争论。争论还涉及到它们究竟是国人发明的，还是国外传入的。这些问题固然重要，但对光学史来说，更重要的则在于，这些器件对于古代光学的发展，究竟起了多大作用？

很遗憾，现在明确见到古人在成像意义上谈论透镜的文献，都较为晚近。年代早些的文献，虽然也有可以从透镜成像角度作解的，但都在疑似之间，难以定论。南唐谭峭《化书·四镜》提到：“小人常有四镜，一名圭、一名珠、一名砥、一名盂。圭视者大，珠视者小，砥视者正，盂视者倒。”谭峭的“四镜”，后世有些学者将其解释为四种透镜，圭是双凹透镜，珠是双凸透镜，砥是平凹透镜，盂是平凸透镜。但也有学者提出异议，认为它们都是曲面反射镜，因为曲面镜也能反射成像，而且“大、小、正、倒”更适用。因此，还不能断定这里的“四镜”就是透镜。

但是，我们更不能由此肯定唐人不知透镜成像。中国古人具有透镜知识的时间是比较早的，西汉时期的冰透镜取火就是一个有说服力的例子。晋隋以降，国外传入的透镜逐渐增多，史书常有记载，关于火珠的记述也更为普遍。所谓火珠，就是指凸透镜，它具有会聚功能，可以向日取火。凸透镜的放大性能是比较容易被发现的，仅仅是在向日取火的实践中，就可以发现。一旦人们利用其放大性能去观察物体，这就与成像联系起来。在唐代，人们具有这种知识是完全可能的。也是在《化书》中，谭峭说：“目所不见，设明镜而见之。”这里的“明镜”，就应该指的是透镜。这句话说的是利用透镜的放大作用使眼睛看到原来看不到或看不清的东西。

以透镜辅助视物，看到的应该是大而正的像，这只能是虚像。那么，古人对于透镜成实像的情况是否有所知呢？宋代储泳《祛疑说》，揭露一些术士装神弄鬼的欺骗活动，其中有一条就与光学有关，叫做“移景法”。他说：“移景之法，类多仿佛，惟一法如烈日中影，人无不见。视诸家移景之法特异，及得其说，乃隐像于镜，设灯于旁，灯镜交辉，传影于纸。此术近多施之摄召，良可笑也。”这样的“移景法”，毫无疑问是一种光学成像活动，而且成的是实像。“传影于纸”一语，揭示了像屏的存在，这样的像，只能是实像。但是，这种实像既可以利用透镜的折射来实现，也可以利用凹面镜的反射来完成，究竟是哪种情况，仅此还不能判断。

宋代何薳《春渚纪闻》记载的一件事情与透镜成像不无关系。何薳说，有一个叫陈皋的人，得到一只从古墓中出土的“玛瑙盂”，用它贮水研墨。一天偶然发现其中有一条长约一寸的鲫鱼，把水倒去，鱼就不见了。再倒进去水，鱼又出来了，用手去捉，什么也捉不到，不知是何宝物。这段记述看上去很神奇，但古代类似这样的记载还有一些，有的见到一朵花，有的见到别的东西。例如，清代朱琰《陶说》卷五《夷坚志》记载道：“周益公以汤赠贫友。归以点茶，才注汤其中，辄有双鹤飞舞，啜尽乃灭。”这里看到

的是双鹤。戏剧中甚至也涉及此类内容。传统戏剧中有一出流传很广的剧目《蝴蝶杯》，剧中男主角有一奇妙的“蝴蝶杯”，只要斟酒入杯，就见蝴蝶在杯中起舞，杯中无酒，蝴蝶也就消失。蝴蝶杯与陈皋得到的玛瑙盃，均属同类器物。它们既然与人们视觉有关，也就只能从光学角度去解释了。

蝴蝶杯已于70年代末在山西省侯马市被复制成功，其原理是这样的：杯子分为上下两部分，上半部分是杯体，杯体底部做成凸透镜形状，安在下半部分的杯脚上。杯脚里以细弹簧（游丝）装上一个彩蝶，只要杯稍受骚扰，彩蝶就能舞动。彩蝶位于透镜的焦点上或焦点外靠近焦点之处，这样当杯中无酒时，彩蝶生成一个与人眼同侧而像距很大的实像，当人注视杯中时，像落在视者的脑后，自然就看不见了。当斟酒入杯时，由于酒对杯壁的润湿作用，酒面呈下凹形，相当于一枚凹透镜，凹透镜与凸透镜组成一个复合透镜，复合透镜焦距大于凸透镜。同时，酒与玻璃之间折射率的差异也小于空气与玻璃之间折射率的差，这进一步增加了复合透镜的焦距，使得蝴蝶落在复合透镜焦距之内，生成放大的虚像。复合透镜起到了放大镜的作用，所以人眼能清清楚楚地看到放大的蝴蝶。杯拿在手里，总要受到一点骚扰，蝴蝶就翩翩起舞了。

（参见王锦光、洪震寰《中国光学史》，湖南教育出版社，1986年版，54—56页）

古人在制作蝴蝶杯、玛瑙盃之类器物时，未必懂得我们上面所说的这些道理，他们是在实践中摸索出了这些器物的制造方法。另外，这些器物所遵从的原理也未必相同。但无论如何，利用透镜成像，是可以实现上述效果的。

明朝末季，传教士进入我国，带来了西方的科技知识，其中也涉及到光学。中国人从传教士那里知道了望远镜。当时介绍进来的望远镜是折射式的，这是利用透镜成像的结果。望远镜传进来后，很快就被用于观测天象。例如，崇祯五年，徐光启上书皇帝，提出为判别历法优劣，对日月食观测需做改进。他提出了一些改进措施，其中有一条叫做定分法，实质即用望远镜观察日月食，提高所测食分准确度。日食时，在望远镜下张白丝布为像屏，观察日在屏上所成之像；月食则直接观测。这两种观测方式很好地利用了透镜成像的不同特点。月食直接观测，看到的是放大的虚像。日食时，则通过调节望远镜的焦距，使太阳光通过望远镜后成像于像屏之上，是实像。这既可以保证眼睛不被日光灼伤，又可以有效地观测日食过程，是古人利用透镜成像的成就之一。

在西方科学影响下，我国学者不但对透镜成像现象有所认识，还对其成像机理做了探讨。明末学者方以智引述其座师杨观光的话说：“凹者光交在前，凸者光交在后。”（《物理小识》卷二）凹者，指凹透镜；凸者，指凸透镜。这里明明白白用光路概念去解说凹透镜的发散性和凸透镜的会聚性，标志着对透镜成像研究的深化。

方以智在其《物理小识》卷十二还记述了利用透镜成像作画的方法：

“置玻璃镜于暗室之窗版，则物形小缩，透入几上之纸，可细描也。写真甚肖，花木虫物皆可。”

这里说的不是小孔成像。小孔成像不需要玻璃镜，此其一；再者，小孔成像有足够的景深，但清晰度不够，要想以之写真，“花木虫物皆不可”。只有透镜成像才能具备方以智所说的特征。在暗室的窗板上开一洞，镶入透镜，

室外景物一般在该透镜二倍焦距之外，这样在室内就生成倒立的缩小实像，以纸为像屏，可以用笔将像描绘下来，所以方以智说“写真甚肖”。改变纸与透镜的距离，可以得到窗外不同位置景物的像，对之写真，“花木虫物皆可”。揭暄在此条注语中说，“远西此法，谓之物像像物。”这也透露出是透镜成像，因为小孔成像算不上是“远西之法”的。

方以智此条富有创造性，如果再有显影定影技术，这就构成一个照相器了。清末邹伯奇就是通过类似的实验，“引伸触类”而发明了照相术的。方以智把透镜成像引入到绘画中来，是科学应用于艺术的一个范例。他的这一作法是受西学影响的结果。汤若望《远镜说》中即曾提到，望远镜“可……用以在暗室画图”。这必然会给方以智以启发。不过方以智用的是单块透镜，不是望远镜，这样作成的画视野更大。

从几何光学角度对透镜成像机理进行深入而又系统研究的，以郑复光成就最为显著。他创造了一套术语和概念，系统考察了透镜乃至透镜组的特性和规律，向着定量揭示透镜成像规律迈出了一大步。但他的工作是在 19 世纪中叶完成的，在时间上已经相当晚近了。

反射镜成像

几何光学成像包括小孔、折射、反射三种形式，其中反射成像在古代最为常见。反射成像也可以分为三种形式：平面镜成像、凸面镜成像、凹面镜成像。

反射镜成像的起源大概是受“以水鉴面”的启发。古人发现平静的水可以照出像来，后来又进一步发现具有光滑表面的物体都能映出像来，由此启示他们去把金属表面打磨光滑，这就导致了古代主要成像工具——铜镜的产生。当铜镜表面曲率不等于零时，相应的铜镜就成了凸面镜或凹面镜。

铜镜的发明在我国非常遥远。出土文物表明，早在商代，就已经有了一定水平的铜镜。商周以后，铜镜日益增多，使用上渐趋普遍，由此促进了人们对其成像的研究。这些研究可以分为成像机理、成像规律及应用几个不同方面。

对于反射成像机理，古人很少从光路角度出发去分析，较多地是一些抽象的哲学议论。《淮南子·原道训》说：“夫镜水之与形接也，不设智故，而方圆曲直弗能逃也。”“与形接”，说明镜子成像是对外部的反映；“不设智故”，说明这种反映完全是客观的，因而是可信的。西晋陆机《演连珠》也说：“镜无畜影，故触形则照。”镜子本身并未贮存像的信息，它一旦接触到外来的光，就能照出相应的像。这种认识，与《淮南子》是一致的。

陆机还说：“鉴之积也无厚，而照有重渊之深。”积，这里指镜的反射面。因为只是一个面，故说其“无厚”。镜子的成像功能就在这个反射面上，认识到这一点，也是一个进步。

相应于成像机理而言，古人对反射成像规律及应用的研究，内容还是比较丰富的。这里我们分别就平面镜、凸面镜、凹面镜三种形式做一叙述。

对于平面镜成像特征，《墨经》中曾有所涉及。墨家称平面镜为正鉴，认为正鉴所成之像是单一的，不像曲面镜那样，存在放大、缩小、正立、倒立等多种情况。平面镜成像，物与像于镜面是对称的。物体移动，像也移动，二者始终对称。物在镜前，像在镜后，像与物是全同的。《墨经》对于平面镜成像特征的记述，文字比较简朴，上述内容是总结了《墨经》该条中心意思后得到的，与平面镜成像的实际情形也一致。

在应用上，古人除了用平面镜作为鉴形之器，还以之作为光路转换装置。《淮南万毕术》说：“高悬大镜，坐见四邻。”这里所说的大镜，指的是凸面镜，因为只有凸面镜，才能具有“坐见四邻”的效果。平面镜只能窥见邻家某一特定角度的情景。但东汉高诱对这一条的注解则无疑涉及到平面镜的反射作用：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣。”这里水盆的作用就相当于一个平面镜，它把高悬着的凸面镜上的四邻景象，反射给视者。本来，要“坐见四邻”，只需抬头仰视凸面镜即可，但仰视不便，故通过水盆中水的反射而转为俯视。这里水盆的作用就是一个光路转换器，通过它的转换，使得视者能够从比较舒适的角度出发进行观察。

利用平面镜对光的反射作用，可以生成复像。这对古人来说，是不难办到的，只要有两块平面镜在手，便能轻易实现。由此，要考证古人究竟何时实现了用平面镜的多次反射生成复像，没有多大意义，因为文献中反映出的年代肯定远远落后于实际。我们需要了解的，是古人究竟如何记载并解释此事。就记载的清晰度而言，唐代陆德明《经典释文》在注解《庄子·天下篇》

有关内容时说了这样一段话：“鉴以鉴影，而鉴亦有影，两鉴相鉴，其影无穷。”这已经对成复像问题做了相当直观的解释。南唐道士谭峭在《化书·形影》中的说明，则更进了一步：

“以一镜照形，以余镜照影，镜镜相照，影影相传，不变冠剑之状，不夺黼黻之色。是形也，与影无殊；是影也，与形无异：乃知形以非实，影以非虚，无实无虚，可与道俱。”

黼黻，指古代礼服上绣的花纹。这段话指出，成一个镜中的像可以在另一镜子中再成像，像所成的像与原来的物是一样的。即是说，多个平面镜能够成复像的原因，一方面是由于平面镜生成的像与原物全同；另一方面，像又能生像，所以，可以做到“镜镜相照，影影相传”，乃至无穷。

凸面镜在我国出现时间也非常之早。在现存的早期铜镜中，属于商周时期的凸面镜已经发现了不止一枚。凸面镜是发散镜，它所成的像是正立缩小的虚像。古人对凸面镜成像特征有清楚的认识，《墨经》说：“鉴团，景一”，就很准确地揭示了这一特征。由于凸面镜成缩小正像，它所能照到的景物范围也就比平面镜大，古人利用这一特点，巧妙地选择镜面曲率，使一枚小凸面镜也能照出人的全貌来。北宋沈括有一段话，对此有清晰的说明：

“古人铸鉴，鉴大则平，鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大，凸则照人面小。

小鉴不能全观人面，故令微凸，收人面令小，则鉴虽小而能全纳人面。仍复量鉴之小大，增损高下，常令人面与鉴大小相若。此工之巧智，后人不能造，比得古鉴，皆刮磨令平，此师旷所以伤知音也。”（《梦溪笔谈》卷十九）

沈括正确说明了镜面凸起程度与其成像大小之关系，虽然他慨叹当时一些制镜工人不懂其中道理，但他的说明则无疑有助于让公众了解凸镜成像这一规律。

与平面镜和凸面镜相比，凹面镜成像情况最为复杂：当物位于球心之外时，生成倒立缩小的实像，像的位置在球心与焦点之间；当物位于球心与焦点之间时，生成倒立放大的实像，像在球心之外；当物位于焦点之内时，生成正立放大的虚像，像位于镜后。古人没有实像虚像概念，他们观察凹镜成像，注意的是像的倒正和大小。《墨经》对凹面镜成像有过探讨：

《经》：“鉴洼，景一小而易，一大而正。说在中之外内。”

《说》：“鉴：中之内，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而必正：起于中缘正而长其直也。中之外，鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小，而必易：合于中而长其直也。”

《经》文的记载未能将成像三种情况完全记录下来，但《经说》的描述则涵盖了这三种情况。这表明墨家的观察还是很细致的。另外，墨家还对凹面镜成像机理提出了自己的解释：“说在中之外内”，就是他们的解释。这里的“中”应该是指凹镜焦点，因为它决定了像的倒正。墨家解说的内涵与后世沈括所说的格术，本质上是一致的。对此，本书已有专文论述，这里就不去多说了。

日体远近大小之辨

在中国光学史上，有一件重要事情，那就是关于日体远近大小的争辩。这一争辩的起源是众所周知的“小儿辩日”故事，据《列子·汤问》记载，故事梗概是这样的：

“孔子东游，见两小儿辩斗。问其故，一儿曰：‘我以日始出时去人近，而日中时远也。’一儿以日初出远，而日中时近也。一儿曰：‘日初出大如车盖，及日中，则如盘盂，此不为远者小近者大乎？’一儿曰：‘日初出沧沧凉凉，及其日中，如探汤，此不为近者热而远者凉乎？’孔子不能决也。两小儿笑曰：‘孰为汝多知乎！’”

一般认为，《列子》成书于晋朝，但其所取之材多系周秦旧事，就本条而言，桓谭《新论》亦述及此事，因而我们可以相信，先秦时期人们已经提出了这一问题。

孔子是人文学者，对这一问题不发表意见，是可以理解的。但他的缄默并没有影响到天文学家们的热情，从西汉开始，就有人发表意见了。据《隋书·天文志》记载：

“桓谭《新论》云：汉长水校尉平陵关子阳，以为日之去人，上方远而四傍近。何以知之？星宿昏时出东方，其间甚疏，相离丈余。及夜半在上方，视之甚数，相离一二尺。以准度望之，逾益明白，故知天上之远于傍也。日为天阳，火为地阳，地阳上升，天阳下降。今置火于地，从旁与上诊其热，远近殊不同焉。日中正在上，覆盖人，人当天阳之冲，故热于始出时。又新从太阳中来，故复凉于其西在桑榆间也。”

两小儿辩日，各依据不同物理原理，一方持视物近则大、远则小之说，另一方则执距火近者热而远者凉之论。关子阳赞成前者，而对后者作了修改。他说太阳在中午确实比早上离人远，但“日为天阳”，不比地上凡火，凡火上升，“天阳下降”，“日中正在上，覆盖人，人当天阳之冲，故热于始出时。”文中提到的“以准度望之”，或者是关子阳的想象，或者是他测量不确，因为以仪器实测的结果，与关子阳之论是相矛盾的。

东汉王充则支持第二个小儿的观点，主张“日中近而日出入远”。在天文学上，王充赞成平天说，认为天与地是两个平行平面，太阳依附在天平面上运动。中午时，日正在人之上，就像直角三角形的直角边；而早晨傍晚之际，日斜在两侧，相当于三角形的斜边，故此“日中近而日出入远”。至于视像大小的变化，是由于“日中光明，故小；其出入时光暗，故大。犹昼日察火光小，夜察之火光大也。”（《论衡·说日篇》）

关子阳、王充都认为太阳早晨中午与人的距离有变化，这与浑天说者不同。浑天说主张“日月星辰，不问春夏秋冬夏，昼夜晨昏，上下去地中皆同，无远近。”（《晋书·天文志》）这样，浑天家们对这个问题的解说，就只能立足于太阳与人距离不变这一前提之上。这与现代科学的认识，倒是有一致之处。

浑天家张衡对此提出了自己的见解，《隋书·天文志》引其《灵宪》云：

“日之薄地，暗其明也。由暗视明，明无所屈，是以望之若大。方其中，天地同明，明还自夺，故望之若小。火当夜而扬光，在昼则不明也。月之于夜，与日同而差微。”

张衡与王充的立论依据一样，都是着眼于亮度及反差的变化。他们注意到的

这个因素，的确是造成日月视像变化的一个重要原因。从物理学上我们知道，同样大小的物体，亮度大的看上去体积也要大一些，这种光学上的错觉，叫做光渗作用。张衡与王充所注意到的，就是光渗作用对这一问题的影响。他们二人结论的不同，则是由于他们所信奉的宇宙结构学说不同所致。

晋朝束皙进一步探究了这一问题，他认为太阳在旁边与在人头上方大小没有变化，之所以看上去大小不同，是由于各种原因造成的。他说：

“……旁方与上方等。旁视则天体存于侧，故日出时视日大也。日无小大，而所存者有伸仄，仄而形小，伸而体大，盖其理也。又日始出时色白者，虽大不甚；始出时色赤者，其大则甚；此终以人目之惑，无远近也。且夫置器广庭，则函牛之鼎如釜；堂崇十仞，则八尺之人犹短；物有陵之，非形异也。

夫物有感心，形有乱目，诚非断疑定理之主。”（《隋书·天文志》）

束皙的论述，涉及到三种因素的作用。“旁视则天体存于侧，故日出时视日大。”说的是旁视与仰视的差别，是生理原因；“日始出时色白者，虽大不甚；始出时色赤者，其大则甚”，这是亮度与反差的不同，是光渗作用；“物有陵之，非形异也”，指的是视觉背景上景物的陪衬作用，属于比衬原因。现代有关方面的研究表明，造成晨午视像大小变化的原因，基本上也就是这三条。由此可见，束皙的论述是相当完备的，他的结论“物有感心，形有乱目，诚非断疑定理之主”，是完全正确的。

束皙之后，梁代祖暅对这一问题也做了探讨，他说：

“视日在旁而大，居上而小者，仰矚为难，平观为易也。由视有夷险，非远近之效也。今悬珠于百仞之上，或置之于百仞之前，从而观之，则大小殊矣。”（《隋书·天文志》）

祖暅的阐发，并未逾越束皙的论述，但他把傍视与仰视的差别讲清楚了。至于早晨中午太阳凉热的不同，祖暅的解释与关子阳相类似。这种解释实际上是对太阳入射角变化的涉及，因而也潜含了合理成分。祖暅在解释中还提到了热量的累积效应，这也是正确的。

后秦姜岌的论述，把古人对这一问题的研究，提到了一个新的高度。他说：

“余以为子阳言天阳下降，日下热，束皙言天体存于目则日大，颇近之矣。浑天之体，圆周之径，详之于天度，验之于晷影，而纷然之说，由人目也。参伐初出，在旁则其间疏，在上则间数。以浑检之，度则均也。旁之与上，理无有殊也。夫日者纯阳之精也，光明外曜，以眩人目，故人视日如小。及其初出，地有游气，以仄日光，不眩人目，即日赤而大也。无游气则色白，大不甚矣。地气不及天，故一日之中，晨夕日色赤，而中时日色白。地气上升，蒙蒙四合，与天连者，虽中时亦赤矣。”（《隋书·天文志》）姜岌的贡献主要

体现在两个方面，其一，他把理论探讨与仪器观测结合了起来，“以浑检之，度则均也”，通过仪器观测证实了天体早晨与中午其角距离没有变化这一事实。其二，他用“地有游气以仄日光”的原理，解释了“晨夕日色赤，中时日色白”的原因。这里所涉及的是大气吸收与消光现象。从物理学上我们知道，大气中所含有的气体分子、灰尘、小水滴等对太阳光有一定的散射作用。清晨和傍晚，太阳光是斜射在地面上的，它所通过的大气层比起中午时候要厚得多，这时散射作用也就强得多，能够到达地面的主要是那些穿透能力强的长波长光，即红光和橙光。这就是姜岌所说的“晨夕日色赤，中时日色白”。姜岌用“地有游气，以仄日光”之说解释这种现象，虽然未能具体揭示其形

成机理，但他的做法，无疑为走向正确认识这一现象的道路架起了一座桥梁。

海市蜃楼

海市蜃楼，简称蜃景，是一种大气光学现象。当光线经过不同密度的空气层，发生显著折射或全反射时，把远处景物映显在空中、海面或地面，从而形成各种光怪陆离的奇异景象。对于海市蜃楼成因，现代科学已有完备解释，但是在古代，人们对之有什么样的认识呢？

海市蜃楼以其奇异的景观，引人注目，因而很早就被人们所发现，并记录了下来。《史记·天官书》说：“海旁蜃气象楼台，广野气成宫阙。”《汉书·天文志》也有类似说法。后世对海市蜃楼进行观察和记载的人员更多，有关古籍比比皆是。从而为我们得以窥视大自然昔日的风貌，留下了可信的记录。

但是，我们的目的不在于此，我们所关心的是，古人究竟是如何解释海市蜃楼的形成原因的。综观古人有关论述，他们的认识主要可分为五类（参见王赛时，“中国古代对海市蜃楼的记载与探索”，《中国科技史料》，1988年第4期）。

一类是蛟蜃吐气说。蛟指传说中的蛟龙，蜃指海中一种蚌蛤。这种说法在汉晋书中常可见到，是古代的传统观念，信奉者很多。例如《博物志》即曾提到，“海中有蜃，能吐气成楼台。”后世文人引述这一说法者甚多。古人缺乏相应的科学知识，提出这种解释是可以理解的，而且此说隐喻海市蜃楼与水有关，并非没有一点合理成分。但无论如何，它毕竟是一种虚构的学说，经不起时间的检验。人们经过长期观察与研究，逐渐对这种说法产生了怀疑。宋朝苏轼有《登州海市》诗，内容为：

“东方云海空复空，群山出没空明中，荡摇浮世生万象，岂有贝阙藏珠宫？心知所见皆幻影，敢以耳目烦神工。”

这里描述了海市蜃楼景观，指出它是幻景，“岂有贝阙藏珠宫”一句特别说到蜃气不能成宫殿。沈括《梦溪笔谈》也详细记述了登州海市蜃楼情景，最后指出：“或曰蛟蜃之气所为，疑不然也。”正是在对海市蜃楼不断观察和研究过程中，蛟蜃吐气说逐渐被人们放弃了。

另一类是沉物再现说。此说依据桑田变海理论，认为由于岁月变迁，某些城池、物体沉沦于地下或海中，没有散开，一旦遇到合适条件，它们还会在原地显现出旧时风貌来。明代郎瑛《七修类稿》卷四十一云：

“登州海市，世以为怪，不知有可格之理。第人碍于闻见之不广，故于理有难穷。观其所见之地有常，而所见之物亦有常，又独见于春夏之时，是可知也。古云桑田变海，安知海市之地，原非城郭山林之所？春夏之时，地气发生，则于水下积久之物而不散者，熏蒸以呈其象也。故秋冬寂然，无烟无雾之时，又不然矣。观今所图海市之形，不过城郭山林而已，岂有怪异也哉！”

郎瑛是从桑田变海的学说和海市蜃楼多发生于春夏之时的观测经验出发提出这一主张的。他认为“春夏之时，地气发生”，把沉积于水下城池物体的像携带了出来。清钱泳《履园丛话》卷三谈到高邮湖市，也有类似看法：“按高邮湖本宋承州城陷而为湖者，即如泗州旧城亦为洪泽湖矣，近湖人亦见有城郭楼台人马往来之状。因悟蓬莱之海市，又安知非上古之楼台城郭乎？则所现者，盖其精气云。”这些解释，从今天科学的观点来看，当然是不能成立的，但它毕竟是古人为探究海市蜃楼成因所做的一种猜测，有它自己的推理依据，不可简单视其为荒唐。

再一类是风气凝结说。此说认为海市蜃楼是自然的风和海上的气凝结而成。明徐应秋《玉芝堂谈荟》卷二十三说：“海市，海气所结，非蜃气。”叶盛《水东日记》卷三十一说：“海市惟春三月微微吹东南风时为盛。……其色类水，惟青绿色，大率风水气旋而成。”陈霆在《两山墨谈》卷十八中说：“城廓人马之状，疑塘水浩漫时，为阳焰与地气蒸郁，偶尔变幻。”阳焰，指在日光中浮动的水气和尘埃。这些说法把海市蜃楼的形成与气的作用联系，摆脱了传统神化的圈囿，向科学的边缘迈进了一步。古人没有空气密度的概念，也不知道光线通过不同密度的空气会发生折射，因而不可能提出科学的海市蜃楼成因理论。他们能提出风气凝结说，已经不容易了。

还有一类是光气映射说。此说主张海市蜃楼是大气与日光映射所致。明王士性在《广志绎》中描述了他对海市蜃楼的了解：“近看则无，止是霞光；远看乃有，真成市肆。”他已经将海市蜃楼的形成与光的作用相联系起来。而陆容在《菽园杂记》卷九中则进一步明确提出了这一学说：“登莱海市，谓之神物幻化，岂亦山川灵淑之气致然邪？观此，则所谓楼台、所谓海市，大抵皆山川之气，掩映日光而成，固非蜃气，亦非神物。”这种解释，把气与光联系起来，比起风气凝结说来，又前进了一步。

最后一类是水气映照说。明末方以智在其《物理小识》卷二“海市山市”条讨论过蜃景，说：“泰山之市，因雾而成，或月一见。……海市或以为蜃气，非也。”张瑶星曰：“登州镇城署后太平楼，其下即海也。楼前对数岛，海市之起，必由于此。每春秋之际，天色微阴则见，顷刻变幻。鹿征亲见之。岛下先涌白气，状如奔潮，河亭水榭，应目而具。”揭暄在方以智、张瑶星这些描述基础上，提出了水气映照说。他注解《物理小识》此条说：

“气映而物见。雾气白涌，即水气上升也。水能照物，故其清明上升者亦能照物。气变幻，则所照之形亦变幻。”

揭暄提出这一见解，与他的形象信息弥散分布说（参见本书相关篇目）分不开。他认为，“地上人物，空中无时不有”，其形象信息遍布于空中，“空中一大镜，水沕窗隙，则转映之小镜也。”即水面窗孔等，可以将散布于空气中的地面物体的形象映照出来，水气与水性能一样，因此也能照出物来。被水气照出的物，就是海市蜃楼。揭暄、游艺在《天经或问后集》中，对水气映照说做了更清楚的说明：

“水在涯埃，倒照人物如镜；水气上升，悬照人物亦如镜。或以为山市海市蜃气，而不知为湿气遥映也。”

揭暄等提出的水气映照说，距近代科学所认识到的海市蜃楼成因理论，相去还远。但与古代其他学说相比，则最为科学。揭暄等解释的是上现蜃景。我们知道，在海洋上，由于海水蒸发以及冷水流经过等因素影响，会使得海面上大气形成上暖下冷的逆温现象，这加剧了空气层的下密上稀，这时上面密度小的空气层的确就像一面镜子一样，将远处的景物反射出来，形成海市蜃楼。所以，揭暄等人的理论在某种程度上来说是比较接近于近代科学的认识的。

中国古代对海市蜃楼成因的解说，除此五类之外，尚有其他一些说法，但都没有达到近代科学的认识水平。19世纪中晚期，系统的西方光学知识逐渐传入我国，其中对海市蜃楼的解说建立在光的折射知识基础之上，与近代科学的认识相一致，为我国科学界所接受。至此，我国传统的海市蜃楼成因学说，也就最终只剩下其永久的历史价值了。

红光验伤

在中国光学史上，有一件事情值得一提，那就是北宋沈括在其《梦溪笔谈》卷十一中提到的红光验伤。原文为：

“太常博士李处厚知庐州慎县，尝有殴人死者，处厚往验伤，以糟馘灰汤之类薄之，都无伤迹。有一老父求见曰：‘邑之老书吏也。知验伤不见其迹，此易辨也。以新赤油伞日中覆之，以水沃其尸，其迹必见。’处厚如其言，伤迹宛然。自此江淮之间官司往往用此法。”

本条所记，是老书吏多年的验伤经验。一般说来，被殴之处即使没有外伤，也应该有内伤，与内伤相伴的是皮下瘀血的存在。皮下瘀血一般呈青紫色，在日光下有时看不清楚。李处厚碰到的就是这种情况。他采用老书吏的办法，用红油伞罩在用水浇着的尸体上，日光一照，“伤迹宛然”，观察得清楚多了。

这种做法道理何在呢？

从物理学上我们知道，可见光的波长范围约在红光的0.77微米到紫光的0.39微米之间，这中间依次有橙、黄、绿、蓝、靛等色光。太阳光是这些色光的组合，呈白光，就验伤而言，它与青紫光之间反衬度不大，因而不易辨别。老书吏用红油伞罩尸，这实际是用红油伞作为滤光器，从日光中滤取红色波段的光。红色波段光在可见光中波长最长，而皮下瘀血部分一般呈青紫色，青紫光在可见光中波长最短，这样一来，瘀血部分与照射光之间的波长差增加，这就提高了它与周围部分的反衬度，从而就比较容易观察到。由此，《梦溪笔谈》这一条，是我国关于滤光应用的早期记载。

至于以水沃尸，大概是为了增加皮肤透明度，使得皮下伤痕更容易被观察到。

引文中有“以糟馘灰汤之类薄之”之语，对于“馘”字，学界一直未得善解。因为“馘”本义是指肉块，而这里不可能用肉块来涂抹。几年前，李志超发现唐代《酉阳杂俎》酒食条中有“酪、馘、醇，浆也”之说，浆指酒浆。后来，他又发现，《汉书·食货志》讲酒政时曾提到“糟馘”二字，唐人颜师古注解“馘”时，认为它是一种酒浆。由此，李志超认为，到唐代，馘、馘二字已被人混用，先是段成式，到了宋代，又有沈括。沈括所说的“糟馘”，是指由糟制取的液体（李志超，“《梦溪笔谈》‘红光验尸’的文字考证”，《天人古义》，河南教育出版社，1995年版）。李志超之说是可信的。那么，为什么要以糟馘或灰汤之类薄之呢？王锦光等指出：“可能是因为灰汤是碱性，可以去油脂，使皮肤变白，因而增加皮下异色的透过效果；糟为醇类，也有类似作用。”（王锦光、洪震寰，《中国光学史》，湖南教育出版社，1986年版，95—96页）

《梦溪笔谈》引述的这件事情，在历史上很引人注目。很多书籍都记载过此事，其中南宋宋慈《洗冤集录》的描述，则发展了这种方法：

“验尸并骨伤损处，痕迹未见，用糟、醋泼覆尸首，于露天以新油绢或明油雨伞覆欲见处，迎日隔伞看，痕即见。若阴雨以热炭隔照。此良法也。”

在这段文字中，以新油绢覆观，是在滤光材料上的发展，而“阴雨以热炭隔照”，则是以人造红色光源照射，这与红油伞滤光的效果是一致的。宋慈是中国古代法医学集大成者，由他来实现对“红光验伤”的这些改进，是合乎逻辑的。

古人对“红光验伤”问题的重视，与古代社会对法医检验手段的需求有关。就使用范围而言，它属于法医检验领域；就涉及原理而言，则非用光的反衬度概念不足以作解。中国古代社会生活中涉及光的反衬度问题的还有其他例子。例如古代观测日食，有一种方法是“置盆水庭中，平旦至暮视之。”（唐《开元占经》卷九）由于水面对光的反射率不大，这可以大幅度减少阳光刺眼的强烈程度。但这种方法也不够完善，因为水的透明度高，如果水不深，盆底的漫反射光线就比较强，这使得像的反衬度变差，效果不好。所以后来人们改用油盆来观察。油面对光的反射率更小，而且油的透明度小，这使得盆底的漫反射光线变弱，增加了像的反衬度。同时，油的粘度大，反射面稳定，这样观察效果就好得多，因而成为古代观测日食的一种重要方法。这种方法与红光验伤一样，都是古人在长期实践中摸索出来的符合光学原理的科学方法，是光学史上的重要成就。

色散现象

色散是复色光分解为单色而形成光谱的现象。导致色散的原因，可以是复色光在通过介质时，由于介质对不同频率的光具有不同的折射率，使得各种色光的传播方向有不同程度的偏折，从而在穿过介质后，形成光谱排列。也可以是复色光在通过光学系统时，由于衍射和干涉作用，使得复色光分解。色散现象甚为常见，古人对之多有记述和探讨。一般说来，他们记述下来的，多属于大气光象和晶体色散的范围。

在古人观察到的色散现象中，虹是最常见的。据研究，早在殷代甲骨文中就有了虹的名称。《诗经·鄘风·蟋》专门以虹为描写对象，其中提到，“朝 于西，崇朝其雨。”，指虹；崇，此处同终。这句话意思是说，如果早晨在西方出现彩虹，那么下午就会下雨。这段话已经注意到了虹的出现与天气变化之关系，其描述也基本符合实际。

古人重视虹的出现，不仅仅是由于它与天气变化有关，更重要的是他们赋予虹很强的社会意义。例如，他们把社会风气的好坏与虹出现与否相联系，同时，也用虹作为占卜素材来预言战争的胜负，等等。这些，虽然属于迷信的范围，但也促使古人更加重视对虹的观察研究，从而在客观上促进了古代有关虹的知识的不增加。

古人在观察和研究虹的过程中，依据虹的颜色和形状对虹作了分类。蔡邕《月令章句》说：“虹，蜺也。阴阳交接之气，著于形色者也。雄曰虹，雌曰蜺。”唐代孔颖达在疏解《礼记·月令》篇时，对这种分类有具体说明：“雄谓明盛者，雌谓暗微者。”可见，古人把虹分作两类，一类色彩鲜艳明亮，叫虹；另一类色彩较为暗淡，叫蜺。这种分类，在某种程度上与现代所说的主虹副虹相当。所谓主虹，是指阳光射入水滴后，经过一次反射和两次折射所形成的光谱排列，它的色彩鲜艳，色带排列外红内紫，这叫做虹。所谓副虹，也叫做霓，是由阳光射入水滴经两次折射和两次反射所致，其色带排列方式与主虹相反。因为多了一次反射，所以光带色彩不如主虹鲜明。主虹副虹可以分别出现，也可以同时出现。《月令章句》说：“蜺 在于东，蜺常在于旁”，就是指的二者并出的情况。由此可见，古人的这种分类方式，是有其实实在在的观测内容的。

另外，有一种在雾上出现的虹，因为雾滴很小，所以虹色很淡，一般呈淡白色。古人把这也归类于蜺的范围。《说文解字》说：“霓，屈虹，青赤或白色，阴气也。”这里的定义，就包括了雾虹在内。

古人在观察中发现，虹的出现，需要一定的条件，而且必然是在与太阳相对的方位上。《礼记·月令》篇提到：季春之月，虹始见；孟冬之月，虹藏不见。这大致指明了虹出现的季节。《月令章句》的描写则更进了一步：虹蜺“常依阴云而昼见于日冲，无云不见，大阴亦不见。”这一描写是正确的。

在对虹生成原因的认识上，古人有多种说法。例如，“庄子曰：阳爻阴为虹。”（《艺文类聚》卷二）这是用阴阳学说作解。对阴阳的理解不同，对这句话含义也就有不同认识，但无论如何，它是古人对虹生成原因的探讨。还有古人认为虹是由其他天体转化而成的，例如，“《河图稽曜钩》曰：‘镇星散为虹蜺。’《春秋运斗枢》：‘枢星散为虹蜺’《尚书考灵曜》郑玄注曰：‘日旁气白者为虹。’”（《艺文类聚》卷二）这些，当然都不能成立。

经过长期探讨，到了唐代，人们对虹生成原因的认识有了巨大飞跃。唐初孔颖达为《礼记·月令》作疏时指出：“云薄漏日，日照雨滴则虹生。”这一条描写十分正确：日光从云缝里透出，照射在雨滴上，就生成彩虹。这里特别提出雨滴来，而不是一般的雨或水汽，也表现了其认识的深化。到了8世纪中叶，张志和在其《玄真子·涛之灵》中，除了指出“雨色映日而为虹”以外，还特别用模拟实验的方法来验证：

“背日喷乎水，成虹霓之状，而不可直者，齐乎影也。”

这里用实验方法，人为模拟了虹霓现象，直接揭示了虹霓的生成原因。在古人没有光的反射、折射及色散理论知识情况下，这是揭示虹生成原因的最佳方法。

《玄真子》提出的“而不可直者，齐乎影也”，具有深刻的科学内容。这是对虹呈现圆弧形原因的解说。“齐乎影也”，是指虹的色带每一点距观察者影子的方向都相等，要满足这一点，它只能呈圆弧形。这一说法是有道理的。在太阳光照射到雨滴上生成彩虹时，虹所在的平面与入射光垂直。换言之，太阳光的方向与虹圆形的轴线平行。而人影子的方向也就是太阳光的投射方向，由此，《玄真子》的说法是成立的。

在西方近代科学传入中国之前，人们对虹的认识，以张志和最具代表性。之后，人们无非是进一步去重复这个实验，观察得更为细致而已。

造成色散的原因很多，例如日光照射晶体也能导致色散。这一现象，远在晋朝时就已经为人们所发现。例如葛洪《抱朴子·内篇》卷十一就记载了五种云母，说它们在太阳光线照射下可以看到各种颜色。到了宋代，有关发现和记载就更多，例如北宋杨亿的《杨文公说苑》里，记载峨嵋山的菩萨石，说：“色莹白如玉，如上饶水晶之类，日射之，有五色。”这里所说的，实际就是天然晶体色散。但杨亿认为这种现象是由于峨嵋山有佛所致，则是错误的。南宋程大昌《演繁露》纠正了这一错误。程大昌认真观察了单个水滴的色散现象，体会到菩萨石的五色光形成原因与之是类似的，他说：

“凡雨初霁，或露之未晞，其余点缀于草木枝叶之末，欲坠不坠，则皆聚为圆点，光莹可喜。日光入之，五色俱足，闪烁不定，是乃日之光品著色于水，而非雨露有此五色也。……此之五色，无日不能自见，则非因峨嵋有佛所致也。”

日之光品著色于水，是说五色光彩源于日光，这是在向揭示色散本质靠近。由此将其与晶体色散相联系，认为二者本质上一致，这也有其合理成分。

对于晶体色散现象，古人记述很多，但限于古代科学发展水平的限制，在对其本质的解说上，长期以来并未逾越《演繁露》的水平。

明代晚期，我国对于色散的研究，开始受到西学影响。传教士利玛窦来华，他所携带的物件中就有三棱镜，并用其作过色散表演。这比起我国古人用“背日喷水”模拟虹霓的实验，当然要先进些。因为它可以稳定实验条件，控制实验过程，这有利于人们去探讨色散本质。即使如此，人们依然未能正确说明色散现象。例如传教士对色散现象的解释，就是从光所通过介质的厚薄立论的，这当然是错误的。

在前人探索的基础上，明末科学家方以智对古代色散知识作了总结性记载，他说：

“凡宝石面凸，则光成一条，有数棱则必有一面五色。如峨嵋放光石，六面也；水晶压纸，三面也；烧料三面水晶，亦五色。峡日射飞泉成五色，人

于回墙间向日喷水，亦成五色。故知虹霓之彩、星月之晕、五色之云，皆同此理。”（《物理小识》卷八）

他全面罗列了各种色散现象，包括天然晶体、人造透明体及虹霓、日月晕等，认为它们本质上相同。这种说法是有道理的，因为上述现象，今天看来都是白光的色散。

进入清代以后，人们对色散现象依然进行着探讨，有关色散的知识继续在积累，但对色散的解说仍然不大明白。一直到了 19 世纪中叶，张福僖翻译《光论》，以光的折射、反射原理去说明色散，我国人民才正确掌握了有关色散的一些基本知识。

人工取火方法

火对于人类的生存和延续具有无与伦比的重要性。最初人们是从自然界的火中（例如雷电引起的森林大火）获取火种，通过维持火种不灭的方法达到利用火的目的。现代挖掘的北京人居住过的洞穴中，有厚达数米的灰烬层，就表明了这一点。

随着人类的进化，人们从利用自然火并保持火种不灭，逐渐发展到了人工取火。人工取火的发明时间及过程，现在已经说不清了。《韩非子·五蠹》篇说：“上古之世，……有圣人作，钻燧取火，以化腥臊，而民悦之，使王天下，号之曰燧人氏。”这启示我们想到，古人最早的取火方法，大概是通过摩擦生热而实现的，这就是所谓的“钻木取火”。

钻木取火需要一定的技巧。尽管《庄子·外物》已经提到，“木与木相摩则然（燃）”，但直接拿两段木头摩擦，却很难使其燃烧，所以清儒俞樾在注解这句话时说：“淮南原道训亦云两木相摩而然，但两木相摩，未见其然。”不过，如果掌握了技巧，实现钻木取火并非难事。解放前，我国一些兄弟民族还保留着原始的人工取火的方法，如苦聪人的锯竹法，海南岛黎族人的钻木法等，这证明古人关于钻木取火的说法是可信的。

古籍中关于钻木取火的传说并不罕见，但描述其具体取火方法的文献资料却很稀少，明末方以智《物理小识》卷二的“石竹火”条，为我们提供了一条有关此内容的可贵记载：“破石以钢镰刮之，则火星出，纸媒承之即燃。取火于竹，以干竹破之，布纸灰而竹瓦覆上，竹穿一孔，更以竹刀往来切其孔上，三四回，烟起矣。十余回，火落孔中，纸灰已红。”

方以智记述的钻木取火方法，有其独到之处。他使用的木材是干竹，干竹易燃。把干竹剖开形成两个竹瓦，在其中一个放上纸灰，再把另一个盖上，竹瓦上凿孔，用竹刀在孔上反复切摩，切摩下来的竹屑温度很高，从孔中落下，堆在纸灰上，纸灰传热性差，燃点低，堆积在一起的竹屑热量不易散发，堆积到一定程度，达到纸灰燃点，纸灰开始燃烧，实现取火目的。这里所用的纸灰应是纸张初步燃后剩余的灰片，这些灰片还包含一些碳的成分，可以维持短期重新燃烧。不能把纸灰理解成纸张完全燃烧后的灰烬，因为灰烬不具备重新燃烧的能力。

方以智的记载具有很高的价值，当时他作为明朝遗臣，为躲避清廷，曾流落于岭南一带，这一条也许就是得益于他在岭南时的见闻，反映了少数民族的取火经验。

方以智在本条中还提到，“破石以钢镰刮之，则火星出，纸媒承之即燃。”这是我国古代另一种流行的取火方法。这种方法产生于铁器出现后，大约在春秋战国时期。它是用铁制火镰敲击坚硬的燧石，因摩擦、敲击而剥落的铁屑具有很高的温度，这些铁屑表面因氧化燃烧而生成火星，用易燃的纤维如艾绒承接这些火星，即可取火。这种利用火镰石取火的方法因其简便易行，而成为古代最常用的取火方法。

中国古代还曾有过“以珠取火”之说，有关文献记载最早见于《管子·侈靡》篇：

“珠者，阴之阳也，故胜火。”（原注：珠生于水，而有光鉴，故为阴之阳。以向日则火烽，故胜火。）

引文中的注语，据说出自房玄龄，也有人认为是尹知章所为，总之是唐代人

的见解。《管子》原文只是提到了“珠胜火”，而注语则明确了这是用珠取火。珠通常指珍珠，但珍珠不透明，不能对日取火。不过，这里的珠如果理解为石英或其他透明物体，由于各种因素作用使之呈现圆形，透明而有光泽，这就构成了一个凸透镜，可以对日聚焦取火。但这与“珠生于水”之说又有矛盾。看来注者对于“以珠取火”这一事实是肯定的，但对于具体内容则并不清楚，因而才做了这样的注解。

西晋时期，著名博物家张华在《博物志》中说：“取火法，如用珠取火，多有说者，此未试。”这表明用珠取火之说，传闻很广，但使用却不广泛，这大概是由于当时缺少玻璃透镜，因而很难觅得适于取火之珠的缘故。东晋王嘉《拾遗记》卷八记载一富豪失火事件，说该富豪“以方诸盆瓶设大珠如卵，散满于庭，谓之宝庭，……旬日火从库内起，烧其珠玉十分之一，皆是阳燧干燥自能烧物。”这里的“阳燧”，指的是透明的珠。王嘉认为是这些珠向日取火而导致了这场火灾。《拾遗记》在内容上可归于志怪类小说，但王嘉在这一条的推测则是合乎科学道理的。

到了唐代，透镜的使用渐多，不断有凸透镜从国外传来，《旧唐书》卷一九七记载说：

“林邑国，汉日南象林之地，……贞观初遣使贡驯犀。四年，其王范头黎遣使献火珠，大如鸡卵，圆白皎洁，光照数尺，状如水晶。正午向日，以艾承之，即火燃。”这里所说的火珠，显然是凸透镜。凸透镜具有聚焦作用，可以对日取火，这是它当时被作为贡品奉献的重要原因。火珠之事，在《南史》、《梁书》、《魏书》中也都有记载，这表明随着中外文化交流的进展，以珠取火方法也逐渐普及了起来。

在以珠取火方法普及之前，大概由于玻璃透镜的难得，启示古人想到，如果以具有透明性能的冰做成透镜形状，岂不也能向日取火。《淮南万毕术》说：

“削冰令圆，举以向日，以艾承其影，则火生。”

这条记载，语言清晰而准确，“削冰令圆”，讲的是冰透镜的制法；“以艾承其影”，艾是易燃物，“影”毫无疑问是指焦点。这一条，不管是古人实践的记录，还是他们的设想，它反映了汉代人们已经具有明确的透镜取火知识，这是可以肯定的。

那么，用冰制成的透镜究竟能否用于取火呢？答案同样是肯定的。清末郑复光曾经就此做过模拟实验，他用一个壶底稍微凹陷的锡壶，壶中装满热水，在开凿出的冰块上旋斲，得到晶莹透亮的冰透镜，然后用其向日取火，获得成功。他总结用冰透镜取火的要领说：“但须日光盛，冰明莹形大而凸稍浅（径约三寸、外限须约二尺），又须靠稳不摇方得，且稍缓耳。”（《费隐与知录·削冰取火凸镜同理》）郑复光的经验是有道理的。我们知道，透镜的集光本领是其口径与焦距之比（相对孔径）的平方，这样，口径大的透镜，有利于集光本领的提高。另一方面，凸起程度浅则焦距大，焦距大不利于集光，对此，郑复光接着解释说：“盖火生于日之热，虽不系镜质，然冰有寒气，能减日热，故须凸浅径大，使寒气远而力足焉。”原来，这是考虑到冰有寒气，寒气下行，所以要焦距稍大些，以减轻冰透镜寒气的作用，使得取火容易成功。

古代另一种光学取火方法是利用凹面镜反射聚焦取火。古人把凹面镜叫做阳燧。《考工记》“金有六齐”中提到“鉴燧之齐”，郑玄注曰：“鉴燧，

取水火于日月之器也。”《周礼·秋官》：“司烜氏掌以夫燧，取明火于日。”这里的燧即指阳燧。因为阳燧具有对日取火的功用，古人对之非常重视。《礼记·内则》中有“左佩金燧”、“右佩木燧”之记载，就是一则证明。金燧即阳燧，木燧应为钻木取火之具，供阴雨天使用。汉代文献中对阳燧取火具体做法有详细记载，《淮南子·天文训》说：“阳燧见日则燃而为火。”东汉高诱注曰：“阳燧，金也。取金杯无缘者，熟摩令热，日中时以当日下，以艾承之，则燃得火也。”《说林训》说：“若以燧取火，疏之则弗得，数之则弗中，正在疏数之间。”《说林训》强调在取火时，火媒离镜面不宜太远或太近，而应当放得远近适当，即放焦点上。这里隐含了焦距的概念。王充《论衡·率性篇》云：“以刀剑之钩月，摩拭朗白，仰以向日，亦得火焉。夫钩月非阳燧也，所以耐取火者，摩拭之所致也。”这段话表明，即使像“刀剑之钩月”这类呈凹面形的金属反射面，只要“摩拭朗白”，使之具有良好的反射性能，同样可以对日取火，不一定非要专门的“阳燧”不可。这说明人们对于凹面镜取火的物理过程有了进一步的认识。

透镜聚焦取火出现以后，也有人把透镜叫做阳燧。但一般说来，古人所说的阳燧取火，通常都指的是利用凹面镜的反射聚焦取火。

在实现人工取火过程中，古人对引火材料也很重视，除了前面提到的艾绒、纸媒等，还有一种非常值得一提的引火材料——发烛。宋代陶谷《清异录》说：“夜有急，苦于作灯之缓，有智者批杉条，染硫黄，置之待用。一与火遇，得焰穗。既神之，呼引光奴。今遂有货者，易名‘火寸’。”元代陶宗仪《辍耕录》也提到这种引火材料，把它叫做“发烛”，并说，“周建德六年，齐后妃贫者以发烛为业。”根据这些记载，所谓“发烛”，就是在一小木片上沾上一段熔融状的硫黄。硫黄燃点低，可燃性强，一遇红火即可燃成明火，不易熄灭。如果陶宗仪所述不虚，则在南北朝时“发烛”已被制作成商品供应。“发烛”是一项很重要的发明，为人们的生活带来很大方便，因而沿用时间很长。直到19世纪，欧洲发明了依靠摩擦直接发火的火柴，后传入我国，因其集发火与取火功能于一身，使用起来极为方便，这才逐步取代了传统的引火柴。

传统测温方法

定量测试温度是温标系统建立和温度计发明之后的事情。在此之前，人们没有温度概念，也就不可能存在现代意义上的温度测量。

但是，冷热现象是客观存在，古人在生产和生活中不可避免要大量接触，这就带来一个问题：如何判定物体的冷热？在这方面进行的长期摸索，使得中国人逐渐积累起一套传统的定性判定温度高低的方法。

人们在判定温度高低时，首先是依靠自己的感觉。我国古文献中描述物体冷热程度的词汇很丰富，从低温到高温依次用冰、寒、凉、温、热、灼等表示。这套术语，就是跟人们的主观感觉密切相关的。实际上，不管世界上哪个民族，在日常生活中需要判定物体的冷热时，没有不以自己的直接感觉作为主要测试手段的。

这种以人体的直接感觉作为判定物体冷热程度的方法，在中国古代也曾有过自己十分值得称道的实践，那就是北魏贾思勰在《齐民要术》中的记叙。贾思勰在该书《养羊》篇的“作酪法”中提到，要使酪的温度“小暖于人体，为合宜适”。在“作豉法”中更提到“大率常欲令温如腋下为佳”，“以手刺之堆中候：看如腋下暖。”这些，都是以人体体温为比对标准，判定待测对象冷热程度是否符合要求。人体体温一般变化幅度不大，而腋下体温又是人体各部分中较为稳定的，以腋下体温为标准，判断结果自然就比较准确。所以，贾思勰提出的以腋下体温为标准的判定方法，是合乎科学道理的。

古人在判定物体冷热程度时，还采用过另一种方法：观察热效应引起的物态变化。《吕氏春秋·慎大览·察今》篇的一段描写，就属于这类方法：

“审堂下之阴，而知日月之行，阴阳之变；见瓶中之冰，而知天下之寒，鱼鳖之藏也。”

这涉及到通过观察水的物态变化来粗略判定温度范围，它有一定的科学道理。我们知道，在大气压保持不变情况下，水的相变温度是恒定的。一般情况下，大气压变化幅度不大，水的相变温度基本上也保持不变，这样，通过观察瓶水结冰与否来粗略判定温度范围，原则上是可行的。

《吕氏春秋》记述的这种方法，在后世文献中常被提及。《淮南子》中就有类似的说法。《淮南子·说山训》说：“睹瓶中之冰，而知天下之寒。”《兵略训》说：“见瓶中之水，而知天下之寒暑。”见到瓶中之冰，可以知道气温之低，而冰化为水，则又昭示着气温的回升。由此可见，古人还是比较看重这种方法的。这种方法比起凭主观感觉判定物体冷热，是种进步，因为它是建立在客观因素的基础之上的。而凭主观感觉判断，则易受人所处状态影响，从而导致作出错误判断。例如，刘向《新序·刺奢》讲述了一个故事，就涉及于此。故事说，春秋时期，卫灵公在天寒地冻之时，要大兴土木，修造池苑。臣下劝谏说：天气寒冷，这时兴工，会冻伤民夫。卫灵公表示怀疑，反问道：天气冷吗？臣下说：您身着狐裘，座上熊褥，室内还有炉子，自然不冷。可是民众衣不蔽体，鞋不履脚，他们当然是很冷的。这里卫灵公对外界气候判断的失误，就是由于他自身所处状态的温暖所致。但《吕氏春秋》所记叙的这种方法，却可以不受观察者本身所处状态冷暖的影响。如果卫灵公能够运用这种方法，去看一看室外瓶中的水是否结冰，也许他就不会再产生修凿池苑的念头了。

在古代的测温术中，还有一种方法值得一提，那就是“火候”，用于对

高温状态的判断。“火候”的实质是通过观察炉火颜色来大致判断炉温。这一方法与古人的熔炼技术同步发展，是古人冶炼经验的结晶。古代的铸工在熔铸青铜的实践中，摸索出了一套掌握熔炼火候的简便方法，《考工记》中最早记载了这套方法的具体内容：

“凡铸金之状，金与锡，黑浊之气竭，黄白次之；黄白之气竭，青白次之；青白之气竭，青气次之，然后可铸也。”

“金”，指铜。铜与锡，冶炼出来的是青铜合金。这里讲的是冶炼过程中焰色的改变。《考工记》的描述是合乎科学道理的。在熔炼金属时，炉温不同，焰色也不同，这决定于熔炼过程中产生的气态金属原子的发射光谱，也与辐射背景有关。金属里含有碳、钠之类杂质，它们的汽化点不同，在加热过程中，随着汽化物产生的先后不同，炉中也就呈现出不同的焰色。开始加热时，矿料附着的碳氢化合物和一些杂质等燃烧而产生黑浊气体。炉温继续升高，焰色转为黄白，这是由于金属中含有的钠原子汽化发光所致。再继续加热，焰色转为青白，这时汽化的金属原子以锌为主，锌在高温下燃烧生成白色氧化锌。在 1200 °C 左右，锌将彻底挥发，这时，“炉火纯青”，炉温足够高，可以用来浇铸了。由此可见，这种通过观察炉火焰色来大致判定炉温的方法是可行的。时至今日，在某些冶炼过程中，仍然采用观察焰色判定炉内化学反应进程，配合仪器仪表的监测进行操作。

我国传统的测温方法，只能粗略判定温度的变化。17 世纪，欧洲发明了一些重要科学仪器，其中包括温度计。这一发明经传教士之手传入我国，引起我国学者兴趣，官方和民间都有人去实践制造“测温器”。之后又经过漫长的发展演变，我国才逐渐普及了采用有固定温标划分，不受气压变化影响的新型温度计，从而使得对温度的测量最终走上了更为科学的道路。

秋石炼制

炼制秋石，最早可以追溯到东汉末，魏伯阳的《周易参同契》上有“淮南炼秋石”的记载。到了唐代，炼丹盛行，炼制秋石也不例外，白居易曾作“思旧”诗一首，其中有“微之炼秋石，未老身溘然”之句，以怀念诗友元微之；成书于唐代的炼丹书《许真君石函论·日月雌雄论》中，有“不言咽唾成金液，不炼小便为秋石”的记载，可见，至迟到唐代，已经有人用人尿作原料炼制秋石了。而当时炼制的方法很可能是火炼法。这种火炼法，据唐慎微的《证类本草》记载，主要分两步，第一步是蒸干，这是一个将小便加热蒸浓而减少剂量的过程，也是分解尿素除去性味恶劣的杂质的过程，在最后蒸干的残渣里，磷酸钙、磷酸镁、草酸钙、碳酸钙、食盐等以致密形式析出，而激素、色素等其他成分混于残渣里。第二步是火煨，这是将蒸干的残渣细研成粉末，放入合子内固济后，用火煨烧，去尽黑烟秽气，制得质坚色白的秋石。北宋杰出的科学家沈括著述的《苏沈良方》指出，“凡世之炼秋石者，但得火炼一法而已。”“火炼秋石，人皆能之，煎炼时须大作炉鼎，鼎炼数日，臭达四邻。”可见，火炼法是一种原始的、严重污染环境、有待改进的炼制方法。所以，到了宋代，人们创造了阴炼法和阳炼法，而成书于11世纪60年代的《苏沈良方》中关于“秋石方阴炼法、阳炼法”的描述，是我国现存最早的炼制秋石方法的完整记载。

关于阳炼法，沈括云：

“小便不计多少，大约两桶为一担。先以清水掇好皂角浓汁，以布绞去滓。每小便一担，入皂角汁一盞。用竹篦急搅拌，令转千百遭乃止。直候小便澄清，白浊者皆淀底。乃徐徐撇去清者不用，只取油脚，并作一担桶。又用竹篦子搅百余匝，更候澄清，又撇去清者不用，十数担不过取得浓脚一二斗。其小便，须是先以布滤过，勿令有滓。取得浓汁，入净锅中煎干，刮下捣碎，再入锅，以清汤煮化，乃于笊箕内，丁淋下清汁，再入锅熬干，色未洁白，更准前滴淋，直候色如霜雪即止。乃入固济砂盒内，歇口，火煨成汁，倾出，如药未成窝，更煨一两遍，候莹白五色即止。细研入砂盒内固济，顶火四两，养七昼夜，久养火尤善，再研……”

就是这个秋石方阳炼法，英国科学史学家李约瑟博士和鲁桂珍博士经过多年深湛的研究，于1963年宣称：“在10—16世纪之间，中国古代医学化学家以中医传统理论为指导，从大量的人尿中成功地制备了相当纯净的性激素制剂（秋石方），并利用它们治疗性功能衰弱者……”美国芝加哥大学生殖内分泌学家威廉斯和雷迪评述说，“中国人在好几百年前就已经勾画出20世纪杰出的甾体化学家在20—30年代所取得的成就之轮廓。”日本科学史家宫下三郎经过系统的考证，指出，“1061年沈括记录的炼制方法是年代最早的，特别是利用皂角中的皂甙(saponin)与3—OH甾体化合物的沉淀反应，从人尿中提取某种雄性激素是划时代的。”而台湾大学教授刘广定则否定阳炼法制取的秋石为性激素，其主要依据可归纳为三点：一、不是所有的皂甙都能与甾体化合物形成沉淀的；二、制取秋石所用的原料都是童尿，几乎不含有性激素；三、秋石在常温下潮解，与甾体性激素的稳定性不吻合。1986年，中国科技大学张秉伦与孙毅霖选择了沈括当年提炼秋石的所在地安徽宣城作为实验场所，严格按照沈括在书中记载的步骤，对秋石方阳炼法进行了模拟实验，并对最终产物运用气相色谱——质谱联用仪、X射线衍射仪和X

射线荧光光谱仪进行物理检测以及化学检测，结果表明，阳炼法制取的秋石，不是甾体性激素，而是以硫酸钙、磷酸镁等无机盐为主要成分的药物。他们又进一步分析了皂角汁的成分，发现皂角汁中皂甙为三萜皂甙，而三萜皂甙与甾体化合物作用不能产生沉淀反应。中国古代医学化学家所以在人尿中加入皂角汁，张秉伦和孙毅霖认为，很可能是中国古人在炼制秋石时，把皂角汁作为一种去除人尿中污秽的洁净剂。

关于阴炼法，沈括云：

“小便三、五石，夏月虽腐败亦堪用，分置大盆中，以新水一半以上相和，旋转搅数百匝，放令澄清，撇去清者，留浊脚。又以新水同搅，水多为妙。又澄，去清者，直候无臭气，澄下秋石如粉即止，暴干刮下，如腻粉光白，粲然可爱，都无臭味为度，再研……”

秋石阴炼法简单易行，没有蒸发、升华过程，只需在人尿中和以新水即可。为什么要加水呢？孙毅霖认为，“尿本身是一种水溶性胶体，加入水以后，将水溶性胶体的浓度稀释，这样就促进了尿中磷酸根离子、草酸根离子和钙离子的沉淀。”通过秋石阴炼法模拟实验并将最终产物用理化手段加以检测，结果表明阴炼法秋石的主要成分是硫酸镁、磷酸钙等无机难溶药物。

到了明朝，炼制秋石进入鼎盛时期，各种炼制秋石的方法散见于明代出版的《本草纲目》、《遵生八笺》、《本草原始》、《药性大全》、《本草蒙筌》等二十一本医药书上。其中最有影响的炼制方法之一是石膏法，石膏法载于《本草蒙筌》，为明代著名药学家陈嘉谟首创，陈云：

“炼，务在秋时，聚童溺多着缸盛……每溺一缸，投石膏末七钱，桑条搅混二次，过半刻许，其精英渐沉于底，清液自浮于上，候其澄定，将液倾流，再以别溺满掺，如前投末混搅，倾上留底，俱勿差违……方入秋露水一桶于内，亦以桑条搅之，水静即倾，如此数度，滓秽洗涤，污味咸除，制毕，重纸封，面灰渗，待干成块，坚凝囫圇取出之。英华之轻清者，自浮结面上，质白。原石膏末并余滓之重浊者，并聚沉底下，质缁而暗面者留用，底者刮遗。”

石膏炼法与阴炼法相比较，有两个特点，一是使用童尿为原料，童尿比较纯净，可以避免成人尿中可能存在的多种疾病。二是使用了石膏末作为沉淀剂。现在已经知道，尿溶液是一种胶体溶液，而石膏末是一种难溶的电解质（其溶度积 $K_{sp}=2.45 \times 10^{-5}$ ），它可以破坏胶体微粒上的双电层，打破胶态系统内的稳定性，使大量悬浮在胶体溶液中的溶积度较小的无机盐得以沉淀。用理化手段对石膏炼法所得的最终产物加以检测，其主要成分与阴炼法所制得的秋石相差无几，基本上是以硫酸钙、磷酸镁、草酸钙为主的难溶无机盐。

明末以降，炼制秋石渐趋衰落，开始出现以盐取代人尿作为提炼秋石的原料。就是在今天，安徽省桐城县生产秋石所用的原料就是食盐，其工艺过程分两步进行，首先，用洁净泉水加热溶解食盐，滤去杂质，熬干后制成白色的秋霜。第二步，将秋霜装入瓷杯，覆以瓷盖，然后放在炉中炼烤2小时，待秋霜溶解为液体后取出，当冷凝成晶亮固体时，即成“秋石”。这种秋石的主要成分，经测定99.9%是氯化钠。

（孙毅霖）

抽砂炼汞

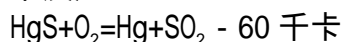
汞（即水银）在中国炼丹史上，具有无与伦比的重要地位，在古代社会生活中，也扮演着重要角色。有证据表明，早在战国及秦汉时期，水银已应用于许多方面，而且用量相当可观。那么，古人是怎样取得水银的呢？

最早有可能是取用天然水银。据现代地质科学考察，天然水银确实是存在的。但由于天然水银是丹砂被空气慢慢氧化生成的，因而生成速度慢，产量低，而且水银有流动性，比重又大，容易沿石缝渗入地下，因此天然水银不可能被大量取得。要取得大量水银，只有采用人工升炼丹砂一种方法。

丹砂主要成分是硫化汞（HgS）。有资料表明，早在西周前期，我国已开采丹砂。在漫长的使用丹砂的过程中，古人逐渐发现可以从丹砂炼制水银，并逐步形成了一套被他们称之为“抽砂炼汞”的烧炼水银技术。在从秦代到明末的近两千年中，这套技术不断改进，产率不断提高，工序逐步简化，生产规模日益扩大，最终达到了比较完善的状态。据赵匡华的研究，这一演进过程大致可分为四个阶段（参见赵匡华，“我国古代‘抽砂炼汞’的演进及其化学成就”，《自然科学史研究》，1984年第1期）。

1. 低温焙烧法

这是初始时期的方法，其特点是将丹砂直接在空气中低温焙烧，这时发生如下反应：



这个反应在 285 时开始发生，在 350 时就相当活泼了（汞的沸点为 357 ）。在秦汉以前，人们已经开始大量使用水银，在其他炼制方法未被发明前，他们只能采用这种焙烧方法。但有关的文献记载很少，只是在唐人所辑的《黄帝九鼎神丹经诀》卷十一中，对此方法才有简短描述和记录：

“丹砂、水银二物等分作之，任入多少。（置）铁器中或甘锅中，于炭上煎之。候日光长一尺五寸许，水银即出，投著冷水盆中，然后以纸收取之。”这一记载出现时间较晚，但文献记载落后于生产实际，这在科学史上是司空见惯的。

低温焙烧法有其严重不足之处，主要表现在：硫化汞分解较慢，产量低；未采取密闭措施，生成的水银会有显著蒸发，不仅产率低，而且操作者容易遭受汞中毒。所以，汉晋以后，这种方法就逐渐被密闭高温分解丹砂的抽汞法所取代。

2. 下火上凝法

这种方法是在密闭的铁质或土质的上下釜中加热丹砂。下釜中放置丹砂，上釜倒覆在上面，再以盐泥固济上下釜的合缝。当用炭火加热下釜时，丹砂分解，释出水银，水银升华后冷凝在上釜较冷的内壁上，开釜扫取，即可得到。这种方法最早见于东汉晚期炼丹家狐刚子的《五金粉图诀》中，原文如下：

“取朱砂十斤，酥一合。作铁釜，圆一尺，深半寸，平满，勿令高下不等。错之使平，以为釜灶，亦令正平。然后取青瓮，口与釜口相当者四枚，以酥涂釜，安朱砂于中。……然后以瓮合之，以羊毛稀泥泥际口，勿令泄气。先燃腐草，可经食顷，乃以软木柴燃之。……放火之后，不得在旁打地、大行、

顿足，汞下入火矣。从辰至午当下之。待冷或待经宿，以破毛袋取，着新盆中，以软苇皮裹新绵三四两许，好急坚缚，如研米槌状，于瓮中破之，安稳泻取尽罢矣。”

这一类型的炼汞法延续时间很长，唐初仍在应用。但这种方法有一主要缺点，即凝结在上釜内壁的水银聚集多了以后就会坠落，回到下釜中，甚至“放火之后，不得在旁打地、大行、顿足”，因此，需要不断开釜扫取。间歇生产，效率是比较低的。所以到唐代中叶以后，这种升炼方式便基本上寿终正寝，被上火下凝方式所取代。

3. 上火下凝法

这种方法将丹砂放置在容器上部，而使生成的水银溜下。在被冷却的抽炼装置下部承接水银。此法克服了上法的缺点，使生产率得以提高。至于具体的炼制形式，则基本上有三种，各有特色。

第一种为竹筒式。此法在《大洞炼真宝经》中有记载，该书今已散佚。唐代陈少微在《大洞炼真宝经九还金丹妙诀》中辑录该书本条如下：

“诀曰：先取筋竹为筒，节密处全留三节，上节开孔，可弹丸许粗；中节开小孔，如筋头许大，容汞溜下处。先铺厚蜡纸两重致（置）中节之上，次取丹砂，细研入于筒中，以麻紧缚其筒，蒸之一日。然后以黄泥包裹之，可厚三分。埋入地下，令筒与地面平，筒四面紧筑，莫令漏泄其气。便积薪烧其上—复时（一昼夜），令人透其筒上节，汞即流出于下节之中，毫分不折。”

这段文字所介绍的竹筒式炼汞方法（如图1所示），操作简便，

效率较高，成本很低，所以直到宋代仍受到炼丹家们的重视。

第二种为石榴罐式。此法记载于南宋方士白玉蟾所撰《金华冲碧丹经秘旨》，该书附有升炼仪器的图说。反应器分为上、下两部分，上部为一倒置的石榴状瓷罐，下部为一高筒状坩埚（如图2所示），有关操作过程为：

“石榴罐中盛辰砂十两，赤金（红铜）珠子八两，磁瓦片塞口，倒扑石榴罐在坩埚上，坩埚内华池水二分。”

所谓华池水，是一种含矿物质的醋。在升炼时，石榴罐与坩埚间合缝处用六一泥固济，加热石榴罐，朱砂分解，水银即溜入下面坩埚的醋里，操作非常简便。至于在丹砂中加入红铜，也有一定道理，因为在反应中铜可将丹砂中的汞置换出来，生成硫化铜，这有利于汞的生成。

第三种为未济式，是上两种方式的进一步发展。所谓“未济”，就是“火在上，水在下”之意。因为在《易经》六十四卦中，“上离（火）下坎（水）”之卦名为未济卦。所以，炼丹家们就把他们根据上火下凝法而设计的这种水火鼎称为“未济炉”，相应炼丹方式也就叫“未济式”了。未济式炉炼汞法的记载最早见于北宋苏颂的《图经本草》：

“（水银）出自丹砂者，乃是山中采粗次朱砂，和硬炭屑匀，内阳城罐内，令实，以薄铁片可罐口作数小孔掩之，仍以铁线罗固。一罐贮水承之，两口相接，盐泥和豚毛固济上罐及缝处，候干，以下罐入土，出口寸许，外置炉围火锻炼，旁作四窠，欲气达而火炽也。候一时，则成水银溜于下罐矣。”

文中提到要在朱砂中掺入炭屑，这是有道理的，因为炭对于HgS有很强的还原作用，有助于汞的生成。

南宋吴 所撰的《丹房须知》，描绘有这种“上火下水”的“未济炉”，对此，可参阅本书“炼丹器具”文。

未济式炼汞法延用时间较长，一直持续到元末明初。后来它被始于宋代的蒸馏法所取代了。

4. 蒸馏法

蒸馏法的特点是把水银蒸汽引出到加热炉之外冷凝、收集。在《丹房须知》一书中，也绘出了一种专为蒸馏水银而设计制造的、极为精美的“抽汞器”（参见本书“炼丹器具”条）。周去非《岭外代答》也记载了当时广西人用蒸馏法升炼“银朱”的设备：“桂人烧水银为银朱，以铁为上下釜。下釜为盘盂，中置水银；上釜如盖，顶施窍管，其管上屈，曲垂于外。二釜函盖相得，固济既密，则别以水浸管口。以火灼下釜之底，水银得火则飞，遇水则止，火燄体干，白变而丹矣。”

蒸馏法生产规模大，产率高，是古代升炼水银技术发展成熟阶段的产物。它自产生以后，很快得到推广和发展。明末宋应星在撰写《天工开物》时，只记录了蒸馏法升炼水银，而且每炉用朱砂竟达三十斤，规模很大，这表明蒸馏法已经发展到了它的完善地步。

金银分离术

黄金在古代社会生活中具有重要地位，人们重视对黄金的陶冶、提纯和加工，由之积累了大量与黄金有关的化学知识，其中颇为值得称道的成就是金银化学分离术。

我国古代把金矿分为沙金与山金两种，无论哪一种，都往往与银伴生，虽经冶炼，金银并不能分离。古代有所谓“黄银”，又名“淡金”，指的是金银矿，银的成分可达 20%。这样，冶炼后人们当然希望将其分离。另外，古人也有以牟利为目的，往金中掺入其他金属，而其中以掺入白银最为简易。要揭露这种欺诈行为，也需要钻研金银分离术。正是在这样众多的实践过程中，古人逐渐积累起自己独特的金银分离方法，这些方法大致可分为以下几种（参见赵匡华，“中国古代的金银分离术与黄金鉴定”，《第三届国际中国科学史讨论会论文集》，科学出版社，1990 年 3 月第一版）：

1. 黄矾—树脂法

这种方法目前所知最早见于东汉末炼丹家狐刚子所撰《出金矿图录》。该书是现存我国最早的一部金矿地质与冶炼学专著，可惜已成残卷，收录于《道藏》之中。书中多处提到黄金的精炼，其中涉及到金银分离问题。狐刚子采用的方法是，首先对金矿沙采取一定的冶炼处理，得到含银的黄金，然后，“即打成薄，用黄矾石、胡同律等分，和熔，和泥涂金薄上，炭火烧之，赤即罢。更烧，如此四五遍，即成上赤金。”文中“薄”即箔。黄矾石是硫酸铁，胡同律即胡桐泪，是胡杨分泌的树脂在土中留存多年而成，属松节油类。我们知道，硫酸与松节油类共煮，将还原出硫黄，硫黄在高温下易与银发生作用，生成硫化银。在狐刚子介绍的这个方法中，加热黄矾，会干馏出硫酸，硫酸与胡同律反应，产生硫黄，硫黄在高温下与金箔中的银起反应，生成色黑质脆的硫化银而从金箔上剥离下来，从而实现分离金银的目的。由此可见，这一方法是有其合理内核的。

2. 矾盐法

这种方法也为狐刚子所采用。在《出金矿图录》中，狐刚子提到了“炼锡灰坯炉法”，这是利用吹灰法冶炼金银的最早记录。狐刚子用这种方法得到含银的黄金后，接着指出将其中的银及残余的铅分离出来的方法：

“若不彻好者，即打薄炼金出色。……著铁镣上，以胡同律、黄矾石、盐等分，和醋煎为泥，涂金锡铤上，用牛粪火四周垒上，于锡上用牛粪火，四周食锡尽，唯有金在。”“打薄”，即打成金箔。文中提到“锡”，从上下文及狐刚子用法来看，指的是“黑锡”，即铅。在这个过程中银及残余的铅转变成 AgCl 和 PbCl_2 ， AgCl 熔点低，很快熔化，渗入外裹的灰泥中；黄矾在加热时释出 SO_3 ， SO_3 是氧化剂，可促进 AgCl 的生成，又可与胡同律相作用，生成硫黄，使部分银、铅生成硫化物，从而达到将其与金分离的目的。

矾盐法在我国沿用时间很长，明末清初方以智的《物理小识》对之尚有记述，即是明证。

3. 硫黄法

黄矾—树脂法的进一步发展，就是硫黄法。这种方法省去了那些中间步

骤，直接用硫黄在高温下参与反应，生成硫化银，而达到分离金银的目的。这种方法在唐代炼丹术著作中已稍露端倪，到宋代，更有了较为明确的记载。宋代炼丹术著作《修炼大丹要旨》上卷提到“分庚银法”，即属于此法。庚，指的是黄金。根据五行学说，庚属金，此处进一步借指黄金。该法具体操作过程为：“将淡金作汁，先用些小硫磺之提起，候冷，次下前药（案：指硫磺、伏火硝石、矾及盐的粉状混合物）盖面，上头用陈壁土和盐盖头，又用小锅盖之，铁线扎缚封固，通身用泥固之，大火鞣得十分好。候冷，破锅取出。其金作一块在内，银在外包了。打去外银，仍将金用前法，……再用药一半，再如此鞣之，又如前去银，……其金方净。”这种方法，已经具备了硫磺法的内涵。至于分出的硫化银，与铅共熔，则又可将银还原出来。这在同一著作中，也有记述。

到了元明时期，这种简易分离法盛行了起来。元末明初问世的《墨娥小录》（卷六）对之有完整描述：

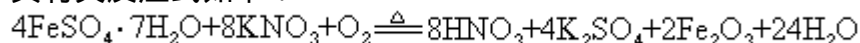
“分次庚（黄金）：以庚入坩锅中作汁，却以石灵芝为末，每一两投入三钱，触之。放冷破锅，取赤庚在底下。其银气却被石灵芝触黑，浮在面上。取出入灰，煎成花银，如此则庚银都不折也。”

这段话把分离的原理、步骤、现象都说得很清楚，而且还介绍了把分离出去的硫化银重新还原为银的方法。

到了清代，疏黄法还一直被人们采用着。

4. 矾硝法与矾硝盐法

中国古代在分离金银的实践中，广泛使用过矾类，而配合的药物则有所不同（如胡同律、盐）。在长期摸索的基础上，到了南宋时期，出现了矾硝法，即用矾和硝混合加热，以之分离金银。这种方法实质上已接近于使用硝酸，其有关反应式如下：



众所周知，硝酸可以很简便地将金、银分离，近代化学家在分离金银时，主要就是依靠硝酸。在这种方法中，反应前的混合物一经加热就会产生出硝酸来，所以不妨称这类混合物为“固体硝酸”。

如果往此混合物中再加入食盐，就成了矾硝盐法。矾、硝、盐混合加热，会释放出盐酸和硝酸，具有王水的功能，可以更有效地溶解白银，甚至消蚀黄金。这种方法最早见于南宋陈元靓编著的《事林广记·锻炼奇术》，该书介绍了七种炼金法，都是处理“次金”成“上金”的方法，其中第一法就是利用矾、硝、盐的混合剂。明初曹昭所撰《格古要论》，把这种方法介绍得更为清楚，他把焰硝、绿矾及盐的混合剂称为“金榨药”，说：“用焰硝、绿矾、盐留窑器，入干净水调和，火上煎，色变即止，然后刷金器物上，烘干，留火内略烧焦色，急入净水刷洗。如不黄再上，然俱在外也”。

应该指出，硝酸虽可强有效地溶解白银，然而在加热下它很快蒸发、分解，因此这两种方法，仅可溶解黄金表面的白银，所以曹昭说金之黄色“俱在外也。”

5. 硼砂法

此法兴起于明代，其完整记载见于《天工开物·五金》条，原文为：

“欲去银存金，则将其金打成薄片煎（剪）碎，每块以土泥裹涂，入坩

坩中，鹏砂（即硼砂）熔化，其银即吸入土内，让金流出，以成足色。然后入铅少许，另入坩埚内勾出土内银，亦毫厘具存也。”

这种方法的实质是利用硼砂与白银作用生成硼酸银，硼酸银熔后渗入土中，达到分离金银的目的。硼酸银再与铅共热，很容易将银重新置换出来。

以上是中国古代所采用的一些金银化学分离术及其演进的梗概。17 世纪初，借干馏绿矾—硝石混合物以制取硝酸的方法经传教士自欧洲介绍到中国。《徐光启手迹》对这种“造强水法”有过记述。及至 1638 年，李天经、汤若望等人译述《坤輿格致》（该书 1643 年刊出），其中就有如何分离金银的“硝酸法”，但由于种种原因，该法并未被普遍采纳，传统古法仍在因袭沿用。直到 19 世纪，近代化学逐步传入我国，传统的金银分离术才逐渐消沉下去，完成了它的历史使命。但在中国化学史上，它们将永远占有光辉的一页。

单质砷炼制

砷是化学元素周期表中的第 33 号元素。单质砷的取得，是中国化学史上的一项重要成就。

中国古代利用含砷矿物的历史十分悠久。古人常用的含砷矿物一般为雄黄、雌黄、礬石、砒石等。其中雄黄和雌黄是砷的两种硫化物，通常认为，雄黄为二硫化砷 (As_2S_2)，雌黄为三硫化砷 (As_2S_3)，它们和硫黄一起，合称三黄，在古代炼丹活动中具有重要作用。礬石和砒石是两个互有关系的名称。礬石一般指砷黄铁矿，又名毒砂，化学组成为 FeAsS_2 ，砒石承礬石名称而来，但它所包含的范围更广，除砷黄铁矿和天然砷华等以外，有时把某种雄黄、雌黄也包括在内。这些含砷矿物一经煅烧就会分解，升华出氧化砷（即砒霜 As_2O_3 ）。氧化砷一旦再与富含碳素的物质（如木炭、油脂、松香等）混合加热，就会析出单质砷来。此外，雄黄、雌黄与金属铁、锡等接触并一起被加热时，也会游离出砷来。这些反应并不困难，我国古代医药学家和方士们在其制药炼丹的实践中，接触到这些反应的机会很多，他们提炼出单质砷来，有一定的必然性。

那么，炼丹家们是什么时候在实践中提炼出了单质砷呢？

王奎克等人提出，炼丹家葛洪在其《抱朴子·内篇》卷十一《仙药》篇中，有一段话讲到炼丹术中处理雄黄的种种方法，同化学史上炼制单质砷的问题有关（参见王奎克、朱晟、郑同、袁书玉，“砷的历史在中国”，《自然科学史研究》，1982 年第 2 期）。这段话原文如下：

“又雄黄……饵服之法：或以蒸煮之；或以酒饵；或先以硝石化为水，乃凝之；或以玄胴肠裹蒸之于赤土下；或以松脂和之；或以三物炼之，引之如布，白如冰，……”

葛洪在这里列举了六种处理雄黄的方法：一是蒸煮，即用沸水或水蒸汽使之分解，生成氧化砷；二是制成雄黄酒；三是用硝石的水溶液去溶解它，生成砷酸钾 (K_3AsO_4)；四是在玄胴肠和赤土（含铁陶土）存在条件下，用水蒸汽去分解它；五是制成雄黄和松脂的混合剂；六是用三物与雄黄共炼，以提取其精华。与单质砷炼制有密切关系的就是第六法。

所谓三物，指的是葛洪在上文已经说过的硝石、玄胴肠和松脂。硝石在此为硝酸钾。玄胴肠为猪大肠，亦即猪脂。松脂是松香和松节油的混合物，同猪脂一样，都是含碳之物。

葛洪用这三物与雄黄共炼，得到的反应生成物“引之如布，白如冰”，这显然是后世称之为砒霜的氧化砷。但还有另一生成物葛洪没有提到，即单质砷。赵匡华等曾对此做过模拟实验（参见赵匡华、骆萌，“关于我国古代取得单质砷的进一步确证和实验研究”，《自然科学史研究》，1984 年第 2 期）。根据实验结果，当三物中硝石相对量较少时，生成物基本上都是单质砷的结晶颗粒。而当硝石相对量较大时，情况就不一样了。因为硝石是强氧化剂，猪脂和松脂都富含碳素，是强还原剂，再加入含硫的雄黄，与早期的火药配方几乎完全相同。这四种东西混合加热，容易发生爆炸。但即使爆炸，也会有氧化砷生成，同时还可以得到单质砷结晶。赵匡华进一步指出：即使在硝石相对量稍大情况下合炼，只有反应器密封不是很严紧；或硝石量适当；或加温不太高，那么也未必一定发生爆炸，但却可得到“引之如布，白如冰”

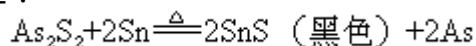
的氧化砷，同时兼得单质砷。

但是，这四种东西在一起合炼时，毕竟存在着爆炸的危险，由此，王奎克等认为，葛洪所说的“以三物炼之”，是指以三物分别与雄黄合炼，或者以其中一物与雄黄合炼后，再以反应后的生成物依次与其余二物合炼。他们通过分析和模拟实验得知，不管采用哪种炼法，所得的生成物都是单质砷和氧化砷。综合上述讨论，葛洪在客观上分离出过单质砷，这是可以肯定的。他的这一工作比西方类似的发现早约九百年。

唐代的孙思邈也曾在炼丹实践中分离出过单质砷。他在其《太清丹经要诀·伏雄雌二黄用锡法》中说：

“雄黄十两，末之。锡三两。铛中合熔，出之，入皮袋中揉使碎。入坩堝中火之。其坩堝中安药了，以盖合之，密固，入风炉吹之，令坩堝同火色。寒之，开，其色如金。”

按现代化学知识，熔融的金属锡（仅需 232 ）与雄黄会很快发生如下反应：



然后，当硫化锡与砷的混合物被放在坩堝中盖合、密固后，以猛火加热，砷即升华（613 ），而凝结在上坩堝（或盖）的内壁上。等坩堝冷却以后，即可开坩取出，得到单质砷。

需要指出的是，葛洪、孙思邈等虽然在客观上取得过单质砷，但他们并没有自觉意识到这种新物质的生成。真正有意识地去制取单质砷，并对其形态、性质加以描述的，是南宋时期的炼丹家们。他们是在改进砷白铜的工艺中做到了这一点的。

中国古代炼丹术中很重要的一部分是黄白术，即制作“黄金”、“白银”。方士们用一些药剂（点化药）与铜、铅、锡、汞等金属合炼，使之成为金黄和银白色的合金。他们把这种合金称之为“药金”和“药银”。当时所用的点化药中很重要的一类是雄黄、雌黄和砒黄，它们都是含砷矿物。我们知道，砷和铜、银等是可以生成银白、金黄的合金的。

但是，上述砷矿物与金属合炼时，很容易成烟飞散（高温下升华），于是炼丹家们想方设法使这些点化药剂转变成不易飞散的物质，他们称之为“伏火”。大约在南北朝以后，方士们已总结出经验，知道用砒霜点化铜、银要比采用雄、雌黄既简便又更见成效，于是在唐代以后便着重研究“伏砒法”。到了宋代，伏砒法又常被称为“死砒法”。在元人所辑的丹经汇编《庚道集》中，收集了不少宋人发明的“死砒法”，其中成书于南宋时期的《丹阳术》提到的一些“死砒法”，是对古代炼丹家炼得单质砷的明确记载，并且对其特征有清晰的描述。例如，该书介绍的“葛仙翁见宝砒”法：

“川椒、苍术、川狼毒、川练子、石韦、紫背虎耳。以信（案：即信石， As_2O_3 ）十两为末，一处研匀，入砂罐内，用水鼎打一盞水，大沸为度。候火消，

次日取出。色如银，可以作匱，立可点化。”

这里所说的这些中草药，均含有碳，以之与氧化砷合炼，反应产物就是单质砷。赵匡华等的模拟实验也证实了这一点。这一条还专门提到了生成物的特征，“色如银”正是对单质砷的描写。“立可点化”是指点化“丹阳银”，即砷白铜。

《丹阳术》中类似的记载尚有数条，兹不具录。从书中这些记载来看，南宋时期的炼丹家们不仅取得了单质砷，还描述了它的形态，而且制取目的

非常明确，就是要通过这样的炼制，改变信石的性质，使其成为新的物质，以使用其与铜一起熔化，点化制作丹阳银。可见，当时人们不仅炼制出了单质砷，而且认识到这是一种新的物质，对其特性也有所认识，这在砷炼制史上是一大进步。

玻璃制作

中国古代是否自行制作过玻璃，人们曾有过不同看法。过去，科技、考古、历史界曾流行一种“玻璃外来说”。后来，随着考古发掘的展开，战国时期的玻璃制品大量出土，科技工作者对这些制品用现代检测手段作了分析，为我们进一步探讨我国古代玻璃的源流及制作工艺等提供了重要依据。

从化验结果来看，我国古代玻璃是铅钡玻璃，这与西方钠钙玻璃有明显区别。从出土的玻璃器形制来看，它们富有中国特色。尤其是在湖南省一些古墓中出土的大量战国、西汉时的玻璃器，在质料上大都属于铅钡玻璃，在形制上则主要是一些具有中国民族特色的礼器、印章和器皿等，并且上面有中国民族装饰特点的纹饰及图案，这令人信服地证明这种玻璃品种是我国先民独创并自行发展起来的。

我们知道，铅基玻璃的基本助熔剂是 PbO ， PbO 与石英一起熔炼，在 900 左右便可以生成玻璃。 PbO 可以通过焙烧铅矿石得到。我国的铅矿石主要是方铅矿（ PbS ），这种方铅矿常与重晶石共生。重晶石的主要成分是 $BaSO_4$ 。由此，将这种共生矿进行氧化焙烧，所得到的煨矿灰中除 PbO 外，自然也含有 BaO ，以它们为原料与石英一起熔炼，得到的就是铅钡玻璃。

那么，这种铅钡玻璃究竟是怎么起源的呢？可以设想，这与古人冶铅的实践分不开。铅在古人生活中占有一定地位。用铅做成的胡粉在古代是一种化妆品，炼丹术也叫铅汞之术，这表明铅对于炼丹家们也至为重要。由此，古人必然很早就重视铅的冶炼。在春秋战国时期，人们是用陶质的坩埚、土釜或平敞的粘土炉子来氧化焙烧方铅矿以制取铅的，这样，当氧化铅生成后，一旦与陶质坩、釜内壁的粘土成分接触，只要器壁温度达到 900 左右，就会在坩、釜壁上生成一层铅釉。有学者曾就此做过模拟实验，结果完全证实了这一点（赵匡华，“试探中国传统玻璃的源流及炼丹术在其间的贡献”，《自然科学史研究》，1991 年第 2 期）。由于这种釉润滑光亮，敲击脱落后很像玉石，这就给古人以启示，使他们有意识地尝试用这种铅矿煨灰与粘土或石英砂一起熔炼。摸索的结果，他们会发现，用石英砂炼制得到的成品质地润泽，光洁晶亮，这就得到了正式的原始玻璃配方。不过，用这种方法得到的玻璃因为烧制气温低，有大量气泡，且含有钡，因而透明度是比较差的。

传统玻璃的进一步发展，是无钡玻璃的出现。从古人的角度来看，既然铅矿煨灰可以烧制玻璃，他们自然也会尝试用提纯后的金属铅去烧炼，这就断绝了钡的来路。这种方法炼制出的玻璃由于原料中不再含有铅矿中附有的众多杂质，因而更加光洁晶莹，更像玉石，而且熔炼温度也有所降低。

传统玻璃的起源与古人的冶铅实践有关，但其发展演变则与炼丹家们的活动分不开。早在战国时期，中国的方士们就流行着“食金饮玉”可以长生的说法，所以炼丹术兴起后试炼珠玉（即玻璃）也就成为炼丹家们的活动之一。东汉王充《论衡·率性篇》说：“道人消炼五石，作五色之玉，比之真玉，光不殊别。”又说：“随侯以药作珠，精耀如真，道士之教至，知巧之意加也。”曾有人怀疑这里的烧炼五石是否意指烧炼玻璃，因为五石是否是指适于炼制玻璃的五种矿石，还不能肯定。但这些记述反映了道士们烧炼珠玉的活动，则是无疑的，而烧炼珠玉正是导致玻璃出现的直接来源，这是可以肯定的。

我国古代玻璃虽然起源时间很早（考古发掘中已有西周玻璃器出土），

但发展缓慢，而且长期保持自己固有的特点，这就是：表面光泽晶润，“比之真玉，光不殊别”，但透明度差，并且质地“虚脆不贞”（《汉书·西域传》颜师古注语）。这主要是由于化学成分、烧成温度这两个方面的因素决定了我国古玻璃自始至终属于低温铅钡玻璃的缘故。从主观方面来讲，古玻璃出现以后，成为炼丹术的副产品，被道士们从人工冶炼珠玉的角度出发去总结和实践，没有走上独立发展道路，更谈不上发展出一套成熟的玻璃制作技术来。

由于受制作目的和技术的影响，传统玻璃制品在古代社会生活中的应用范围受到很大限制，主要局限在礼器、装饰品以及冒充珍珠、宝石的珠子、戒指等。质地的轻脆易碎以及不耐高温，使得它很少被用作饮食器。透明度差，当然也就更谈不上制作光学玻璃了。

由于传统玻璃的这些局限，西方玻璃传入我国后，引起人们极大惊异，学者们视其为奇物异宝而加以记载。《汉书·西域传》记载说：“罽宾国……出珠、珊瑚、虎魄、璧流离。”罽宾国位于今阿富汗一带，璧流离指的就是玻璃。李志超认为该词对应于拉丁语 vitrum，是音译加上了意译的结果。李志超并且指出：古籍中对于 vitrum 的译法很多，例如《梵书》中的“吠琉璃”、《酉阳杂俎》的“毗琉璃”、《一切经音义》的“髀头梨”、“颇黎”等，都是 vitrum 及其派生字的音译。译名的多样化，正说明这类外来品与中国土产玻璃在性状上差异很大，以致中国人不知道它们是同一类物质，因而对之赋予了多种多样的名称。

因为传统玻璃制作技术的不成熟，提示我们对待古书上有关记载，要持谨慎态度。例如东晋王嘉的《拾遗记》说吴主孙亮用“琉璃”作屏，“甚薄而莹澈，使四人坐屏风内而外望之，如无隔，惟香气不通于外。”《西京杂记》说汉武帝造神物，“扉悉以白琉璃作之，光明洞澈。”这些记载，如果不是夸张之辞，那么文中的“琉璃”必然是从域外传入的玻璃，否则不会有那样好的透明效果。

文献中对于西方玻璃的传入，也常有反映。《艺文类聚》卷八十四“琉璃”条，对之有多处描写。史书中对域外“火齐珠”（玻璃透镜）的记载，更是屡见不鲜。古书《梁四公记》则记述了玻璃由海路传入的具体例子：

“扶南大舶从西天竺国来，卖碧颇黎镜。面广一尺五寸，重四十斤，内外皎洁。置五色物于其上，向明视之，不见其质。问其价，约钱百万贯。文帝令有司算之，倾府库当之不足。”

《梁四公记》一书，著者不明，有说为沈约，也有说为张说，总之它反映的是南北朝时期的事情。

不但玻璃成品，而且玻璃制作技术也传了进来。《北史·大月氏传》记载：

“太武时，其国人商贩京师，自云能铸石为五色琉璃。于是采矿山中，于京师铸之，既成，光泽乃美于西方来者。乃诏为行殿，容百余人，光色映彻。观者见之，莫不惊骇，以为神明所作。自此，国中琉璃遂贱，人不复珍之。”

这是说，玻璃制作技术传入以后，在中国的国土上也能造出令人叹为观止的玻璃来，从此人们对玻璃就不以为奇了。《北史》这段记载，也见于《魏书》，说的是北魏太武帝拓跋焘时代的事，大约发生于5世纪中叶。此外，两宋时的大食诸国、清代早中期的西欧传教士都曾将玻璃制作技术传入我国，对我国的玻璃制造产生了一定影响。由于国外技术的传入及工匠的努力，

我国人民最终还是掌握并发展出了一套成熟的玻璃生产技术，这是毫无疑问的。

大地传声

在中国物理史上，固体传声，尤其是大地传声的利用，值得提上一笔。

古人对大地传声现象的利用，主要集中在军事方面。成书于战国时期的《墨子》记载的埋坛入地以判断地下声源的方法，就是一个比较典型的例子。该书《备穴篇》在谈到敌军挖坑道攻城时的防守办法时说：

“穿井城内，五步一井，附城足。高地丈五尺，下地得泉三尺而止。令陶者为罍，容四十斗以上，固顺之以薄革，置井中。使聪耳者伏罍而听之，审知穴之所在，凿穴迎之。”引文中“固顺”二字含义不清，有学者认为“顺”字当作“”，“固之以薄革”，是说在坛口紧绷一层薄生革。整个这段话大意是说：当敌军挖坑道攻城时，守军在城中挖井，沿城墙每五步挖一口井，紧挨着墙根挖。遇到高地挖一丈五尺深，低地则挖到水位下三尺。让陶工烧制大坛子，每个容积在四十斗以上，坛口紧绷一层薄生革，放置井中。使听觉灵敏者伏在坛口谛听，就可以判断出敌方挖坑道的方位，从而使守军也挖坑道迎击。

《墨子》的这段话是在军事上利用大地传声现象的一个典范。当敌方挖坑道时，挖坑声沿着大地传播的能量远大于在空气中传播的能量，坛子就像一个拾音器，沿大地传播的声能传到坛子所在处，在坛中产生“交混回响”，形成较强的余音效果，容易被人听到。紧挨着墙根挖，是为了最大限度地接近声源。高地深挖，一方面可以增强监听效果，另一方面则可以使所埋坛子相互处于基本相同的水平深度，在判定敌方挖坑方位时不致产生太大误差。低地要将坛子埋在水面以下，是因为土壤孔隙被水充满后，传声性能更佳缘故。至于要“审知穴之所在，凿穴迎之”，则需要根据三四个相邻井内各个坛子的响度差来加以判断，单从一个坛子谛听不足以判断对方挖坑的方位。

《备穴篇》还介绍了另一种听声定位的方法，那也是利用大地传声特点，在地下埋坛谛听。具体办法是：

“埋两罍，深平城，置板罍上，板以井听。五步一密。”“”，有学者认为是“联”字之误。这段文字，用今天的话来解释，就是在一口井里埋两个坛子，坛口跟城基相平，其上放板（罍，音 qí，“其”的古体），使人侧耳伏板谛听。井的密度也是大约每五步一口。这种方法坛子埋设稍浅，易受干扰，传声效果不及前者。但因为是一口井里埋两个坛子，两个坛子之间稍有距离，根据它们的响度差可以大致判定声源的方向，再与相邻两个井里的坛声相比较，就可以比较准确地确定声源所处方位。所以这种方法在定向准确性方面要优于前者，而且操作简便。

类似于墨家所设计的这种地下声源定向装置，在古代战争中常被采用，例如宋代曾公亮撰述的兵家法典《武经总要》，就图文并茂地介绍了“瓮听”与“地听”两种设施。该书卷十二《守城篇》说：“瓮听：用七石瓮，覆于地道中，择耳聪人坐听于瓮下，以防城中凿地道迎我。”“地听：于地中八方，穴地如井，各深二丈，勿及泉，令听事聪审者，以新瓮自覆于井处，则凿地迎之，用熏灼法。”这些方法，史载者甚多，杜佑《通典》、茅元仪《武备志》等均有述及，是古代战争的传统方法。

古人不但利用大地传声特点判断地下声源方位，而用还利用这一特点侦察地面军事情况，《武经总要》卷六《警备篇》记载了相应的侦察方法：

“选聪耳少睡者，令卧枕空胡鹿，其胡鹿必以野猪皮为之，凡人马行在三十里外，东西南北皆响闻。其中每营置一二所，营中阔者置三四所，若孤镇铺栅各置一所，听子必频改易四，勿常定处所，仍以子将一人斡当，每日一替。”所谓空胡鹿，实际是用野猪皮绷起来的硬空筒，它相当于一个“拾音器”，当周围二三十里内有军马活动时，声响沿地面传来，在空筒内产生回响，被枕者感知，发出警报，就可以起到警备作用。因为声波沿大地传播时，其能量传输比在空气中要大得多，因此用这种方法监听的范围比直接在空气中监听也要大得多。

对于这种监听方法的原理，北宋沈括曾有过解释，他在其《梦溪笔谈》卷十九中说：

“古法以牛革为矢服，卧则以为枕。取其中虚，附地枕之，数里内有人马声，则皆闻之。盖虚能纳声也。”

矢服，指盛箭的箭筒。头枕箭筒睡觉，远处人马行动，可以听到，从而预做准备。沈括认为这是由于箭筒中间是空的，“虚能纳声”。这种说法，在某种程度上是对的。箭筒的功用，相当于一个拾音器，“中虚”是它能够拾音的主要原因。所谓“纳声”，包括两种情况，一是人马行动声音中总有与筒内空气柱相当的声波波长，从而与筒内空气柱发生共振。另外，对于大量不能发生共振的声音，光滑的箭筒内壁具有良好的声反射性能，这就使得在筒内形成较强的余音效果，便于为人耳所感知。但是这一切，都是以有声音传来为前提条件，所以沈括说的“虚能纳声”，尚未触及要害，这个问题的关键在于大地传声。

“虚能纳声”现象不但被古人用以接受大地传播的声音，而且还被用于消声或隔音。我国曾经出土过战国时期的空心砖，用这种砖砌成的建筑物就可以隔音。至于战国时人们是否已经有意识地这么做，现在还不能肯定，但是明末方以智《物理小识》卷一则明明白白地记载了这项技术。

“私铸者匿于湖中，人犹闻其锯锉之声，乃以瓮为瓮，累而墙之，其口向内，则外过者不闻其声。何也？声为瓮所收也。”

这是说，私自铸钱的人，怕被人发觉，藏匿于地洞（湖）之中，锯锉之声仍然会传出来，于是以瓮为墙，瓮口向室内，从室外路过者就听不到室内的动静了。《物理小识》的记载是切实可行的。由于叠砌的瓮墙具有多孔结构，其孔隙可以吸收声能，因此这种结构可以达到消声目的。方以智的学生揭暄在为此条作的注中，专门将此与枕地听声相提并论，表明他们也许窥到了这二者之间的某种联系。

共鸣现象

共鸣，物理学上也叫共振，是指一个物体振动时，另一个物体也随之振动的现象。发生共鸣的两个物体，它们的固有频率一定相同或成简单的整数比。

我国古人对共振现象发现很早。公元前三四世纪，《庄子·徐无鬼》就记载了调瑟时发生的共振现象：

“为之调瑟，废于一堂，废于一室。鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。

夫改调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动。”

引文中的“废”，是放置的意思。这段话讲述了两种现象，前者是说在弹宫、角等基音时，置于一室的诸瑟相应的弦也发生振动。这是基音与基音之间的共振。后者是说如果调一弦，使它和宫、商、角、徵、羽五声中任何一声都不相当，弹动它时，另一个瑟上二十五根弦都动了起来。这是基音与泛音之间的共振。第二种现象一般情况下较难以察觉到，古人能发现这一点，说明他们的观察是很细致的。

古人不但观察到了共振现象，还试图对之加以解释，这方面最具代表性的是西汉董仲舒，他在其《春秋繁露·同类相动篇》说：

“百物去其所与异，而从其所与同，故气同则会，声比则应，其验皦然也。试调琴瑟而错之，鼓其宫则他宫应之，鼓其商则他商应之，五声比而自鸣，非有神，其数然也。”

董仲舒认为具有相同性质的物体可以相互感应，之所以会鼓宫宫动，鼓商商应，是由于它们声调一样，这是必然现象，没有任何神奇之处。董仲舒能正确认识到这是一种自然现象，打破了笼罩在其上的神秘气氛，是有贡献的。

两汉以降，人们对共鸣现象有了进一步的认识，其中值得一提的是晋朝的张华，他把共鸣现象范围推广到了乐器之外。据传当时殿前有一大钟，有一天钟忽然无故作响，人们十分惊异，去问张华，张华回答说这是蜀郡有铜山崩塌，所以钟会响。不久，蜀郡上报，果然如此。

张华把铜山崩与洛钟应联系起来，这未必意味着他从共振的角度出发考虑这件事。用董仲舒“同类相动”学说也能解释：钟是铜铸的，铜山崩、洛钟应，是由于“同类相动”的缘故。可是，南北朝时宋人刘敬叔著的《异苑》中提及张华的另一件事，却明明白白是从共鸣角度作解的，事情的原委如下：

“晋中朝有人蓄铜洗澡盘，晨夕恒鸣如人叩。乃问张华。华曰：‘此盘与洛钟宫商相应，宫中朝暮撞钟，故声相应耳。可错（锉）令轻，则韵乖，鸣自止也。’如其言，后不复鸣。”

这里，张华不仅认定这是共鸣现象，找到了共鸣源，而且提出了消除共鸣的方法。我们知道，用锉子锉去铜盆的一部分，就能改变其固有频率，使它不再和原来的声音成某种频率比关系，这就制止了共鸣的发生。可见，张华提出的消除共鸣的办法是有道理的。

除了张华，一些有经验的乐师也掌握了这种消除共鸣的方法。韦绚撰的《刘宾客嘉话录》就记载了唐朝曹绍夔消除共鸣的故事。曹绍夔开元年间曾任管理朝廷音乐的“太乐令”，他有一个朋友是僧人，该僧房中有一磬，经常不击自鸣，僧人忧惧成疾。曹绍夔闻知，前去探问，发觉斋钟叩鸣时磬也嗡嗡作响，于是告诉僧人他有办法，并要僧人次日设宴款待。次日饭毕，曹“出怀中错（锉），磬数处而去，其声遂绝。僧问其所以，绍夔曰：‘此

磬与钟律合，故击彼应此。’僧大喜，其疾便愈。”曹绍夔消除共鸣的方法与张华如出一辙。

到了宋朝，沈括把古人对共振现象的研究进一步向前做了推进。他用实验手段探讨乐器的共鸣，其《梦溪笔谈·补笔谈》卷一说：

“琴瑟弦皆有应声：宫弦则应少宫，商弦则应少商，其余皆隔四相应。

今曲中有声者，须依此用之。欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。声律高下苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦震，此之谓正声。”

“正声”，指合乎声律中频率要求的声，在此指音高相差整八度的音，即基音和泛音。在乐器中，二者也存在共振关系，但不易发现。沈括的实验，就是为了证明这一关系。为此，他剪了一个小纸人，放在基音弦线上，拨动相应的泛音弦线，纸人就跳动，弹别的弦线，纸人则不动。这样，他就用实验方法，把音高相差八度时二弦的谐振现象直观形象地表现了出来。沈括的这个实验，比起欧洲类似的纸游码实验，要早好几个世纪。

沈括之所以能够成功地完成纸人共振实验，源于他对乐器共鸣现象的透彻了解。他在其《梦溪笔谈》卷六中也谈论过乐器的共鸣，说：

“予友人家有一琵琶，置之虚室，以管色奏双调，琵琶弦辄有声应之，奏他调则不应。宝之以为异物，殊不知此乃常理。二十八调但有声同者即应，若遍二十八调而不应，则是逸调声也。……逸调至多，偶在二十八调中，人见其应，则以为怪，此常理耳。”

二十八调，指当时民间燕乐常用的二十八种调式。逸调指在通用调式以外的调式。沈括指出：“二十八调但有声同者即应。”应的原因在于“声同”，这是常理。正是由于有了这种认识基础，他才能够设计并完成纸人共振演示实验。

沈括的实验对后人颇有影响。明末学者方以智就曾在其《物理小识》卷一中记述并发展了沈括的方法，他说：

“今和琴瑟者，分门内外，外弹仙翁，则内弦亦动。如定三弦子为梅花调，以小纸每弦贴之，旁吹笛中梅花调一字，此弦之纸亦动。曹师夔（案：即曹绍夔）磬，声不应钟，犹之茂先（案：张华）知铜山崩也。声音之和，足感异类，岂诬也者。”

这里已经把共振与否作为“和琴瑟”的一种标志了。方以智还明确概括道：声音之和，足感异类，即只要声音特性一致（频率相同或成简单整数比），在不同器物上也能发生共鸣。张华、曹绍夔的实践已经证明了这一点，方以智则明确指出他们的发现与乐器上的共鸣具有同样的本质，都是由于“声音相和”引起的。方以智的这些话，标志着人们对共鸣现象本质的认识又深入了一步。

电磁现象

对电磁本质的认识，是近代科学产生以后的事情，古人的相关成就则体现在对有关电现象和磁现象的记述与解说上，本篇我们也循此进行描述。

古人对电现象的观察和讨论主要集中于静电和雷电。静电引力现象在我国被发现甚早，成书于西汉时期的《春秋纬·考异邮》就曾说过：“慈石引铁，玳瑁吸”。玳瑁是一种海生爬行动物的甲壳，是一种绝缘体。指细小物体。玳瑁吸，只能指的是经过摩擦的玳瑁能够吸引微小物体，因而这是一种静电现象。

古人虽然发现了“玳瑁吸”，但他们对这一现象的解释却一点儿也不含电的概念。他们根本想不到这种现象与雷电在本质上相同。王充《论衡·乱龙篇》的阐述颇有代表性，他说：

“顿牟掇芥，磁石引针，皆以其真是，不假他类。他类肖似，不能掇取者，何也？气性异殊，不能相感动也。”

顿牟即玳瑁。王充认为玳瑁能吸引微小物品的原因在于它与被吸引物体具有相同的“气性”，所以才能互相“感动”。东晋郭璞在其《山海经图赞》中也有类似看法：“慈石吸铁，瑇瑁（玳瑁）取芥，气有潜感，数有冥会。”这类解说，实际上是一种“想当然”理论，因为只要彼此吸引，就可以说它们气性相同。这对人们理解这类现象实质，没有多大帮助。不过，此类理论可以使人避免步入神学之途，也有其一定的历史价值。

据《三国志》卷五十七，吴国虞翻年幼时曾经听说：“虎魄不取腐芥，磁石不受曲针。”虎魄，即琥珀，是一种树脂化石，绝缘性能良好，经过摩擦，可以吸引轻小物品。但是摩擦后的琥珀不能吸引腐烂的芥子，这是事实，原因就在于“腐芥”因为含水而具有导电性。不过，由于“磁石不受曲针”一语明显错误，我们还不能肯定“虎魄不取腐芥”一语究竟是古人在观察基础上得出的结论，还是他们想当然的结果。

古人不但发现了“琥珀拾芥”这一现象，而且还将这一现象用于实践，作为鉴别真假琥珀的标准。南北朝时的陶弘景在其所著《名医别录》中说：“琥珀，惟以手心摩热拾芥为真。”越具有明显静电性质的琥珀质量越高，陶弘景的这种鉴别方法是正确的。

静电现象多以摩擦为条件，摩擦起电有时还伴随着火星和轻微的声响，古人对之也有所发现与记载。西晋张华《博物志》云：“今人梳头、脱着衣时，有随梳、解结有光者，也有咤声。”张华所说的，就是人们在梳头、脱衣时因摩擦起电造成的电致发光、发声现象。唐段成式《酉阳杂俎》记叙过另一种电致发光现象：猫“黑者，暗中逆循其毛，即著火星”。这里选择黑猫，在暗处逆向摩擦猫身上的毛，是为了使火星更容易被观察到。使用白猫，虽然也能产生同样的起电效果，但火星不易察觉。类似的摩擦起电现象，后世还有很多记载，表明这是古人经常观察到的一种电现象。

古籍中还记载过另一种静电现象——尖端放电。《汉书·西域传》中有“元始中，……矛端生火”的记载。矛端生火，实质即为金属制的矛的尖端在一定条件下的放电现象。因为矛竖立在露天，倘若立矛之处地势突出，而又正巧碰到上空有带电云层，就有可能因放电而产生微弱亮光，从而被人们发现并记录下来。当然，古人只是观察到了这一现象，但并不明白其中的道理，他们的解释是：“矛端生火，此兵气也，利以用兵。”这成了用兵动武

的依据。古籍中类似记载还有一些，我们仅举此一例以见大概。

古人发现得最早的电现象当属雷电。雷电发生时，耀目的亮光及震耳的响声，使得即使处于蒙昧状态的原始人，对之也不会无动于衷。据此，要考察古人何时发现了雷电，是毫无意义之举。我们所关心的，是古人对雷电的成因及其本质的探讨。在中国古代，人们从未建立起现代科学中的电概念，也就不可能用正负电荷行为去解释雷电现象。古人是用阴阳理论去解说雷电的。《淮南子·地形训》多处提到：“阴阳相薄为雷，激扬为电。”意思是说，阴阳二气彼此相迫产生雷，相互急剧作用产生电。东汉王充《论衡·雷虚篇》也用类似的观点来解说：“盛夏之时，太阳用事，阴气乘之。阴阳分争则相校，校则激射。”历史上此类论述很多，是中国古代传统的雷电成因理论。这一理论从哲学角度来看是很精彩的，因为雷电确实可以认为是在性质上相反相成的矛盾两方面相互作用的结果。但是这一理论要发展成为近代物理学的雷电成因说，还有相当长的路要走。至于民间所谓打雷是雷神发怒之类迷信说法，当然就更不值一提了。

古人在观察雷电对物质作用的过程中，发现过一种奇异现象，古书对之记述甚多，而以沈括《梦溪笔谈》卷二十《神奇》篇的记述最具代表性，该篇记道：

“内侍李舜举家曾为暴雷所震。其堂之西室，雷火自窗间出，赫然出檐。人以为堂屋已焚，皆出避之。及雷止，其舍宛然，墙壁窗纸皆黔。有一木格，其中杂贮诸器，其漆器银扣者，银悉流在地，漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚钢，就刀室中熔为汁，而室亦俨然。人必谓火当先焚草木，然后流金石。今乃金石皆铄，而草木无一毁者，非人情所测也。”

沈括记叙的是当时一次雷击后的奇异现象：金属物体被熔化了，木器却安然无恙。屋内木架子上放着各种器皿，其中有镶银的漆器，银全部熔化流到地上，漆器竟然未被烧焦。有一把坚硬的宝刀，就刀鞘中熔化为钢水，而刀鞘则保持原样。沈括记叙的这些现象，可以用今天所知的电学原理加以解释：由于雷击属于高压放电，而高压放电可产生高频交变磁场，处于磁场内的导体因受磁场作用而在导体内产生涡旋电流，涡流大到一定程度就会将导体熔化，而非导体却“曾不焦灼”。沈括说这种现象是“非人情所测也”，这自然是由于受当时科学发展水平所限制的缘故。虽然如此，他把这一事实详细记录了下来，为我们理解涡电流现象提供了一个切实的历史实例，其史料价值是十分珍贵的。

对磁现象的认识，在我国也起源很早。在公元前4世纪的战国时期，《管子》书中已经有了磁石的概念。在公元前3世纪，《吕氏春秋·精通》已明确提及磁石能吸铁，说：“慈石召铁，或引之也。”而实际上，古人发现磁石吸铁的时间，肯定早于《吕氏春秋》的时代，因为《吕氏春秋》对磁石这一性质只是偶然涉及，并非专门论述。

到了汉代，人们对磁石吸铁的性质有了进一步认识，《淮南子·览冥训》说：“若以慈石之能连铁也，而求其引瓦，则难矣。”《说山训》说：“慈石能引铁，及其于铜，则不行也。”这表明，人们已经知道磁石虽能吸铁，但不能吸引其他一些物质。尤其是铜，虽然也是金属，但它不能受磁石吸引。同时代的《淮南万毕术》提到“磁石拒棋”实验，则是对磁排斥现象的涉及。

至于磁石为什么会吸铁，古人也是从元气学说角度作解的，认为它们具有相同的气性。这种解说比较粗糙，因为铁与铁、铜与铜，不能说它们气性

不同，但这同类物之间并不互相吸引。

中国古代磁学知识的另一成就是对磁体指极性的发现。这一发现的具体时间已经不可考了，一般认为，东汉王充《论衡》中提到的司南，就是利用磁体的指极性做成的指南器。这样，至迟在东汉时期，人们就已经认识到了磁体的指极性。实际时间当然更早。对磁体指极性认识的进一步发展，就导致了指南针的出现。指南针是我国古代四大发明之一，对世界文明起到了重大作用，这是众所周知的。

磁学知识的进一步发展，是发现了地磁偏角的存在。传统上人们认为宋代沈括首先肯定了这一现象，其《梦溪笔谈》卷二十四提到：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”这句话，前半部分讲的是人造磁体的磁化方法，后半部分则是对地磁偏角的涉及。后来，人们又发现，在更早些北宋杨惟德著的《荃原总录》中，也有关于磁偏角的记载。前段时间，又有学者指出，对磁偏角的认识，至迟不晚于唐代黄巢起义时期。当时唐朝宫廷大乱，钦天监有一监官叫杨筠松，流落在民间，他首先提出磁针所指的子午线与臬影所测不一致。这一发现比《梦溪笔谈》要早二百年（王立兴，“方位制度考”，《中国天文学史文集》，第五集，科学出版社，1989年版）。但由于杨筠松的身世夹杂着许多传说成分，这些传说又多出于堪舆家言，令人难以遽信，故此杨筠松发明磁针发现磁偏角之说，姑且可作为一说备案。

除了地磁偏角以外，北宋曾公亮作《武经总要》，其中提到的指南鱼，是利用地磁场将人工裁成的鱼形薄铁片加以磁化而制成的。值得注意的是，曾公亮特别提出，在磁化过程中，除了使鱼尾对正北方外，还要让其向下倾斜，以便取得最佳效果。我们知道，鱼尾向下倾斜，可以使鱼体更加接近地磁场方向，从而取得更好的磁化效果。这比较奇怪，古人没有地磁场概念，但他们却知道利用地磁倾角，这也许是由于在实践中善于总结经验的缘故吧。

磁屏蔽现象的发现，是中国古代磁学知识的又一成就。清初刘献庭在其《广阳杂记》中写道：“或问余曰：‘磁石吸铁，何物可以隔之？’犹子阿孺曰：‘惟铁可以隔之耳。’其人去复来曰：‘试之果然。’余曰：‘此何必试，自然之理也。’”刘献庭不主张通过实验加以验证，是不对的，但他把这件事始末记载下来，为后人提供了有关磁屏蔽的知识，则是可贵的。

古人对电磁现象的发现，有一项迄今还有实用价值，那就是对极光的观测与记录。我们知道，太阳不断向外发出高速带电粒子，这些粒子接近地球时，受地磁场作用而折向南北两极，与高层空气分子或原子相碰撞，使之处于激发态而发光，这就是极光。古人不知道这套理论，但他们观察到了极光并将其记录了下来。古书《竹书纪年》就记录了大约公元前950年的一次极光：“周昭王末年，夜清，五色光贯紫微。”这一记载涉及到该次极光的时刻、方位和光色，是比较详实的。据统计，在10世纪前，我国有年、月、日的极光记录有百余次之多。考虑到极光一般出现于高纬度地区，在中低纬度地区只是偶尔才能见到，这样的数字是不简单的，它表明了古人观察和记载的认真程度。同时期欧洲各国记录总共只有三十余次。我国古代的这些宝贵记录，为研究太阳活动和地磁变化等，提供了十分有价值的历史资料。

浮力应用

对浮力的认识和应用，是古代流体力学研究的重要内容。在这方面，中国古人积累了丰富的实践经验。

早在先秦时期，古人就对物体的浮沉特性有所认识，并在生产实践中有十分巧妙的应用。例如在《考工记·矢人》篇中，“矢人”在确定箭杆各部分的比例时，采用的方法是：

“水之，以辨其阴阳；夹其阴阳，以设其比；夹其比，以设其羽。”

就是说，把削好的箭杆投入水中，根据箭杆各部分在水中浮沉情况，判定出其相应的密度分布，根据这一分布来决定箭的各部分的比例，然后再按这个比例来装设箭尾的羽毛。这种根据箭杆各部分浮沉程度判定其相应质量分布的方法是合乎科学的，也是十分巧妙的。

《考工记·轮人》篇在规范车轮的制作时，也应用了水的浮力。为确保车轮“揉辐必齐，平沈必均”，“轮人”采用的办法是：“水之，以砥其平沈之均也。”意思是说，要测量木制轮子各处质量是否均匀，只要把它放在水中，测量其各处浮沉程度是否一致即可。如果浮沉程度一致（“平沈”），轮子各处质量分布必然是均匀的（“必均”）。

先秦时期人们不仅能应用浮力定性判定物体质量分布，还能应用浮力定量测定物体的重量。晋代的《符子》一书记载了这样一个故事：

“朔人献燕昭王以大豕，曰‘养奚若’。……王乃命豕宰养之。十五年，大如沙坟，足如不胜其体。王异之，令衡官桥而量之，折十桥，豕不量。命水官浮舟而量之，其重千钧。”

“浮舟量之”，就是利用水的浮力来测定这头其重无比的大猪的重量。如果《符子》的记载真实的话，这是我国古人定量利用水的浮力的一个绝妙的例子。由此发展下去，就是脍炙人口的曹冲称象的传说了。

古人在从经验角度利用浮力的同时，也从理论上对物体浮沉条件加以探讨。例如先秦典籍《墨经》就曾讨论过这一问题：

《经下》：“荆之大，其沈浅也。说在具。”

《经说下》：“荆：沈，荆之贝也，则沈浅，非荆浅也。若易，五之一。”

这里的“荆”，同形，指形体。“沈”，即沉。“具”，为器具，可泛指中空而有容积的物体。“贝”，当为“具”之误。《经》的意思是说：物体的形体虽然很大，但因其中空的，所以在水中下沉浅。《经说》则解释道：中空的物体在水中沉下的部分浅，这并非物体本身浅，而是沉下水的部分所受的浮力等于全部物体的重量，这就像在市场上交换东西，五件甲物可以换来一件乙物一样。从这些话语来看，墨家对物体在水中的沉浮条件，已经有所认识。当然，由于《墨经》用词的简略，对这一条也还存在不同的解释，但无论如何，我们说墨家已认识到物体所受浮力跟它沉入水下部分的体积有关，这总是可以成立的。

《淮南子·齐俗训》则以竹子为例，对此加以论述：

“夫竹之性浮，残以为牒，束而投之水则沈，失其体也。”

竹子是中空的，投于水中，自然浮起，故说“竹之性浮”。把完整的竹子破开，削成竹牒，束成一捆，投入水中，则下沉，原因在于“失其体也”。就是说，竹子重量可以做到不变，但做成竹牒以后，其体积比起原来大为减少，投入水中以后所受浮力也大为减少，于是就不能浮起。显然，《淮南子》已

经意识到物体所受浮力与其排水体积之间有着密切联系。

应该指出的是，无论《墨经》还是《淮南子》，都没有从定量角度揭示物体所受浮力与其排水量之间的关系。在其他中国古籍中，也未见到别人对此有清晰的论述。不过，这并不影响古人去巧妙地利用浮力。《宋史·方技传》记载了当时一个和尚怀丙巧妙利用浮力的一个例子：

“河中府浮梁，用铁牛八维之，一牛且数万斤。后水暴涨绝梁，牵牛没于河。募能出之者，怀丙以二大舟实土，夹牛维之。用大木为杈衡状钩牛。徐去其土，舟浮牛出。”

僧怀丙之所为，是利用浮力起重，可谓构思巧妙。古人利用浮力的例子还可以举出许多，诸如建造船只、船坞、浮囊、战争中发明“水雷”等，这里不再多说。

从物理学的角度来看，还需要一提的是古人利用浮力对液体比重的判定。古人在实践中发现，同一物体，浸在不同的液体中，它所受的浮力也不一样。唐代段成式作的《酉阳杂俎》，其《前集》卷十九提到：

“莲实，莲入水必沉，唯煎盐碱卤能浮之。”

造成这一现象的原因，显然是由于水和盐卤的浓度不同。受此事实的启发，古人发明了通过观察莲子的浮沉情况判定液体浓度的方法。李约瑟的《中国科学技术史》一书，在考证盐水浓度的测定法时，专门引用了11世纪姚宽所写的一段记事。姚宽在台州做官时，曾因调查盐商舞弊，每日用莲子试验盐卤。他选择较重的莲子供用，倘若十粒莲子，能由盐卤中浮出三四粒，就是浓盐卤。浮起的数目不足三粒，这盐卤就是稀薄不良的。若全体莲子都沉在卤底，则该盐卤稀薄至极，即使经过蒸发，也难以得到食盐。这种方法不但巧妙利用浮力，而且还包含了一定的数理统计思想。

元代陈椿在《熬波图咏》一书中记载了一种专门用于测盐卤的器具，也是用莲子测定的，叫做莲管：

“莲管之法，采石莲，先于淤泥内浸过，用四等卤分浸四处：最咸 卤浸一处，三分卤浸一分水浸一处，一半水浸一半卤浸一处，一分卤浸二分水浸一处。后用一竹管盛此四等所浸莲子四枚于竹管内，上用竹丝隔定竹管口，不令莲子漾出。以莲管吸卤试之，视四莲子之浮沉，以别卤咸淡之等。”

用这种仪器，已经可以对盐卤浓度进行分等了。这种“莲管”原理与现代的浮子式比重计相近，其中四枚莲子相当于比重不同的色球，根据这些小球的浮沉情况便可判断液体的比重。

明末方以智在《物理小识》卷七中记载了他的老师王虚舟对金、银、铜、铁在汞液中浮沉情况的观察：

“虚舟子曰：《本草》言金银铜铁置汞上则浮，此非也。铜铁则浮，金银则沉。金银取出必轻耗，以其蚀也。”

王虚舟的观察是准确的，这反映了古人对不同比重物体沉浮状态研究的深入。这段话还记述了汞对金、银的腐蚀作用，在化学史上也是有价值的。

仪器用具

炼丹器具

中国古代炼丹所用的器具主要有坛、丹炉、金鼎、神室、匱、丹合、石榴罐、坩埚、水银蒸馏器、研磨器、水海等。

坛，是安放丹炉的一座小土台，有一定的建筑式样，据吴悞撰写的《丹房须知》的描述，“坛高三层，各分四面而有八门（图1），南面去坛一尺，埋生朱一斤，线五寸，醋拌之；北面埋石灰一斤；东面埋生铁一斤；西面埋白银一斤。上去药鼎三尺，垂古镜一面，布二十八宿，五星灯前，用纯剑一口。炉前添不食井水一盆，七日一添。用桃木版一片，上安香炉。”在坛的周围，不仅埋有生朱、石灰、生铁、白银，而且还垂古镜、悬纯剑、用桃板。这显然是笃信道教的炼丹方士迷信，要炼出真丹必须驱鬼避邪，而镜、剑、桃木从它们各自所具有的实际功能与被人们想象出来的神秘功能相融合，成了驱鬼避邪的象征物。

丹炉，是用金属或土做的炉子。丹炉按炼丹方法的不同有各种不同的名称，不同的式样。宋人吴悞在其所撰《丹房须知》书中介绍了“未济炉”和“即济炉”，使人们对古代炼丹炉可以有一大致了解。

未济炉中的“未济”二字，源自六十四卦中的未济卦，未济卦乃“上离（火）下坎（水）卦”，也就是“火在上，水在下”之卦，取其意，未济炉就是一种“火在上，水在下”的炼丹炉。在《稚川真人校证术》以及《丹房须知》中都绘制了未济炉图（图2）。未济炉内鼎器的上部是药鼎，用来装朱砂和炭屑，药鼎外部围火锻炼。下部是贮水的鼎；水鼎的外部一般是灰土。水鼎上有一根横向贯通的管子，可以用来供给冷水，并导出蒸汽。用未济炉炼丹时，加热药鼎，使药鼎中的朱砂分解，生成的水银溜入下面水鼎的水中。未济炉炼丹延用的时间较长，大约兴自唐代中期，持续到元末明初。

既济炉，是一种“水在上，火在下”的炼丹炉。因为六十四卦中的既济卦，乃上坎（水）下离（火）卦，既济炉就是取“火在下，水在上”之意而命名。图3是《丹房须知》所载既济炉的示意图。中央有三脚形状像圆筒的是鼎，在此作反应室来用。上面是冷水盛器，起冷凝作用。在升炼水银时，鼎中放入朱砂等药料，用火在炉下对丹鼎加热，鼎内朱砂受热分解，释出水银，水银升华后冷凝在温度较低的鼎的顶部。这种使用既济炉进行下火上凝的炼丹方式，源于东汉末年，由于要不断地开釜扫取凝结于鼎内壁的水银，产量不高，所以到唐代中叶之后，这种升炼水银的方式已经居于次要位置。

鼎是一种用金、或银、或铜、或铁等不同材料做成的器具。鼎有两种，一种是火鼎，周围长环有火，做反应室用。一种是水鼎，用于盛水，使火鼎的一部分冷却。鼎的式样很多，有的形如锅釜，有的形如蓬壶。《上阳子金丹大要》绘有一幅“悬胎鼎”的示意图（图4），并有这样的一段说明：

“鼎周围一尺五寸，中虚五寸，长一尺二寸。状似蓬壶，亦如人之身形。”

分三层，应三方。鼎身腹通。直令上中下等，均匀入炉八寸，悬于灶中，不着地，悬胎是也。”

鼎的形制很多，这里仅介绍悬胎鼎一种，以示一斑。

神室，就是炼丹的反应室，各种炼丹的原料就是在神室里面发生反应的。神室用铅制成，体积很小，内径才一寸，形状如鸡蛋，能悬浮于水中。炼丹时，神室放在有水的金鼎中，金鼎受火气而使悬浮于水中的神室保持恒定的温度。由于铅制成的神室能溶于水银，所以《庚道集》中特别强调：“合（鼎）中神室可令打厚，不要薄了。”薄则容易被水银蚀穿导致漏药。

匱，也是炼丹反应室。匱中可以置神室。匱的形状不一，有的形如坩埚，有的状似葫芦，名称亦不同。在《庚道集》书中有的称“白虎匱”，有的名“黄芽匱”，在《铅汞甲庚至宝集成》里，有一幅“涌泉匱”的示意图（图5），匱中是鼎。

丹合，还是一种用来盛放丹砂的反应室，据《铅汞甲庚至宝集成》中绘制的丹合示意图（图6），丹合呈墨水瓶状，四周被火包围，丹合中的丹砂加热后生成水银，经丹合底部的石棉的孔滴入下部的水罐中，被水冷却为液体水银。丹合及水罐等放置于匱中。

石榴罐升炼器，实质上就是一种未济炉。升炼器分上、下两部分，上部为一倒置的石榴状瓷罐，下部为一高筒状坩埚。成书于南宋的《金华冲碧丹经秘旨》中附有石榴罐升炼器的示意图（图7）及其说明，原文如下：

“石榴罐中盛辰砂十两，赤金（红铜）珠子八两，磁瓦片塞口，倒扑石榴罐在坩埚上，锅内华池水二分。”

石榴罐与坩埚间合缝处用六一泥固济后，加热石榴罐，则其中朱砂分解，水银即滴入下面坩埚内的华池水（含矿物质的醋）里。

水银蒸馏器。成书于宋代的《丹房须知》中绘有一种炼丹家设计制造的较为复杂的水银蒸馏器（图8）。从结构上看，该器主体下半部分为加热炉，上半部分为反应室，盛放朱砂等药料。工作时，朱砂受热释出水银，水银蒸汽沿旁通管子进入左侧盛水容器，冷凝后集于水底。此器将冷凝器与反应室分开，提高了蒸馏效率，设计思想是很完善的。

《岭外代答》记载了另外一种水银蒸馏器，原文如下：

“桂人烧水银为银朱，以铁为上下釜，下釜为盘盂，中置水银；上釜如盖，顶施窍管，其管上屈，曲垂于外。二釜函盖相得，固济既密，则别以水浸管口。以火灼下釜之底。”

如果在这个装置的下釜中放置丹砂和炭，就可以升炼蒸馏水银了。

《墨娥小录》中也介绍了一种采用水银蒸馏器升炼水银的工艺：

“朱砂不拘分两，为末，安铁锅内，上覆乌盆一个，于肩边取孔一个，插入竹筒，固济，口缝合牢固，竹筒口垂入水盆水内，锅底用火。其汞亦有在乌盆上者，扫取之，亦有自竹筒流下来。”

由于蒸馏法生产规模大，水银产率高，很快得到推广和发展。到了明代末年，其他方法基本上已经被淘汰了。在宋应星编著的《天工开物》书中只记录了蒸馏器升炼水银（图9），而且每炉可以用30斤朱砂，蒸馏出21斤

水银，这种蒸馏器直到目前我国土法生产水银中仍在使⽤，而在黔东一带应⽤还相当广泛。

研磨器，是一种将固体物质研磨成细粉的器具。中国炼丹家在长期的炼丹实践中，已经认识到将参加炼丹反应的固体物质研磨成细粉，会增加反应物之间的接触面，使反应顺利地进⽣，所以他们研制了比较精巧的研磨器，《丹房须知》中绘有研磨器图（图 10）。

“水海”，是一种用于冷却的器具，在许多装置中用以代替水鼎。据《金华冲碧丹经秘旨》的说明，“水海”是用银做的，形如平底磁漏斗。里面灌水，安置在“上釜”或神室上，使之冷却，从而达到冷凝水银蒸汽的目的。

（孙毅霖）

蒸馏器

蒸馏器是利用蒸馏法分离物质的器具。在中国古代，它一般用于炼丹术、制烧酒、蒸花露水等。不同的用途有不同的形制和起源。

炼丹术中的蒸馏器主要源于古人抽砂炼汞的实践。我国古代的水银炼制，最早是采用简单的低温氧化焙烧法，东汉时发展成密闭抽汞法，把容器密封起来，加热时，丹砂分解出的水银蒸汽冷凝在容器内壁。这种炼汞设备再加上冷凝装置和汞收集器，就构成了一种较为原始的蒸馏器。炼丹家们长期使用的所谓“火在上、水在下”的未济炉，就是把冷凝器置于炉内的一种简单蒸馏器。后来，炼丹家们又将冷凝器与加热炉分开，使得这种形式的蒸馏器发展到了完善程度，其代表就是吴悞《丹房须知》及宋应星《天工开物》中的描述。炼丹家们所用蒸馏器的形制，上篇《炼丹器具》一文已有说明，这里不再多论。

关于制取烧酒的蒸馏器，文献中反映不多，应该通过对现存传统工艺以及出土文物的考察加以了解。据调查，我国传统的蒸酒器可分为两种形式：锅式和壶式。二者的区别，主要在于前者的冷却面凹陷，而后的冷却面凸起。图 1 所示为山西汾酒厂解放前所用锅式蒸馏器，图 2 则为解放前唐山烤酒蒸馏器，是壶式。显然，锅式用匙和盘作承酒器，壶式则用边槽。锅式的出酒管在甑中上部，而壶式则在甑与冷却器的连接处。锅式较壶式要简单些（方心芳，“关于中国蒸酒器的起源”，《自然科学史研究》，1987 年 2 期）。

出土文物也给我们提供了有价值的信息。1975 年，河北省承德市青龙县出土了一件金代铜蒸酒锅，我们叫它青龙蒸馏器，其年代不晚于金末。从结构上看，该蒸馏器应归于壶式蒸酒器一类。整个器体高 41.6 厘米，由上下两个分体套合而成。下分体是一个半球形甑锅，高 26 厘米，口径 28 厘米，最大腹径 36 厘米。甑锅腹中部有环螯一周，上口沿作双唇凹槽，起汇酒槽作用。从汇酒槽通出一个出酒流，出酒流一端是与锅体同范铸成的铜流，另一端是插入的铁流。上分体是一圆桶形冷却器，高 16 厘米，口径 31 厘米，底径 26 厘米，穹隆底，隆起最高达 7 厘米，接近器的中部。器底成卷状壁，近底处通出一排水流，也是由铜流、铁流接合而成。冷却器底沿作牡唇，当上下二分体套合时，牡唇与汇酒槽的外唇内壁正相紧贴。图 3 和图 4 分别为该蒸馏器的示意图和剖面图。

从结构来看，青龙蒸馏器的使用方法应该是这样的：蒸馏时，把备好的蒸料和水直接放入锅里，然后，将冷却器套合在甑锅上面，同时，把冷却器上的排水流用活塞堵住，再在冷却器里注满冷水，在出酒流末端下面置一容器，以贮存流出的蒸馏酒。在蒸馏过程中，要随时控制冷却器排水流上的活塞，以便排除旧水，更换新的冷水，提高冷凝效率。

青龙蒸馏器在设计上没有箅子，它在使用过程中有没有可能加箅蒸烧呢？回答是肯定的。从它遗留的使用痕迹看，甑锅内壁明显分成三层，下层层厚约 6 厘米，呈灰黑色；中层厚约 10 厘米，呈浅灰色；上层厚亦为 10 厘米，

表壁上则附有一层薄薄的青铜锈。分析这三层形成原因，当为加箅蒸烧所致。箅位于中层底部，蒸烧时，箅上的坯料杂液向下透渗入沸水中，锅内壁多次接触这一层水杂质物而呈灰黑色。中层呈浅灰色，则是经常接触坯料的缘故。上层锅壁则由于常受蒸汽作用，直接接触空气的机会多而被锈蚀生成铜绿（碳酸铜）。承德市避暑山庄博物馆曾利用该蒸馏器进行了模拟实验，不但在加箅蒸酒的实验中证实了上述三层痕迹的层位关系，而且实验结果表明，青龙蒸馏器性能良好，是一套用之有效的小型蒸酒器（参见承德市避暑山庄博物馆，“金代蒸馏器考略”，《考古》，1980年第5期）。

在国内，时间更早些的古代蒸馏器实物也还是有的。1975年，在安徽省天长县安乐乡出土一汉代铜蒸馏器，其结构亦由上下两分体组成，上体底部带箅，箅上附近铸有一槽，槽底铸有一引流管，与外界相通，如图5所示。在蒸馏时，配以上盖，蒸汽在器壁上凝结，沿壁流下，在槽中汇聚后顺引流管流至器外，因此可起到蒸馏作用。

遗憾的是，由于种种原因，该墓发掘报告至今尚未公开发表，图5仅是该蒸馏器结构示意图，我们还不能对之提供更多的细节。

除天长县出土之铜蒸馏器外，上海市博物馆尚藏一传世珍品，亦为汉物，其结构与天长蒸馏器类似。上海市博物馆有关人员曾仿之做过模拟实验，证明完全可以蒸出酒来。

从现存传统蒸酒器及金代铜烧酒锅、天长铜蒸馏器来看，它们似乎属于一个系列，其起源当与古代蒸饭用的甑、甗有关。在汉代文物中，具有类似天长蒸馏器形态的铜甗很多，这表明甗是当时常用的蒸具。在日复一日的使用过程中，古人不难由之积累起关于液体蒸发冷凝的知识，从中受到启发，对之加以改造，在壁上开槽引流，即成为天长蒸馏器的类型。

炼丹用蒸馏器有所不同。像未济炉那种处于雏形期的蒸馏器，水银蒸汽凝结后直接滴入下面的水盎中，水盎就是冷凝器，它是放置在炉内的。炼丹蒸馏器发展到它的高级形式以后，炼丹家们又将冷凝器与加热炉分开，中间用引流管（所引实际为水银蒸汽）相连（参见上文）。而像天长蒸馏器和金代铜烧酒锅那样在壁上开槽截流的，则尚未见到。当然，抽炼丹砂也好，蒸馏烧酒也好，所用的都是蒸馏器。其原理是相通的，相互存在交流和影响，应该是可能的。东汉魏伯阳《周易参同契》的某些描述，就非常相似于天长蒸馏器的形态。但后来双方毕竟在形制上有了差异，这可能是由于它们蒸馏对象不同所导致的。

古代蒸馏器还有另一重要用途：蒸取花露水。南宋张世南《游宦纪闻》卷五记述了当时民间用蒸馏器蒸取花露的情况：

“锡为小甑，实花一重，香骨一重，常使花多于香。窍甑之旁，以泄汗液。以器贮之。毕则彻甑去花，以液渍香。”

显然，这种蒸馏器与传统蒸酒器在结构上相仿，都是用一只甑锅蒸料，蒸汽都是经过冷却成体汇集后从甑锅一旁的流或特设的孔道输到外边的贮器。这里面应该有着某种相互影响和启发。

明末方以智的《物理小识》卷六也记载过花露蒸取法，原文为：

“蒸露法：铜锅壶，底墙高三寸。离底一寸，作隔，花钻之使通气。外以锡作甑盖盖之，其状如盃。其顶圻使盛冷水，其边为通槽，而以一味流出其馏露也。作灶以砖二层，上凿孔以安铜锅，其深寸。锅底置砂，砂在砖之上，

薪火托砖之下，其花置隔上，故下不用水，而花露自出。凡蔷薇茉莉柚花，皆可蒸取之。”

方以智介绍的是一种干馏法，所用设备也是蒸馏器，下为甑锅，锅内有箅，上为冷凝器，冷凝器下有槽，以流管引出馏液。这与传统蒸酒器结构十分类似。蒸馏时，箅上置花干馏，这是与蒸酒器使用上的不同之处。而锅底置砂，则可使受热均匀且易于控制。

除了干馏以外，方以智也知道加水蒸馏方法。在同一条中，他引述别人的话说：“以重汤蒸锡甑取露，更无焦气。”方以智的儿子方中履则记述了另一种制露方法：“锡甑顶作中低滴溜，甑中石子上置一罐接之。验顶上冷水煖，则起盖取中，其花露尽矣。”这种方法，与炼丹术中未济炉有异曲同工之效。这些记载表明，古人在制取花露水时，广泛尝试了各种类型的蒸馏器，在这个问题上真正作到了百花齐放。

景符

景符是根据小孔成像原理制成的观测仪器，它的发明人是元代大科学家郭守敬。

景符的发明是为了提高立表测影的精度。

中国古代在确定节气尤其是冬夏至发生时刻时，一般是用立表测影的方法来进行。太阳在天空视位置不同，它投影在地面表影的长度也不同。由此，通过测定地面表影长度，就可以逆推太阳在空间的位置。这就是立表测影的原理。早在先秦时期，用测日中影长的办法来定冬至和夏至，就已经成为历法工作的重要手段。

立表测影，表的高度一般是8尺。到了元代，为了提高测影精度，郭守敬对之做了很大改进，他首创高表，把表身做成碑柱形，并使之增加到36尺高，在表顶上再用两条龙往上抬着一根直径3寸的横梁，从梁心到圭面一共40尺。这样一来，梁影到表底的距离就是8尺表表影的五倍。从误差理论来讲，同样的量度误差，高表的相对误差仅是8尺表的五分之一，换言之，测量的准确度提高了五倍。

但是，用高表加剧了另一困难——表影的模糊问题。用圭表测影的关键是提高影长量度的精度，由于空气分子和尘埃杂质对日光的漫射，使影的端线变得模糊不清，这是提高测量精度的极大障碍。采用高表以后，表高影虚的情况更为严重。由于观测时间一般为冬至前后，影子分布范围大，影端模糊现象尤为突出，这使得观测者难以判定表端横梁影子的确切位置。《元史·天文志》对此有所分析：

“按表短则分寸短促，尺寸之下所谓分秒大半少数，未易分别；表长则分寸稍长，所不便者景虚而淡，难得实影。”

这段话对采用高表的优劣两方面都做了探讨。所谓“分寸短促”、“分寸稍长”之语，语言不甚准确，但基本意思是说高表可以提高测量准确度，这是对的。而“难得实影”一语，则是对使用高表缺陷的准确概括。

郭守敬的解决办法是在测量中使用景符。《元史·天文志》详细记载了景符的结构、使用方法，还记录了使用景符所得到的两个测量数据：

“景符之制，以铜叶，博二寸，长加博之二，中穿一窍，若针芥然。以方为趺，一端设为机轴，令可开阖，榑其一端，使其势斜倚，北高南下，往来迁就于虚梁之中。窍达日光，仅如米许，隐然见横梁于其中。旧法一表端测晷，所得者日体上边之景。今以横梁取之，实得中景，不容有毫末之差。至元十六年己卯夏至晷景，四月十九日乙未景一丈二尺三寸六分九厘五毫；至元十六年己卯冬至晷景，十月二十四日戊戌景七丈六尺七寸四分。”

根据这段记载，景符的主要部件是一片薄铜片，铜片中央有一个小孔。铜片安在一个架子上，下端是轴，另一头可以斜撑起来，撑的角度可以自由调节。把架子在圭面上前后移动，当太阳、横梁、小孔三者成一直线时，在圭面上可看到一个米粒大小的光斑，中间还有一条清晰的横线，如图所示。在这里景符相当于一个小孔成像器，圭面上的光斑就是太阳光透过小孔所成的像。光斑中的横线则是太阳光对表端横梁的投影透过小孔所成的像。由该像落在圭面上的位置就可以准确测定相应表的影长。

景符的使用使得传统的立表测影技术在两个方面有了突破：一是它基本

解决了由于空气分子、尘埃等对日光漫射而导致的表高则“景虚而淡，难得实影”的困难，大大提高了观测精度。今人曾按照郭守敬的方法做过模拟观测。从实地观察情况来看，表高影虚的情况确实很严重。尤其当大气透明度较差时，在近处观察，影子淡到几乎无法分辨的地步。使用了景符以后，这一问题基本上不存在了。

另一突破即《元史·天文志》所说：“旧法一表端测晷，所得者日体上边之景。今以横梁取之，实得中景，不容有毫末之差。”即是说，新的方法测量时不受日光半影影响。按照传统方法，用一根表测影，所得影长是太阳上边缘的影长，它较日面中心的影长要短一些。对此我们可以作一粗略估计。根据《元史·天文志》本条的数据，测冬至时，40尺表的影长为76尺7寸4分，太阳的视角按0.5度计算，根据一般三角函数知识不难算出，表端投影到圭面上的半影范围大约为1.6尺，日面中心影长与日面上边缘影长的差是这个数字的一半。考虑到郭守敬测量时读数精确到5毫，那么这一误差比测量读数精度大了三个数量级，当然非同小可。现在郭守敬以横梁代替了单个表端，用景符观测横梁与太阳的像，显然，当梁的像平分太阳像时，所得到的是日面中心的影长，这就避免了本影半影问题的干扰，可以获得准确结果，从而基本消除了这一误差。根据模拟实验，景符架子若移动1.5—2毫米，梁影切分太阳像两半的对称程度即有显著变化。由此可知，用景符来测定影长，可以将半影误差限制在2毫米以内（张家泰，“登封观星台和元初天文观测的成就”，《考古》，1976年第2期），准确度当然大大提高了。

郭守敬根据小孔成像原理发明景符，成功地解决了传统立表测影技术面临的重大难题，这是我国古代观测技术的一项重要成就，应予充分肯定。

透光镜

透光镜是一种特殊的铜镜。我国古代铜镜一般以铜锡合金铸成，背后有图案文字，正面为反射面，将其打磨光亮，可以照人。透光镜在外观上和一般铜镜没有什么区别，但若以一束光线照到镜面，反射后投影到壁上，壁上的光斑中却会奇迹般地显现出镜背面的图案、铭文，好像光线透过铜镜，把背面图案、文字映在壁上似的，故称透光镜。

透光镜的起源年代目前尚不能确定。出土的先秦铜镜很多，其中是否有透光镜，没有人逐枚去做实验。上海博物馆珍藏的铜镜中，有一面是西汉遗物，背面有“见日之光，天下大明”八个字，向日反照，背面的图案、文字清晰地映显于屏幕，是为透光镜无疑。这表明我国透光镜的制作年代，至迟不会晚于西汉。至于西汉透光镜究竟是工匠的偶然所得，还是当时人们有意之作，现在还是一个谜。

隋代王度作有神异小说《古镜记》，其中提到一枚“古镜”，说是“承日照之，则背上文画，墨入影内，纤毫无失。”这虽然出自小说类文，但其描写却十分符合透光镜特征，看来王度有可能听人提到过透光镜之事，目为神奇，于是当作奇怪现象采入小说。

隋以后，透光镜的制作仍在继续。唐代透光镜至今仍有传世品存在，宋以后的记载连绵不断，就充分表明了这一点。另一方面，人们对透光镜的“透光”机理也发生了浓厚兴趣，不少学者开始对之加以探索，北宋沈括就曾记叙了当时人们以及他自己对这一问题的思考，其《梦溪笔谈》卷十九记述说：

“世有透光鉴，鉴背有铭文，凡二十字，字极古，莫能读。以鉴承日光，则背文及二十字，皆透在屋壁上，了了分明。人有原其理，以谓铸时薄处先冷，唯背文上差厚，后冷而铜缩多。文虽在背，而鉴面隐然有迹，所以于光中现。予观之，理诚如是。然予家有三鉴，又见他家所藏，皆是一样，文画铭字无纤异者，形制甚古，唯此一样光透，其他鉴虽至薄者皆莫能透。意古人别自有术。”

这段话，是现在已知记录古人对透光镜原理进行探讨的最早的文字。这种观点认为，在反射光中显现出鉴背面的图案和文字，并非由于光线透过镜子的缘故，原因还在于镜子的反射面上，“文虽在背，而鉴面隐然有迹，所以于光中现。”

那么，是什么造成了“鉴面隐然有迹”的呢？沈括引述的这种观点认为，是物体的热胀冷缩性质。同类物体，体积越大，其热胀冷缩导致的形变量也就越大。由此，铜镜在铸成后的冷却过程中，薄的地方收缩量小，厚的地方收缩量大，于是，在鉴面上就形成了与背面图案文字相仿的下陷凹痕。沈括赞成这种解说，同时又提出，热胀冷缩是一种普遍现象，既然如此，为什么不是每件镜子都有透光效果呢？

沈括的疑问，在现代入面前得到了解答。1975年，复旦大学和上海博物馆合作，沿着这一思路，采用淬火法，确实复制出了具有“透光”效果的铜镜。这表明宋人的分析是有道理的。但研究人员同时也发现，采用这种方法，对镜体厚度及其他条件，都有严格要求，所以不可能件件都有透光效果。

元代吾丘衍在其《闲居录》中提出了另一种解说：

“假如镜背铸作盘龙，亦于镜面窍刻作龙，如背所状，复以稍浊之铜填补铸入，削平镜面，加铅其上，向日射影，光随其铜之清浊分明暗也。”

吾丘衍从镜面反射率的差异去解释，他认为在镜面用另一种铜料嵌入一幅与

背面相同的花纹图案，然后磨平，即可造成透光效果。这是因为镜面各部分反射光线能力大小不一样的缘故。吾丘衍曾亲眼看到有人为验证此说，不惜打碎一面透光镜来检查，证明属实。这一主张得到后世许多学者支持，例如明末科学家方以智就赞同这一观点。

吾丘衍的解说有一定道理，反射率不同，的确可以造成“透光”效果，况且历史上还有实物证据。但实际上，在这类铜镜中，因为镜面镶嵌有不同成分的材料，表面的研磨加工性能就不一样，这也会导致“鉴面隐然有迹”。所以，造成“透光”现象的，并非完全由于“铜之清浊”。

清代郑复光反对吾丘衍等人的主张，赞成沈括的观点，认为“鉴面隐然有迹”是造成透光现象的根本原因，并对沈括的分析作了重要补充，提出鉴面迹纹的形成原因除与冷却过程有关外，还与加工过程中对镜面的刮磨有关。他在其《镜镜詒痴》的“作透光镜”一条中指出：由于铸造时冷却速度不同，铜的收缩力不一，形成镜面隐然有凹凸不平，这种凹凸不平在对镜面进行刮磨加工的过程中，难以彻底消除，“刮力在手，随镜凸凹而生轻重，故终有凸凹之迹。”凸凹之迹导致了“透光”效果。郑复光将此与水的反射相比较，他说：“水静则平如砥，发光在壁，其光莹然。动则光中生纹，起伏不平故也。……铜镜磨工不足，故多起伏不平，照人不觉，发光必见。”郑复光用水反射光中的波纹现象说明长光程的放大效应，是比较妥贴的，有助于人们了解“鉴面隐然有迹”与“透光”之间的因果关系。

实际上，制造透光镜的方法很多，例如用简单的手工补充研磨抛光法直接在镜面上磨出花纹槽沟即可。因为槽沟很浅，又圆滑无棱，肉眼极难察见，反光时却能收到“透光”效果。当然，采用这种方法，要使反射光斑中的花纹与镜背图案完全一致，要下相当大的功夫才行。

透光镜问题在国外也颇受重视。日本在江户时期以后，相当于我国明朝的时候，就制造出了有透光效果的“魔镜”。到了明治初期，“魔镜”已经比较普遍。西方人最早接触透光镜是在19世纪30年代，在那之后，欧洲科学界对铜镜之所以能“透光”进行过持续一个世纪之久的讨论，这使得透光镜成了一个令世人注目的问题。

中国古人摸索出的这几种透光镜做法，不管是沈括提到的冷却效应、吾丘衍所说的镶嵌法，还是郑复光补充发展的刮磨法，都能制造出具有透光效果的铜镜来。日本制造“魔镜”使用的刮磨法，跟郑复光所云就比较类似。不过，这些方法都要求有很高的工艺技巧，在古代能够做到这种程度，也是不容易的。

望远镜

望远镜的发源地在西方。在望远镜的应用上，中国是东西文化交流的受惠者。

17世纪初，伽利略（Galileo Galilei，1564—1642年）制成第一架天文望远镜，并用以观测星月，还写成《星际使者》一书，记述了其观测成果。伽利略的工作很快被介绍到中国，1615年，葡萄牙传教士阳玛诺（P. Emmanuel Diaz，1574—1659年）撰写了《天问略》一书，其中说：

“近世西洋精于历法一名士，务测日月星辰奥理而衰其目力尪羸，则造一巧器以助之。持此器观六十里远一尺大之物，明视之，无异在目前也。持以观月，则千倍大于常。观金星，大似月，其光亦或消或长，无异于月轮也。……待此器至中国之日，而后详言其妙用也。”

这段话最早把望远镜及其观测情形介绍到了中国，并且重点介绍了当时欧洲用望远镜观天取得的成果。“一名士”即指伽利略，“一巧器”则为望远镜。但该书未曾说明望远镜的构造。引文中最后一句也表明，当时望远镜实物还未传入我国。

望远镜实物传入中国的时间估计当在17世纪20年代中叶。1626年，德国传教士汤若望（Johann Adam Schall von Bell，1591—1666年）著《远镜说》，这是在我国出现的最早论述望远镜的专著。书中附有一幅整架望远镜的外形图，并且明确指出：“夫远镜何昉乎？昉于大西洋天文士也。”这里“天文士”，指的是伽利略。该书讲述了望远镜的用法、原理，列举了用望远镜观测太阳系天体和银河系及其他恒星的情形，对伽利略观天成果作了进一步说明，并具体介绍了望远镜的制作方法：

“用玻璃制一似平非平之圆镜，曰筒口镜，即前所谓中高镜、所谓前镜也。制一小注镜，曰靠眼镜，即前所谓中注镜、所谓后镜也。须察二镜之力若何，相合若何，长短若何，比例若何，苟既知其力矣，知其合矣，长短直而比例审宜，方能聚一物象虽远而小者，形形色色不失本来也。”

所谓“中高镜”，即凸透镜，这里用作物镜，即文中所说之“前镜”、“筒口镜”。所谓“中注镜”，即凹透镜，此处用作目镜，引文中称其为后镜、靠眼镜。这种结构的望远镜，是典型的伽利略式望远镜。

望远镜的使用方法是这样的：

“镜只两面，但筒可以随意增加，筒筒相套，可以伸缩。又以螺丝钉拧住，即可上下左右。但视镜只用一目，而以视二百步外之物为例，远达六十里。可以观月，观金星、太阳、木星、土星及宿天诸星。视太阳及金星时，则加青绿镜，或置白纸于眼镜下观太阳。此外可用以航海，用以在暗室画图，而尤可用于战争。”

这段话对于望远镜的使用方法介绍得甚为详细。“筒可以随意增加，筒筒相套，可以伸缩”，这是为了调节目镜与物镜之间距离，便于观看远近不同处的物体。文中特别介绍了望远镜的两种使用方法：直视和屏幕成像观察。对于一般目标，可以用眼睛附在目镜处直接观看。当要观察太阳和金星等亮度较强的天体时，“则加青绿镜”，以保护眼睛。这些，都属于直视法的范围。直视法看到的是光线通过望远镜后所成的虚像。而对于太阳这一强光物体，还可以在目镜下面放一张白纸作为像屏，调节望远镜，使日光透过望远镜后在纸上生成一明亮光斑进行观察。这时观察到的是太阳的实像。这种方法可

使观察者免却疲累之苦，同时也起到了保护眼睛的作用。但对于一般物体，这一方法是无效的，因为这时透过望远镜在屏幕上所成的像的亮度太低了。

《远镜说》这本书，虽然只有短短的五千余言，内容简略，而且书中的光路图还是错的，但它起到了把望远镜介绍给中国的作用。《远镜说》唤起了中国人对望远镜的热情，并使他们掌握了望远镜的基本制作方法，这是它的一个历史功绩。

在欧洲，望远镜诞生之后，学者们首先将其指向天空，获得了惊人的成果。在中国，天文学家们也走上了同样的道路，他们充分意识到了望远镜对于天文观测的重要性。早在崇祯二年（1629年），徐光启即已上书皇帝，奏请制造“急用仪象”，其中有“装修测候七政交食远镜三架”，请求拨工料制作。当时正值明王朝多事之秋，时局动荡，财政吃紧，崇祯皇帝居然也下诏应允，这距望远镜传入中国不过两三年时间。徐光启奏请制作的望远镜最后是否完成，学界意见不一，但两年后（即1631年），他确实已经用望远镜观测日月食了，并充分体会到了用望远镜观测天象的优越性。在随后的中西天文学论争中，徐光启进一步论述了用望远镜观测的必要性及具体使用方法：

“日食时，阳晶晃耀，每先食而后见；月食时，游气纷侵，每先见而后食：其差至一分以上。今欲灼见实分，有近造窥筒，日食时，于密室中取其光景，映照尺素之上，初亏至复圆，分数真确，画然不爽。月食用以仰观，二体离合之际，鄞鄂著明，与目测迥异。”（《明史·历志一》）

窥筒为何物？继徐光启之后掌管历法工作的李天经说：“若夫望远镜，亦名窥筒，其制虚管层叠相套，使可伸缩，两端俱用玻璃，随所视物之远近以为长短。”（《明史·天文志一》）显然，徐光启此处所说的“窥筒”，就是望远镜。这段话意在说明使用望远镜观测的优越性，认为它比之用肉眼直接观测，精度要提高得多。徐光启特别指出，用望远镜观测月食和日食时应采用不同方法，月食用直视法，日食则用屏幕成像法。这也是《远镜说》中介绍的两种方法。

古人不但体会到望远镜对于天文观测的重要性，而且对于望远镜其他用途也有所认识。李天经说：望远镜“不但可以窥天象，且能摄数里外物，如在目前。可以望敌施炮，有大用焉。”（《明史·天文志一》）望远镜可用于战争，这在《远镜说》中已有说明，李天经则进一步予以强调。实际上，在李天经说此话之前的1631年，我国科学家薄珏已经创造性地把望远镜装置在自制的铜炮上了。这在世界上尚属首次，所以著名科学史家李约瑟博士说：“不论薄珏是不是望远镜的独立发明者，但他应得到望远镜首先用在大炮上的荣誉。”（王锦光、洪震寰，《中国古代物理学史略》，河北科学技术出版社，1990年版，160页）

《远镜说》刊行以后，我国民间也开始了自行研制望远镜。例如江苏的光学仪器制造家孙云球，就曾自己磨制透镜，制造了性能良好的望远镜，时间大概是17世纪中叶。薄珏的年龄长于孙云球，他制作望远镜的时间更早。这表明，中国人对于望远镜这一外来事物接受得是相当快的。

甚至文学中也出现了对望远镜的描写。清初章回小说《十二楼》中有一段，说是一旧家子弟，利用望远镜（书中叫千里镜）窥视一官宦人家小姐的闺阁生活，从而“骗取”姻缘的传奇故事。书中这样描写望远镜的形状和特点：

“此镜用大小数管，粗细不一。细者纳于粗者之中，欲使其可放可收，随伸随缩。所谓千里镜者，即嵌于管之两头，取以视远，无遐不到。‘千里’二字虽属过称，未必果能由吴视越，坐秦观楚，然试千百里之内，便自不觉其诬。至于十数里之中，千百步之外，取以观人鉴物，不但不觉其远，较对面相视者更觉分明，真可宝也。”

这一段话，自然不可视为小说家言。未曾耳闻目睹过望远镜的，写不出这样的文字。这是望远镜之类光学仪器为士大夫所珍重的一个有力证明。目前所知《十二楼》最早的版本是清顺治十五年（1658年）的版本，而当时距望远镜传入我国不过三十余年时间。

温度计和湿度计

温度计和湿度计都是很重要的物理学仪器，在科学研究和日常生活中发挥着巨大的作用。

我国在秦汉时期曾经有过通过观察物态变化来粗略感知气温的方法，那就是《吕氏春秋》所说的“见瓶水之冰，而知天下之寒”。但这里的“瓶水之冰”充其量只能是一种原始的验温器，因为它只能在有限的范围内粗略显示外界温度的变化，没有任何标度，当然不能算做温度计。

定量温度计的早期形式在我国出现的时间是在17世纪六七十年代，是由耶稣会传教士、比利时人南怀仁（Ferdinand Verbiest, 1623—1688年）在其著作《灵台仪器图》、《验气图说》中首先介绍的。前者完成于1664年，后者则发表于1671年。两书后来被纳入由南怀仁纂著的《新制灵台仪象志》中，前者成为它的附图，后者则成为其中的一部分，即其第四卷的“验气说”（参见王冰，“南怀仁介绍的温度计和湿度计试析”，《自然科学史研究》，1986年第1期）。

南怀仁在《新制灵台仪象志》的“验气说”中描述了温度计的制作方法：

“所谓作法者，用琉璃器，如甲乙丙丁；置木板架，如一百八图（按：原书编号）。上球甲与下管乙丙丁相通，大小长短，有一定之则。木架随管长短，分三层，以象天地间元气之三域。下管之小半，以地水平为准。其上大半，两边各分十度。其所划之度分，俱不均分，必须与天气寒热加减之势相应。故其度分离地平线上下远近若干，则其大小应加减亦若干。……盖冷热之验，有所必然者，故候气之具，自与之相应，而以冷热之度，大小不平分相对之。”

根据这段描写及后文有关内容可知，南怀仁制作的温度计是以玻璃制成U形管，管的一端与铜球相连，另一端开口，管及球内一部分注有水。他以一水平线为基准，将管子分为上下两部分，上部分长，下部分短。管子两侧附有不等分分度，用以作为测量温度的标尺（如图1所示）。

之所以要将标度作不等分划分，这与当时传教士对于空间气温分布变化的认识有关。南怀仁说：“盖天之于地，有上中下三域。上域近火，近火常热；下域近水土，水土常为太阳所射，故气暖也；中域上远于天，下远于地，故寒也。”这就是当时西方流行的所谓“三际说”。南怀仁认为空气中温度的变化，就是由于这三际之间相互作用引起的，而温度计作为测温仪器，其标度应该与空中三际分布相对应，将其反映出来。他说：“盖冷热之验，有所必然者，故候气之具，自与之相应，而以冷热之度，大小不平分相对之。”即是说，将当时人们所想象的三际分布对应缩小至温度计上，就构成了这样的不等分分度。这种不等分分度当然不合实际，但无论如何，它毕竟提供了

一种分度方法。

关于这种温度计的工作原理，南怀仁解释说：

“夫水之升降，为热冷之效固矣，然其故何也？盖如上球甲，一触外来热气，则内所含之气稀微舒放，奋力充塞，则球隘既无所容，又无隙漏可出，势必逼左管之水，从地平而下至丁，右管之水，从地平而上至戌矣。此热之理所必然也。若冷之理则反是。盖冷气于凡所透之物，收敛凝固，如本球甲，一触外来之冷气，则内所含之气必收敛，左管之水，欲实其虚，故不得不强之而上升矣。”

这段话以空气的热胀冷缩效应为依据，基本上说出了这种温度计的工作原理。但仅此还不够，因为该温度计一端是开口的，与大气相通。南怀仁专门解释过这样做的理由，他说：“假使塞管之口而不使通外气，则甲丁内气为外冷所逼，势必收敛凝固，虽甲丁之器为铜铁所成，必自破裂而受外气以补盈其空阙矣。又自外来之气甚热而内气必欲舒放，无隙可出，则甲丁既无所容，亦必自破裂而奋出矣。”可见，南怀仁考虑过是否将管口加以封闭，但由于受古希腊所谓“自然界厌恶真空”说法的影响，他担心封闭后会因温度变化而导致铜球破裂，因而采取了让管子开口与外界相通的做法。他没有科学的大气压概念，这样做倒也在情理之中。但是，这种形式的温度计难免要受到外界大气压变化的影响。即是说，管内水柱的升降，不能唯一地反映出温度的高低。再者，南怀仁温度计的温标是任意的，也没有固定点，因此它不能给出准确的温度值，只能观察到温度的变化，属于早期比较原始的空气温度计。

在南怀仁之后，我国民间自制温度计的也不乏其人。据载清初的黄履庄就曾发明过一种“验冷热器”，可以测量气温和体温。清代中叶杭州人黄超、黄履父女也曾自制过“寒暑表”。但由于原始记载过于简略，我们对于民间的这些发明，还无从加以评说。

我国对空气湿度的变化也比较注意，早在《淮南子·说山训》中，古人已经提出：“悬羽与炭，而知燥湿之气。”同书的《泰族训》说：“夫湿之至也，莫见其形而炭已重矣。”《天文训》说：“燥故炭轻，湿故炭重。”可见当时已经知道某些物质的重量能随大气干湿的变化而变化。古人利用这一效应，在天平两端悬挂重量相等而吸湿性能不同的物体（例如羽毛与炭），这就构成了一架简单的天平式验湿器。在使用时，预先使天平平衡，一旦大气湿度变化，两个物体吸入（或蒸发）的水分多少互不相同，因而重量不等，导致天平失衡而发生偏转，从而将空气湿度变化显示出来。

这种天平式验湿器并非仅是古人的设想，它确实被应用过。据《后汉书·律历志》记载，每当冬夏至前后，皇帝都要“御前殿，合八能之士，陈八音、听乐均、度晷景、候钟律、权土灰”，以之测定冬夏至是否到来。这里“权土灰”就是用天平式验湿器进行的测试。

中国古代这种天平式验湿器上没有标度，测量结果也从未想到过要量化，因此还不能叫做湿度计。湿度计也是由南怀仁介绍进来的。同样是在《新制灵台仪象志》的“验气说”一节中，南怀仁介绍了湿度计的制作及使用方法：

“欲察天气燥湿之变，而万物中惟鸟兽之筋皮显而易见，故借其筋弦以为测器，见一百九图（按：原书编号）。法曰：用新造鹿筋弦，长约二尺，厚一分，以相称之斤两坠之，以通气之明架空中横收之。上截架内紧夹之，下截

以长表穿之，表之下安地平盘。令表中心即筋弦垂线正对地平中心。本表以龙鱼之形为饰。验法曰：天气燥，则龙表左转；气湿，则龙表右转。气之燥湿加减若干，则表左右转亦加减若干，其加减之度数，则于地平盘上之左右边明划之，而其器备矣。其地平盘上面界分左右，各划十度而阔狭不等，为燥湿之数。左为燥气之界，右为湿气之界。其度各有阔狭者，盖天气收敛其筋弦有松紧之分，故其度有大小以应之。”

湿度计的形制有各种各样，中国古代采用的是天平式吸湿性验湿计，南怀仁湿度计就原理而言也是吸湿性的，但形制上则属于悬弦式。他用鹿筋作为弦线，将其上端固定，下端悬挂适当的重物，弦线上固定一指针，指针雕刻成鱼形。这种弦线吸湿以后会发生扭转，吸湿程度不同，扭转角度也不同，转过角度的大小通过指针在刻度盘上显示出来，从而起到测量湿度的作用（如图2所示）。

悬弦式湿度计结构简单，使用方便，因此比较流行。但它也有其待改进之处。例如南怀仁对湿度计底盘刻度的不等分划分，就不能正确反映空气湿度的变化情况。但这毕竟是中国最早出现的有定量刻度的湿度计。另外，这类湿度计西方书籍中也有记述，但这些书籍在时间上比起南怀仁的介绍还要晚一些，

可见此类湿度计传入我国的时间是相当早的。

在南怀仁之后，我国学者也尝试着制作测量大气湿度的仪器。据张潮《虞初新志》卷六所收黄履庄传记称，黄履庄在1683年就曾自制成功一种所谓“验燥湿器”：“内有一针，能左右旋，燥则左旋，湿则右旋，毫发不爽，并可预证阴晴。”但其结构与原理没有被记录下来，以致于我们对这种“验燥湿器”的具体形制，至今还一无所知。

栗氏量

度量衡在古代社会生活中具有极其重要的作用。在度量衡器发展过程中，战国时期齐人设计的栗氏量，具有承前启后的重要历史地位。

栗氏量实物已经不存，但《考工记》对之有详细的叙述，其《栗氏》条说：

“栗氏为量，改煎金锡则不耗，不耗然后权之，权之然后准之，准之然后量之。量之以为鬴，深尺，内方尺而圆其外，其实一鬴。其臀一寸，其实一豆。其耳三寸，其实一升。重一钧，其声中黄钟之宫。概而不税。其铭曰：时文思索，允臻其极。嘉量既成，以观四国。永启厥后，兹器维则。”

这段话，简要地叙述了这种量器的制作工艺过程、形制、规格、尺寸、容积等。文中所说的金，指铜。“金锡合煎”，是用铜和锡在一起熔炼，得到的是铜锡合金，即青铜。为什么要用青铜铸造？原因是多方面的，青铜熔点低，硬度高，抗腐蚀性强，以之铸成的器皿，不易变形、蚀烂，可以长久保存。

《汉书·律历志》说：“铜为物之至精，不为燥湿寒暑变其节，不为风雨暴露改其形。”这里的“铜”指的就是青铜。可见青铜是古人公认的制造度量衡器的上等材料。栗氏量也是用青铜铸造的。

根据《考工记》的描述，栗氏量结构大致如图所示。它是鬴（釜）、豆、升三量合一的量器。鬴、豆、升和区、钟都是当时齐国所用的量器。据《左传·昭公三年》记载：“齐旧四量，豆区釜钟，四升为豆，各自其四，以登于釜，釜十则钟。”可见，这些量器的换算关系是：

1 钟=10 鬴

1 鬴=4 区

1 区=4 豆

1 豆=4 升

栗氏量实现了一器多量（鬴、豆、升）的合一，这在设计思想上是很先进的。

栗氏量的主体是鬴，鬴呈圆筒形，深一尺，容一鬴。圆筒的口径用一个边长为一尺的内接正方形来规定。圈足（即引文中所谓之臀）深一寸，容积为一豆。开口向下。两侧耳的深度为三寸，容一升。圈足和耳都是圆筒形，其口径没有给出，但通过所给容积及深度可以计算出来。计算结果，对于圈足，应为“内方七寸九分而圆其外”；对于耳，则应为“内方二寸三分而圆其外”（圆周率按栗氏量鬴量之规定计算）。

引文中“内方尺而圆其外”，是用圆内接正方形的边长来规定圆的大小，并非表示该量器的构造为外圆内方。之所以要这样做，大概是因为早期古人未曾找到准确测定圆的直径的方法，只有借助于其内接正方形来表示。那时他们要确定一个圆，首先要定出方的尺寸，然后再作外接圆。在计算上也是如此，《周髀算经》卷上说，“数之法出于圆方，圆出于方，方出于矩，矩出于九九八十一”，就是这一事实的反映。这与《考工记》对栗氏量的规定是一致的。

《考工记》通过规定栗氏量上鬴的口径和深度来确保其容积符合要求，从而实现了“用度数审其容”，这是其设计思想先进性的另一表现。这样做的结果，在量器上实现了长度与容积的统一，不但同时给出了长度和容积的

单位量值，而且只要长度确定下来，容量也随时可以得到，这有助于复现标准容量，推广统一的量值，因而具有很高的科学性。

栗氏量不仅有尺度，有容积，还有“其重一钧”的重量要求，这样就从一个器物上可以得到度、量、衡三种单位的量值。这是很不简单的。为了确保这一点，《考工记》规定了严格的工艺流程。首先，是要做到“改煎金锡则不耗”。唐代贾公彦注解：“重煎谓之改煎也。”可见，所谓“改煎”，就是“重煎”，即反复煎炼。煎炼的结果，青铜中所含的杂质挥发殆尽，这时再去铸器，“则不耗”。达到这种地步，就可以“权之”，称出相应重量的青铜准备熔炼。下一步就是“准之”，对于这一步的具体含义，历代学者有不同的说法。我们认为，所谓“准之”，是指要使铸模符合标准，因为若模器不合要求，铸出的量器也就不可能达到上述度、量、衡统一于一器的目的。古人把模器叫做“法”，也含有这种意思。至于究竟如何“准之”，古人未讲，我们也不好妄猜。清代学者戴震著《考工记图》，认为当时在制造这件标准量器时，已经运用了水的比重来求得量器的体积，以保证铸成的青铜器恰重一钧。这也是“准之”的一解。有了符合标准的铸模之后，就可“量之”了。所谓“量之”，郑玄注曰：“铸之于法中也。”即将熔化的青铜熔液浇入铸模的过程。“量之以为黼”，铸造以后，就得到了符合标准的量器。

引文中有一句话：“其声中黄钟之宫”。一般认为，这句话的意思是说，按照上述程序制成的量器，还要能够正好发出“黄钟”的宫音。这样的理解可能有些拘泥。这句话的含义应当是说栗氏量跟黄钟之宫有着内在联系，不一定要具体到敲击栗氏量所发出的声音本身。因为栗氏量实现了度、量、衡三者的统一，而根据古人的认识，黄钟为度量衡之本，这样二者之间当然就有了内在联系。例如栗氏量上给出的有长度单位，依据这样的单位可以定出黄钟律管；或者反之，栗氏量上的标长是服从于由黄钟律管所定出的长度单位的。这些，都可以说是“其声中黄钟之宫”。

引文中还有一句话：“概而不税。”这表明栗氏量不是作为一个一般量器来使用，它只起标准器的作用。“概”，取平、比较之意，即用以判定其他量器是否标准。“不税”，指不用以量取租税。先秦时期量器多为官方征收赋税、发放俸禄、分配口粮之用，此器专门强调“不税”，意在说明它是一个标准器，不能作为一般量器来用。栗氏量上铸造的二十四字铭文（引文的结尾部分），也明白无误告诉我们它是一个标准器。这一事实表明，早在战国时期，人们已经清楚认识到建立度量衡标准器的重要性了。

栗氏量代表了战国时期我国度量衡标准器制作的最高水平。它的设计思想对后人影响很大，具有承前启后的历史作用。公元9年我国制造的标准量器“新莽铜嘉量”，明显是受栗氏量的启发而设计完成的。在中国度量衡史上，栗氏量应该据有一席之地。

新莽嘉量

西汉末年，王莽秉政，为了满足其托古改制的政治需要，他征集当时学识渊博、通晓天文乐律的学者百余人，在著名律历学家刘歆的主持下，系统考证了历代度量衡制度，完成了中国历史上规模最大的一次度量衡制度改革。这一改革取得了两个方面的成果，其一是建立了我国古代最系统、最权威的度量衡学说，这一学说主要内容被收入《汉书·律历志》，成为历代考订度量衡制度的理论依据。其二是监制了一批度量衡标准器，为推广其度量衡制度提供了实物依据。这些标准器至今仍有传世，其中最著名的就是新莽嘉量。

对于嘉量的设计思想，《汉书·律历志》引述刘歆的“典领条奏”，说得非常清楚：

“量者，龠、合、升、斗、斛也，所以量多少也。本起于黄钟之龠，用度数审其容，以子谷秬黍中者千有二百实其龠，以井水准其概。合龠为合，十合为升，十升为斗，十斗为斛，而五量嘉矣。其法用铜，方尺而圆其外，旁有廌焉。其上为斛，其下为斗。左耳为升，右耳为合、龠。其状似爵，以廌爵禄。上三下二，参天两地，圆而函方。左一右二，阴阳之象也。其圆象规，其重二钧，备气物之数，合万有一千五百二十。声中黄钟，始于黄钟而反覆焉。”

依据这一思想制造出来的量器，至今仍保存在台北故宫博物院院内。从实物来看，该器为青铜质地，器的主体是一个大圆柱体，近下端有底，底上方为斛量，下方为斗量。左侧是一个小圆柱体，为升量，器底在下端。右侧也是一个圆柱体，上为合量，底在中端，下为籥量。斛、升、合三量口朝上，斗籥二量口朝下，如图1所示。这样的结构，与《汉书·律历志》所说的“其上为斛，其下为斗，左耳为升，右耳为合、龠”，“上三下二，参天两地”，完全相合。像这样有文献详细记载的度量衡权威标准器，能够完整流传至今，实在难得。

新莽嘉量的器壁上，刻有王莽统一度量衡的81字诏文：

“黄帝初祖，德匝于虞，虞帝始祖，德匝于新。岁在大梁，龙集戊辰，戊辰直定，天命有民，据土德受，正号即真。改正建丑，长寿隆崇。同律度量衡，稽当前人，龙在己巳，岁次实沈，初班天下，万国永遵，子子孙孙，亨传亿年。”

嘉量形制与《汉书》所记一致，又刻有新莽时统一度量衡的诏文，这更证明它是标准量器无疑。

嘉量的每一个单件量器上还刻有分铭，分铭详细记载了该量的形制、规格和容积及与它量之换算关系：

“律嘉量斛，方尺而圆其外，廌旁九厘五毫，冥百六十二寸，深尺，积千六百二十寸，容十斗。”

“律嘉量斗，方尺而圆其外，廌旁九厘五毫，冥百六十二寸，深寸，积百六十二寸，容十升。”

“律嘉量升，方二寸而圆其外，廌旁一厘九毫，冥六百四十八分，深二寸五分，积万六千二百分，容十合。”

“律嘉量合，方寸而圆其外，廌旁九毫，冥百六十二分，深寸，积千六百二十分，容二龠。”

“律嘉量龠，方寸而圆其外，廌旁九毫，冥百六十二分，深五分，积八百一十分，容如黄钟。”

“律”，指黄钟律。依《汉书·律历志》说法，能发出黄钟音调的律管恰好容 1200 粒黍，而龠的容量也正好是 1200 粒黍，因此，龠“容如黄钟”。斛、斗、升、合也就通过龠与黄钟律建立了联系。“嘉”，是好的意思。“嘉量”，如同今天所谓之标准量器。“方尺而圆其外”，这同栗氏量中“内方尺而圆其外”的用法一样，都是用圆内接正方形的边长来规定圆的大小。“廌旁”是指从正方形角顶到圆周的一段距离，如图 2 所示。“冥”同幂，指圆面积。嘉量明文规定“冥百六十二寸”，即大圆柱体横截面积为 162 平方寸，只有满足这一数字，才能使该斛在深一尺时，容积恰为 1620 立方寸。这很容易通过计算证明这一点。从初等几何中我们知道，

当正方形边长为一尺时，其外接圆直径为 $\sqrt{2}$ 尺，相应圆面积为 1.57 平方尺，即“冥百五十七寸”，比要求的“冥百六十二寸”少了五平方寸，因此要在正方形对角线两端各加上九厘五毫作为圆径，面积才能相合。这是“用度数审其容”的范例。

刘歆能够定出“廌旁”为九厘五毫，这是很了不起的。其设计思路是给定圆的面积，然后逆推其直径，这中间需要用到圆周率。考察一下嘉量的这些数据，可知刘歆所用圆周率为 $\pi=3.1547$ ，而当时人们通用的圆周率值才是“周三径一”，由此可见刘歆的计算是超越了时代水平的。

嘉量设计巧妙，合五量为一器；刻铭详尽，记录了每量的径、深、底面积的尺寸和容积；计算精确，超出了当时的最高水平；制作也很精湛。非但如此，它还有一定的重量要求。《汉书·律历志》有“其重二钧”的记录，这样，仅由此一器即可得到汉代长度、容量、衡重三者的单位量值。度量衡三者在这一器上实现了统一。正是由于这些因素，历代都对之极为珍重，历经近两千年而能保存至今，确为传世珍品，国之瑰宝。

因为新莽嘉量为人们提供了可信的汉代度量衡实物标准，历代都有不少学者对之加以研究。《晋书·律历志》记曰：“刘徽注《九章》云：王莽时刘歆铜斛，尺弱于今四分五厘。”唐代李淳风以刘歆铜斛尺考校隋唐以前的尺度，分别列为十五等，记入《隋书·律历志》中。这些，都是以嘉量为标准，考核秦汉度量衡制度的具体例子。

南北朝时祖冲之通过考校新莽嘉量的刻铭，指出了刘歆计算上的不精确之处。祖冲之精于圆周率推算，他以他所求得的圆周率检验嘉量有关数据，指出：

“此斛当径一尺四寸三分六厘一毫九秒二忽，廌旁一分九毫有奇。刘歆

廌旁少一厘四毫有奇。歆数术不精之所致也。”（《隋书·律历志》）

祖冲之推算出圆周率准确值介于 3.1415926 和 3.1415927 之间，而刘歆采用的圆周率值为 3.1547 弱，所以祖冲之说刘歆“数术不精”。不过，考虑到嘉量制作时代早于祖率 400 多年，刘歆的计算已经是相当精确了。

近人刘复著有《新嘉量之校量及推算》一文，对新莽嘉量的尺寸、容量、重量等作了精密测量，并将其换算成公制单位。根据实测，推算出新莽时一尺长 23.1 厘米，一升容 200 毫升，一斤重 226.7 克。当代学者丘光明等用加权法和单位化平均法对刘复所测数据做了分析，结果十分接近，证明刘复的测算是可信的。（丘光明，《中国历代度量衡考》，科学出版社，1992 年版，

217 页) 新莽嘉量流传至今, 是研究两汉度量衡制度的重要实物依据。

钟磬

钟磬是古代两种重要的击打乐器，它们各有不同的形制。

磬是用石头磨制的，其起源时间可以上溯到石器时代。人们在磨制石具的实践中，注意到不同石块受打击时会发出不同声音，因而受到启发，开始磨石为磬。最初用普通石头磨制，后来逐渐采用某些特殊石头（或玉石）制成各种固定单音的磬，再后来又发展成为具有几个至一系列固定音的编磬。编磬的出现朝代不晚于商。1935年在安阳侯家庄西北岗殷代大墓，曾出土过玉制编磬一组，计十三枚，就证明了这一点。

在现存的记述古人制磬技术的早期文献中，《考工记·磬氏》是最著名的一篇。该篇除规定了磬的形制以外，还专门提出了调整磬的音高的方法，即“已上则磨其旁，已下则磨其端”。这里的“上”、“下”指的是音的高低，其实质是磬发音频率的高下。按照这种办法，当感觉磬的发音过高时，就磨损磬体的两面，使其变薄，这就能将音调降低；当感觉磬发声过低时，则磨其两端，使磬体相对变厚，就能将音调升高。春秋战国时期，我国早期律学已经形成，磬作为一种乐器，其音高一定要符合律制，才能满足音乐演奏的实践需要。《考工记》的记载，就是一种通过调整磬的外形，使其发音符合律制的有效方法。

《考工记》的记载符合声学原理。我们知道，磬的发音属于板振动，而板振动的频率是正比于厚度的，由此，若磬发音“已上”，即频率过高，这表明磬体过厚，就需要“磨其旁”。“已下”，说明频率低了，需要增加相对厚度，因此要“磨其端”。唐代贾公彦在疏解《考工记》这段话时提出：

“凡乐器，厚则声清，薄则声浊。”

《考工记》所说的“上”、“下”与这里所谓的“清”、“浊”，含义是相通的（后者也许还带有音色的衡量成分）。古人没有频率之类物理学概念，能够总结出“厚则声清，薄则声浊”这种规律，在古代科学范围内，已经掌握了板振动的本质特征。

在古代乐器中，与磬相比，钟的地位更为重要。八音齐鸣，赖金以动声，钟是众乐之首。“钟鸣鼎食”成为权势、地位的标志。钟的尺度和音律又与历算、权衡密切相关。钟又是古代朝聘、祭祀等礼仪活动的必备乐器，深受古人重视。

钟是由铙发展演化而来的。铙为青铜制，一般是用手拿着敲击，铙口向上。后来因为铙愈做愈大，手不能执，于是挂起来敲，口部遂向下，这就成为钟。钟具有独特的声号结构，一般都能奏出频率确定的音。兼以青铜铸成，奏低音时，音色深沉浑厚；奏高音时，音色清脆激扬，演奏效果出色。特别应该指出的是，有些钟还具有双音结构，可以发出两个不同音高的声响。这种钟在鼓体的中部标有一个敲击点，相应的发音称为正鼓音；在鼓体的旁侧部有时标有另一个敲击点，称为侧鼓音。质量好的钟，不但这两个音位标志明确，而且两个音的频率比也趋于一致，大约为1:1.2，相当于音程间隔上的三度关系。由此可见，古代钟的音响设计是非常出色的。

钟也有大小相次成组的编钟。西周中期的编钟一组仅三枚，西周后期已增加到九枚，说明它逐渐从节奏乐器发展成为旋律乐器。我国已出土的先秦编钟很多，地区分布也很广，其中最著名的是1978年在湖北随县战国早期的曾侯乙墓里出土的罕见大型编钟。这套编钟共8组，65枚，分三层悬挂在钟

架上。架高达 2.65 米，成曲尺形排列，气势宏伟。编钟为双音结构，每钟可发两音即正鼓音和侧鼓音，成三度音程。其最大的一件甬钟通高 153.4 厘米，重 203.6 公斤，形体和重量在编钟中都是空前的。同时出土的铸钟铸于楚惠王五十九年（公元前 433 年），为铸钟年代提供了确切证据。这套编钟音域宽达五个半八度，可以旋宫转调，演奏各类乐曲，音律和谐，音色优美，音响效果令人惊叹。远在两千四百多年前的战国初期，就已经出现了如此铸造精妙绝伦、音响效果良好的大型编钟群，确实是中国古文化史上的一个奇迹。

那么，古人是如何保证编钟的音响效果呢？

这里面涉及因素很多。从形制上说，编钟带有明显的民族特色。欧洲和印度的钟，其横截面都是正圆形的，惟独中国的钟饶是合瓦式的。所谓合瓦式，是指钟体由两个小半圆合成，而不是椭圆形。北宋沈括《梦溪笔谈》“补笔谈”卷一曾分析过扁钟和圆钟发音的差别，说：“古乐钟皆扁，如合瓦。盖钟圆则声长，扁则声短。”他所指出的这一特点是正确的。圆钟具有较强的余音效果，用于定音，效果是不错的，但用于演奏，拖长的余音相互干扰，使人难于听出节奏，所以沈括说：“急叩之多晃晃尔，清浊不复可辨。”但对于扁钟，因其铣边有棱，对声振动起着制约作用，衰减较快，余音适中，因而能够成组编列，作为旋律乐器使用。

钟体上铸有一枚枚乳状突出，叫钟枚，它对于改善钟的音响效果也有作用。据王黼《博古图》卷二十三记载，“宋李照号为知乐，其论枚乳则以谓用节余声。盖声无以节，则铿锵成韵而隆杀杂乱，其理然也。”李照的分析是对的，作为钟体上的部件，枚乳是加速钟音衰减的一种振动负载，具有消耗振动能量的作用，因而可以节制余音，改善钟声。

从质地上说，古代编钟均以青铜铸成。《考工记》对这种青铜成分作了严格规定，其著名的“金有六齐”条说：

“金有六齐，六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐，……”

这里“金”，指铜。铜与锡熔合，构成青铜合金。至于铜与锡的比例，历来存在不同理解，一种认为“六分其金而锡居一”，为六份铜、一份锡，由此含锡量为 14.3%；另一种意见则认为是锡占整个青铜重量的六分之一，即含锡量为 16.7%。从对先秦乐钟的化学分析来看，以前说为是。含锡量的高低对编钟音响效果有直接影响，今人对之做过多方面实验分析。例如，用砂型浇铸不同锡含量的试样，测试其弹性模量，得知锡在 12—16% 变动时，基频较低，弹性模量与频率变化趋势较为一致；声频谱分析又表明，当锡高于 13% 时，出现基音和第三、五分音的共振峰，其余分音减弱，音色较好。又从锡青铜成分与机械性能的关系曲线看，含锡量 12—16% 时，强度较好。若含锡量过高，将急剧变脆，不耐敲击。从这些分析来看，选取锡含量略高于 14% 是合适的。《考工记》的记载和实物分析都说明先秦铸师对编钟合金成分与铸造性能、声学特性、钟体强度的关系已有较深入的认识（参见华觉明、贾云福，“先秦编钟设计制作的探讨”，《自然科学史研究》，1983 年 1 期），这是保证编钟能够获得良好声学效果的一个重要条件。

古人在铸造和使用编钟的实践中，对其几何形状非常重视。《考工记》“凫氏”一节，详细规定了甬钟各部分名称及相应尺度比值，这表明古人在设计和制造编钟时，已经形成了比较稳定的技术规范。出土文物表明，这一规范基本上是得到遵守了的。

编钟钟体具有独特的结构。其侧鼓部的钟腔下端设置有对称分布、上窄

下宽的音脊四处，其作用类似现代钢鼓的音槽，这是《考工记》所没有记载的。通过这一特殊处理，将钟体分成四个音区，有六个敲击点（通常只用其中两个），可以产生明确分开的两个成三度音程的乐音。即在敲击鼓部正中时，节线位于音脊或近脊处，得到第一基频；而在敲击侧鼓部时，节线位于鼓部正中，得到第二基频。这一编钟双音的发声原理已为激光全息干涉摄影术所证实（参见华觉明、贾云福，“先秦编钟设计制作的探讨”，《自然科学史研究》，1983年第1期）。

编钟铸好以后，还需要经过细致的调音，才能得到预期的音高和音响效果。对此，古人是通过在钟腔特定部位用粗细砺石逐次锉磨而实现的。古人在实践中逐渐积累了有关钟体结构与发声效果之间关系的一些认识。例如，《考工记》“凫氏”一节说：“薄厚之所震动，清浊之所由处。”这是说的钟体厚薄与音调高低之关系。又说：“钟已厚则石，已薄则播。”这两句谈论钟的音色受厚薄因素的影响，钟太厚则声音闷，缺乏明快感；太薄则声音单调，不够浑实。该节还提到：“钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。”这是对钟体与响度和传播距离相互关系的经验性认识。正是由于有这些经验理论的指导，加上工匠们在实践中的积累提高，使得古人能够逐渐摸索出钟体上影响音频变化的一些敏感区域，从而实现了对编钟的精细调试，取得理想的音响效果。

候风地动仪

在中国科学史上，没有什么比候风地动仪更为引人注目。它的发明者是东汉大科学家张衡。

《后汉书·张衡传》详细记载了张衡的这一发明：

“阳嘉元年，复造候风地动仪，以精铜铸成。员径八尺，合盖隆起，形似酒尊，饰以篆文山龟鸟兽之形。中有都柱，旁行八道，施关发机。外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之。其牙机巧制，皆隐在尊中，覆盖周密无际。如有地动，尊则振，龙机发，吐丸而蟾蜍衔之，振声激扬，伺者因此觉知。虽一龙发机，而七首不动，寻其方向，乃知震之所在。验之以事，合契若神。自书典所记，未之有也。尝一龙机发，而地不觉动，京师学者咸怪其无征，后数日驿至，果地震陇西，于是皆服其妙。自此以后，乃令史官记地动所从方起。”

显然，所谓候风地动仪，是用来测报地震的仪器。围绕这一名称，学界曾有不同的意见。一种认为候风地动仪包括了候风仪和地动仪两种仪器，“候风仪”是用于测风的，“地动仪”才是用于测地震的。另一种观点则认为，所谓“候风”，即是“候气”，古人认为地震是由于地“气”变动所引起的，所以叫“候风地动仪”。从引文来看，“候风地动仪”应为一件仪器，而不是两件。这里我们把它作为一件仪器进行介绍。

根据引文，“候风地动仪”制成于东汉阳嘉元年（132年），是用青铜铸造的。仪体形状就像汉代酒樽。樽上装饰有篆文山龟鸟兽之形，樽的内部立一根铜柱，张衡称之为都柱。都柱周围有八条滑道，称为“八道”。仪体的外部装有八条龙，分布在八个方位，龙口各含铜丸一个，龙头下方各放置一个张口向上的铜蛙（蟾蜍）。仪体内部装有机件，与体外龙头相连，一旦发生地震，机关被触发，龙口打开，铜丸落入铜蛙口中，发出声音，使掌管人知晓，并能判明地震来源的方向。

显然，地动仪是利用物体惯性制成的仪器。张衡通过自己巧妙的设计，使地震时仪体与都柱之间产生相对运动，利用这一运动触发仪内机关，从而将地震报出。张衡地动仪的灵敏度很高，《张衡传》列举了一个具体例子：曾有一次，地动仪朝向西边的那条龙突然吐丸，但当时洛阳城里并无震感，人们议论纷纷，都说地动仪不可靠。过了几日，送信人来到洛阳，报告说甘肃发生了大地震，大家这才信服了地动仪的精妙。

那么，地动仪的内部结构究竟什么样子呢？有不少学者对此作过探讨。早在南北朝时，北齐信都芳撰《器准》，隋初临孝恭作《地动铜仪经》，都对之有所记述，并传有它的图式和制作方法。可惜的是唐代以后，二书均失传。今人的研究则以王振铎之说影响最大。王振铎根据前人的猜测，讨论了地动仪内部可能有的各种结构，最后推断都柱的工作原理与近代地震仪中倒立式震摆相仿。具体说来，都柱就是倒立于仪体中央的一根铜柱，八道围绕都柱架设。都柱竖直站立，重心高，一有地动，就失去平衡，倒入八道中的一道。八道中装有杠杆，叫做牙机。杠杆穿过仪体，连接龙头上颌。都柱倾入道中以后，推动杠杆，使龙头上颌抬起，将铜丸吐出，起到报警作用（如图1所示）。

王振铎的推断得到了广泛赞同。中国历史博物馆陈列的张衡地震仪模型，就是根据王振铎的设计复原的。但是，也有学者提出不同意见。中国科

学技术大学李志超就曾对倒立摆结构提出过异议，他以全新的视角，提出了自己对候风地动仪的理解（参见李志超，《天人古义》，河南教育出版社，1995年版）。

李志超认为，从文献角度来看，汉代字书《释名》解释“柱”，说“柱，住也”，表明柱字原义是建筑中不动的支撑件。由此，倒立摆结构不得称“柱”，只合称锥。“都”是集总之义，说明不是孤柱，应该还附带八套机关，而立锥却只能是光杆。这样，仅由“都柱”这一名称来看，倒立摆之说也不能成立。

李志超进一步指出，倒立锥的设计使原文所述其他一切部件皆成画蛇添足。尤其是庞大的铜尊，毫无道理可言。再者，从物理评价角度来看，任何测量仪器的性能一般都可用两个互相矛盾的指标表征：灵敏度和稳定度。倒立锥的设计正好突出了精密计量技术这一主要矛盾。例如，为提高地动仪的灵敏度，就要把倒立锥的锥底做得很小，使之形成一个锥尖，但很小的锥尖承受巨大的重力压强，在不可避免的微小震动作用中必将逐渐形成不可逆的变形，其趋向是锥尖下面的支承面形成坑窝，锥尖变得圆滑。这一过程不可逆，而且是加速的。这样，倒立锥最终要倒下来，不管有无地震。如果为提高稳定度，将锥尖做成宽到实际不变形，那它的灵敏度必然很低，感知量比人所能察觉的还要大，地动仪也就失去了它的存在价值。

在这些分析的基础上，李志超提出了自己的设计：与王振铎设计相仿，底座和尊仍然是连地的刚体，都柱是可动的惯性体，但不再是倒立结构，而是处于稳定的平衡态。都柱有八个伸出的底脚，其下设八个青铜硬球，球下面是尊的底。球的上下都用坚硬青铜作垫，要足够平滑。这样一旦发生地震，尊将随地移动，而都柱由于与尊底座间摩擦力小而不能随尊移动，于是二者之间产生相对运动，触发机关，使龙将铜丸吐出。

都柱的尺寸推想为高一丈、直径二尺，这可与总体协调。都柱与尊一样，都有足够的重量，这样才可以从地震获取充足的能量，不愁“施关发机”所必需的力不够大。另外，尊的巨大质量能起到屏蔽作用，减少都柱受到的干扰，防止误报。地动仪的全部“牙机巧制”则装设在都柱及其座脚上，这样符合“都”字本义。铜尊是一个带盖的大桶，尊的侧壁上对称地设八个圆孔，孔的直径略小于铜丸，孔外饰以龙首，孔即为龙的喉，喉外为龙舌，舌有浅窝以置铜丸，铜丸靠在喉孔上，既不会掉入尊内，又把喉孔盖紧了。龙首和龙体都只是装饰浮雕。一旦地震，都柱与尊发生相对位移，“施关发机”，龙机将铜丸推出，落入蟾蜍口中，起到报警作用。为了改善蟾蜍的声学效应，还可以考虑在蟾蜍腹内另设响器，如方响之类，这可以更接近原文所描述的“振声激扬”的效果。原文中提到的“牙机巧制”，李志超将其复原为两级放大杠杆。而所谓“关”，则被设计成分立横棒，一端顶紧前级杠杆的输入端，一端顶紧尊的上沿。“关”的作用在于当都柱与尊发生相对位移时触发放大杠杆。李志超的复原设计，详见图2。

为了与原文“龙机”的说法一致，李志超把推动铜丸的杠杆设计成龙形，让它的下面有两条腿（图上没有表示出来，因为是在垂直图画方向上重叠着的）站在转轴上，尾巴横折又上翘，构成受控的牙。它的上身有两只“手”，是执行自锁功能的。设置自锁机构的目的是为了实现原文所说的“虽一龙发机而七首不动”。李志超称该机构为龙锁。其结构如图3所示，是一个悬吊

水平环，该环用八条垂直细钩吊在尊沿上，又用八条水平细钩牵着都柱，所以只能作小角度转动，但足够自由。环上有 16 个小立柱，每一对小立柱对着一龙的双“手”，龙“手”是装在龙体前的一对爪，爪是有斜缝的掌面，在向前运动时嵌入龙锁小柱，并拨动龙锁转一个小角度，于是其余七对小柱与对应的龙爪偏离，就把它们闭锁住了。在整复时，落丸龙“手”被推复位，也把龙锁带动复位。

李志超对这一设计的灵敏度做了定量估算。他指出：假定柱与尊的相对平移量为 0.01 毫米，用杠杆作 200 倍放大，得 2 毫米，这就足以控制机牙了。都柱的运动产生滚动摩擦，摩擦系数数量级为 0.001，这样，克服摩擦促成相对运动的大地加速度要大于 $0.001g$ (g 为重力加速度)，近似为 $10 \text{ 毫米} / \text{秒}^2$ 。以此加速度获得 0.01 毫米位移需要 0.05 秒。这些数字都是粗数，仅供半定量估算，其中 0.01 毫米是机构设计的主导数据，地震学灵敏性标志是 $10 \text{ 毫米} / \text{秒}^2$ ，这是三级烈度的弱震数据。加速度延时 0.05 秒的设想有些保守，此数增加则位移量将以倍数平方增加，足以弥补其他数据之不足，如机牙宽度增大、杠杆放大量减少等。由此，张衡的地动仪对于烈度为三级的弱震，是可以测报出来的。

根据这样的分析，对张衡地动仪关于震源方向的测报就可以加以讨论了。从现代地震学知识来看，地震过程复杂多变，前震后震强弱不同，方向也相异，要寻找震源只可能从多个台站的记录依时间差推算，这在古代是不可能的。但是张衡的地动仪在设计中的确考虑了方向因素，“寻其方面，乃知震之所在”，就反映了这一点。这也并非完全不可能。如果候风地动仪做到了感知微震（1—2 级），它应对远处震中传来的初波（P 波）敏感。初波的地面移动方向与震源方向一致，是纵向波，所以龙吐丸的方位应能显示一定量的方向信息。当然，这并非绝对，因为为了减少误报，地动仪的灵敏度也会有一定限制，这样，当地震的前锋纵彼不够强时，地动仪可能会对之无动于衷，但后继横波却有可能把铜丸震落，这样落丸方向与震源就没什么关系了。

李志超还讨论了地动仪的其他设计方案，经过分析比较，他认为图 2 所示的都柱推动牙机控制方案，从其内涵与史料呼应来说，较为完备。他据此设计制作了一个缩小简化的双道模型，尺寸为原大的五分之一，只有左右相对两臂的机关系统，前后面为有机玻璃板，便于演示观察。该模型很灵敏，完全证实了他的分析。

候风地动仪是中国古代一项重要的科学发明，它比欧洲出现地震仪的时间要早一千五百年左右。但由于实物的失传以及原始文献记载的简略，使得今人对其内部结构有不同的理解，这是正常的。但无论如何，张衡的地动仪具有很高的灵敏度，这是大家一致的意见。在此基础上，通过精心的分析考证、广泛的学术讨论以及合理的模拟实验，这个问题一定能够得到解决。

喷水鱼洗

喷水鱼洗是一种类似现今洗脸盆一样的古代铜盆。盆内刻有四条鱼，盆的上沿两侧有一对提耳。提耳的设置，便于提动鱼洗，但它同时又有另外一个功用，即当手掌跟它摩擦时，会发出嗡嗡响声，就像用弓拉弦能产生声音一样，因此人们又把它称为两弦。这种鱼洗有个特点，就是当里边盛有水时，以手摩擦其两弦，除发出嗡嗡响声外，盆内还能喷射出水柱，在水面形成浪花，显得十分神奇。喷水鱼洗实物，在现今杭州、大连、重庆等地的博物馆里，仍可见到（参见戴念祖，“喷水鱼洗起源初探”，《自然科学史研究》，1983年1期）（图1）。

喷水鱼洗的起源年代，现在尚不能完全确定。洗作为一种盛水器皿，出现时间很早，周代即已有了洗的存在。在汉代或汉代以前，洗是一种普通用器。但是迄今尚未见到有资料可以证明，在汉代或汉代以前已发现洗的喷水现象。另一方面，在已发现的汉洗或周洗中，都没有“两弦”这一结构部件，这与后世的喷水鱼洗形制差异很大。诚然，技术高超的人用手摩擦这类没有两弦的洗，也能使其内水面呈现规则水流甚至喷出水花，但这毕竟是熟知鱼洗喷水现象以后的刻意钻研所致，在汉代或汉代以前，人们恐怕很难想到这一点。

汉洗中也有刻饰以鱼的。宋王黼《博古图》卷二十一就曾描述过汉代的一个双鱼洗，并对古人之所以用鱼装饰做过解释，说：该洗“中饰以二鱼，笔画不繁缚而简古，真汉物也。且鱼与水相须之物，于是洗皆旌以鱼，又汉之姜诗尝有双鲤之祥，当时颇高其行，得非用为雅制耶？”可见，汉洗上刻饰以鱼，主要是起装饰作用，与喷水功能无关。但是，后世喷水鱼洗上刻画鱼首与摩擦两弦时所喷水柱吻合，则显然是古人熟知鱼洗的摩擦喷水现象并经过周密观察后的刻意所为，不再是简单起装饰作用了。此类实物的出现，是古人发现鱼洗喷水现象的重要依据。

在宋代文献中，出现了一些可能与喷水鱼洗有关的记载。例如王明清所撰的《挥麈前录》卷三就曾提到后晋石重贵向辽朝进献的两件宝物，其中有瓷盆一枚，“画双鲤存焉，水满则跳跃如生，覆之无它矣。”我们知道，喷水鱼洗在受到摩擦时，洗内的水因受迫振动而喷涌，恰似被其中的鱼搅动一般，这与《挥麈前录》的描写十分相似，由此基本上可以断定该器是一个喷水鱼洗。

宋代何蘧在其《春渚纪闻》卷九引述《虜庭杂记》，也提到了石重贵向辽主进献的那个鱼盆，但说它是木制的，云：“鱼盆则一木素盆也，方圆二尺，中有木纹，成二鱼状，鳞鬣毕俱，长五寸许。若贮水用，则双鱼隐然涌起，顷之，遂成真鱼；覆水，则宛然木纹之鱼也。至今句容人铸铜为洗，名双鱼者，用其遗制也。”“隐然涌起”，似指在刚开始摩擦时水纹涌现的情形；“遂成真鱼”，则应指摩擦进行到一定程度，水柱喷出，就像水中真有鱼在喷水一样。这样的描述，应该能用喷水鱼洗作解。但是引文中说是木盆，当为误记，因为木盆很难有因震动而喷水的效果，而传世的实物也确实没有木制的。

这里需要强调的是，引文中提到，“至今句容人铸铜为洗，名双鱼者，用其遗制也。”它明确道出了喷水铜洗的起源。何蘧生活于北宋末年，那时

江苏句容一带已有人能制造喷水的铜质鱼洗，其源起正是晋出帝的瓷鱼盆。它的名称最初称为盆，后来才叫铜洗或双鱼铜洗。再后来由刻画双鱼发展成刻画四条鱼，这表明人们对鱼洗振动的认识加深了。因为喷水鱼洗最基本的是喷起四道水柱，四条鱼配四道水柱，构思巧妙，富有艺术美形式。

需要说明的是，在《挥麈前录》和《春渚纪闻》的描写中，都没有提及需有人用手摩擦一事。这究竟是出于记载的疏忽，还是由于别的原因？比如说，该瓷盆原本就不是喷水鱼洗，它是根据某种光学成象原理制成的。这里我们做些分析。同样是在《春渚纪闻》卷九，何蘧还记述了一个玛瑙盂，说该盂“圆净无雕镂纹”，其主人“用以贮水注砚，因闲砚（视）之，中有一鲫，长寸许，游泳可爱。意为偶汲池水得之，不以为异也。后或疑之，取置缶中，尽出余水验之，鱼不复见。复酌水满中，须臾一鱼泛然而起，以手取之，终无形体可拘。”这里提及的玛瑙盂，我们在“透镜成像”一条已经分析过，认为它是依据光学原理制成的。可以看出，玛瑙盂有两个特点，一是无水时无鱼，注水后才能见到鱼，这主要是为了增加其神秘性；另一特点是虽然引文中也提“游泳可爱”、“泛然而起”字样，但总的来讲给人以静态感觉。这是因为人们看到的是鱼的像，自然不会感到盂中的水也在波动。相反，在前边提到的双鲤瓷盆则是“画双鲤存焉”，原来就雕刻双鱼在内。加水之后，“则双鱼隐然涌起”，“跳跃如生”，显得满盆都是浪花。这种效果非光学成像所能造成，只能是力学作用所致，所以我们认为该段描写讲的是喷水鱼洗。

鱼洗能够喷水，其道理何在？这当然与人手摩擦引起的洗的振动有关系。研究者发现，洗的振动属于板振动，是一种规则的类似圆柱形板的振动。人手摩擦洗的两弦，引起洗的周壁发生振动，手掌和两弦的摩擦就是洗发生振动的激励源，通过摩擦，赋予洗周面振动的能量。因为手掌和两弦的接触，使得该处总是处在振动波节位置。两弦对于洗中心是对称分布的，因此摩擦两弦引起的洗的振动只能是偶数节线（如4、6、8节线）振动。其振动情形如图2所示。

洗的周壁振动时，对洗内的水产生拍击作用，迫使水发生相应的和谐振动。在洗的振动波腹处，水的振动也最强烈，甚至由于受到波腹的拍击而喷起水柱，并在水面形成定向波浪。在洗的振动波节处，水不发生振动，浪花停止在波节线上，水面气泡和水珠也停泊在这些不振动的水面径线上（如图3所示）。这样，通过以手摩擦洗的两弦，就在洗内的水面上形成了有规则的波纹分布和水柱喷起。

水是鱼洗振动的负荷体，水量的多少也影响到鱼洗振动节线的形成。因此，为使鱼洗产生不同数量的波浪和水花，必须适当控制注水量。从浙江省博物馆所藏的喷水鱼洗情形来看，大约注入鱼洗容量 $9/10$ 、 $7/10$ 和 $1/2$ 的水，会使鱼洗分别产生4、6、8个驻波，即鱼洗分别做4、6、8节线的振动。其中4节线振动是鱼洗的基频振动，它激起的水柱最高，浪花最大。

在鱼洗振动时，通过观察水面的波纹分布，可以看出水面不振动的节线，从而推知洗壁的节线位置。这样，喷水鱼洗就使弯曲板的振动成为可见。这在科学史上，的确是一重大发明。当然，还可以用干细沙代替水，这样观察起来效果更好。

应予指出的是，类似喷水鱼洗的器皿，在我国少数民族也曾被发现过。近人徐珂收集大量清代资料，编成《清稗类钞》一书，其中有一条名为“李子明藏古苗王铜锅”，原文如下：

“古州城外河街，有陈顺昌者，以钱二千向苗人购一铜锅，重十余斤。

贮冷水于中，摩其两耳，即发声如风琴、如芦笙、如吹牛角，其声嘹亮，可闻里余。锅中冷水即起细沫如沸水，溅跳甚高。水面四围成八角形，中心不动。

传闻为古代苗王遗物。锅上大下小，遍体青绿，两耳有鱼形纹。后归李子明。”

这段话，大概是历史上最早明确而又全面记录喷水鱼洗类器物的文字，它记述了该器物的形制：外形像一个平底锅，重十余斤，上大下小，两耳有鱼形纹；还说明了其声学性能：摩其两耳，会发出响亮的声音，可以传到一里以外。把喷水性能与声学效果相联系，这是以前文献所没有过的。“可闻里余”的说法，不管是否含有夸张成分，该铜锅声学性能良好，则是可以肯定的。声音嘹亮说明它的振动性能好，振动性能好则喷水功能强。引文接下去对铜锅喷水性能的描写，就证明了这一点。“水面四围成八角形，中心不动”一语，表明作者看到的该铜锅的振动模式是八节线振动。特别应予指出的是，这段话明确提到该铜锅是得自于苗人。“传闻为古代苗王遗物”，表明苗族同胞对该器的珍重；“遍体青绿”，说明其传世时间之久。苗族同胞在很久以前就制造出了具有如此良好喷水性能的铜锅，这是值得一提的。

正方案

正方案是元代著名科学家郭守敬发明的天文仪器之一，其主要用途是测影定向。

传统的测定水平四向的方法是立竿测影。这一方法因为载入儒家经典《考工记》而更显出它的重要。《考工记·匠人》篇说：

“匠人建国，水地，以悬置，以悬以景。为规，识日出之景与日入之景。昼参诸日中之景，夜考之极星，以正朝夕。”

引文中两次出现“以悬”二字，后者就操作而言，并非必要，当为衍出的。从内容来看，《考工记》记载的这一方法是用来“正朝夕”，即确定东西方向的。其具体方法是：首先，“水地”，通过取水准的办法使待测点附近的地处于水平状态。然后，“以悬置”，树立一木质的表，通过取悬线的方法使该表垂直于地面。这些准备工作做好之后，就可以用于观测了。“为规”，指用圆规作圆，圆心在表处。然后，把日出和日没时表影与圆周相交的两点记下来，这两点连线所表示的方向就是东西方向（如图所示）。这样还怕不准确，还要白天参考日中时的表影方向，夜晚参考北极星的方向，如此来得到较为正确的东西方向。

《考工记》记述的方法简便且实用，它的内在依据是太阳的周日视运动是对称的。这一依据基本上是成立的。因此这种方法在古代得到了充分应用。《周髀算经》就有类似的记述。《淮南子》也记述了确定方向的立表测影方法，虽然其测定过程与《考工记》稍有不同，但其内在依据则完全一致，仍可归为一类。顺便指出，古人在判定方向时，除了天文学方法，还采用指南车、司南等机械的和物理的方法，但这些方法都要以天文学方法亦即立表测影作为最终判据，故此古人对《考工记》介绍的这一方法非常重视，围绕着它做了大量孜孜不倦的探讨。郭守敬发明正方案，就是这些探讨中有代表性的一个。

正方案的具体形制在《元史·天文志》中有详细记载：

“正方案，方四尺，厚一寸。四周去边五分为水渠。先定中心，划为十字，外抵水渠。去心一寸，画为圆规，自外寸规之，凡十九规。外规内三分，画为重规，偏布周天度。中为圆，径二寸，高亦如之。中心洞底植臬，高一尺五寸。南至则减五寸，北至则倍之。”

根据这段描述，所谓正方案，是一块边长四尺、厚一寸的正方形平板。在板面上离边五分之一处开有水渠，用以校正案的平面。事先确定案的平面中心，过中心画一十字线，线延伸至水渠处。以中心为圆心，由内向外依次画圆，相邻圆之间的距离为一寸，共十九个圆。在最外圆向内三分处另画一圆，在这两个圆之间刻画周天度数。最里边的圆直径二寸，在这个圆上做成高亦二寸的圆柱体，中心开一个贯通上下的洞，洞里插一根竿子。竿子的高度可以调节，一般高出案面一尺五寸；冬至前后减去五寸，使之高一尺；夏至前后则增加一倍，使之高三尺。之所以如此，是为了保证至少在每天中午时竿影一定要落入案内。我们可以通过简单的数理推算证实这一点。据《元史·历志》所云：“地中八尺表景，冬至长一丈三尺有奇，夏至尺有五寸。”地中，传统上指阳城，郭守敬登封观星台即位于此地。依据这里所给出的尺高与影长的比例，可以推算出当正方案中臬高一尺时，相应的景长略大于1尺6寸，这

是冬至那天中午时的情形。夏至时桌高度为3尺，用类似方法推算，其影长为5寸6分。其他日子中午影长当介于这二者之间，均落于案内。这是在登封的情形。另外，《元史·历志》还给出了在当时北京用40尺高表测得的冬夏至影长：“今京师长表冬至之景七丈九尺八寸有奇，……夏至之景一丈一尺七寸有奇。”依此比例推算，冬至时正方案中1尺桌表景长约为2尺，恰落入案内；夏至时3尺桌表影长约为9寸，景端落在从里数起的第九规上。可见，郭守敬关于正方案中桌表高度的规定主要是从元大都（今北京）天文台的实际出发的，对于大都以南的广大地区也适用。

正方案结构如此，那么它是如何使用的呢？《元史·天文志》记载说：

“凡欲正四方，置案平地，注水于渠，眠平，乃植桌于中。自桌景西入外规，即识以墨影。少移辄识之，每规皆然，至东出外规而止。凡出入一规之交，皆度以线，屈其半以为中，即所识与桌相当，且其景最短，则南北正矣。复遍阅每规之识，以审定南北。南北既正，则东西从而正。然二至前后，日轨东西行，南北差少，即外规出入之景以为东西，允得其正。当二分前后，日轨东西行，南北差多，朝夕有不同者，外规出入之景或未可凭，必取近内规景为定，仍校以累日则愈真。”

根据这段记述，在利用正方案测定方向时，首先要“注水于渠”，把案调整得处于水平状态。然后在中间洞中树起一个表，观察表影投向。随着太阳升高，表影逐渐移入案内，视表影顶端落在某一圆周上时就用墨标出相应记号，从上午影子由西进入外圆，到下午影子向东跨出外圆为止。把同一圆上两个墨点连接起来，它们的中点和圆心联线的方向就是正南北方向。把各个圆上相应两个墨点都这样求出结果，让其相互参校，就能得出正确的南北方向。南北方向确定以后，东西方向也就随之确定了。

利用正方案测定方向，比之传统的测影定向方法有许多优越性。

首先，在正方案外圆的刻度圈上，刻画着周天度数，而此前及当时人们常用的较为精细的地平方位表示法，是以四维、八干、十二支来标示二十四个地平方位角的地平坐标体系。诚然，在宋代的一些浑仪上有百刻环，每刻合今度 3.6° ，也用到了地平方位上，但那毕竟是与浑仪连为一体的。现在在一个测定水平四向的仪器上刻画上了周天度数，这是富有新意之举。它与西方表示地平方位的 360° 分度体系已相去无几。

其次，《考工记》中记述的方法固然简便，但那种方法测量的是日出、入时的表影，而日出入时的表影一般都比较模糊，这样它们和圆周的交点就不易确定。现在，利用正方案来测，就弥补了这一不足。因为正方案要求测定的是日升高以后表影端点的位置，这时光线已强，表影模糊程度已经大为下降。

更重要的是，郭守敬在这里强调要使用多组观测的办法，以提高最终结果的准确度，这完全符合近代误差理论。误差学说强调以多次观测结果的平均值作为最后结果，这与郭守敬的思想是一致的。诚然，《考工记》中也提到一次测量不够，还要“昼参诸日中之景，夜考之极星，以正朝夕”，但这是用另外的测量作为参校，不是对同一因素的反复观测，在误差理论上这是不一样的。

在观测中，郭守敬注意到冬、夏至前后太阳的赤纬变化较小，即使仅取最外圆上的一组观测点，结果也很正确。而在春、秋分前后，太阳赤纬变化大，晨昏之间，差别显著，外圆上的观测点对于真子午线来说不对称，测量

结果有偏差，不可为凭。这时必须取用最内圆上的观测点，并要连续几天反复测量，才能得到正确的结果。他的这一认识是比较科学的。

郭守敬发明的正方案用于测影定向，准确度很高。现存的河南登封观星台是郭守敬领导修建的，那里就设有正方案。观星台长达一百多尺的测影石圭是郭守敬测定南北取向的直接见证。1975年，北京天文台曾派人去那里用近代科学方法测定当地子午线方位，测量结果表明，石圭遗址的取向，同当地子午线方位符合得相当好。七百年前的郭守敬能取得这样的成绩，不能不令人钦佩。

指南针

指南针是中国古代四大发明之一，具有十分重要的历史地位。

指南针是利用磁体的指极性制成的一种方向指示器，所以它的发明是以磁体指极性的被发现为前提条件的。一般说来，要发现磁石吸铁现象并不困难，但要发现磁石的指极性，就难得多了。就目前所知而言，最早明确提出磁石能吸铁的文献记载，当推《吕氏春秋·精通》所写的“慈石召铁，或引之也。”而明确提及磁石指极性的先秦文献，则至今尚未发现。在战国末年成书的《韩非子·有度》中有“故先王立司南，以端朝夕”的记载，《鬼谷子·谋篇》里也有“郑子取玉，必载司南，为其不惑也”之语。这里的“司南”，无疑是一种指南器，可以起到标示方向的作用，它有可能是依据磁石的指极性而制成的。不过，从文献本身我们还难以做出进一步的判断。

一般认为，东汉王充《论衡·是应篇》中提到的司南，可以断定是一种磁性指南器。其有关文字如下：

“司南之杓，投之于地，其柢指南。”

杓，是勺子。“地”，指中央光滑的地盘。“柢”，是勺的长柄。从这段话中可知，做成勺子样式的“司南”，放置在坚硬光滑的“地盘”之上，它的长柄会自动指向南方。这样的“司南”，只能是一种磁体。

根据《论衡》中的这段描述及其他有关文献资料，今人王振铎复原出了古代司南的原型。复原品藉天然磁石琢制而成，其大小形状类似通常家用汤勺，只是其底部呈球形。将它放在一块以青铜做成的地盘中央，它就会转动起来，直到与地磁场方向基本一致为止。这时它的勺柄指向地磁场南极。地盘四周刻着四维（乾、坤、巽、艮）、八干（甲、乙、丙、丁、庚、辛、壬、癸）和十二支（子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥）共二十四个方位。盘中央琢磨得非常光滑，磁勺即置于其上。

用天然磁石磨制司南，需要一定的技巧，一般情况下不易成功。因此，有学者怀疑《论衡》中的司南不是磁性指向器。但是，用天然磁石确实能够磨制出上述形状的司南来，王振铎即曾有过成功的尝试。不过，用天然磁石琢磨司南，其成品率低，磁性弱，且与地盘接触时转动摩擦阻力也比较大，效果难免要受影响。因此，它的使用和流传都受一定的限制。

司南不能叫做指南针，它只是指南针的一种原始形式。指南针形制很多，其原始形式除司南以外，还有一种高级些的，叫指南鱼。指南鱼的具体制作方法及应用载于北宋初年曾公亮主编的《武经总要》，该书的“前集”卷十五提到：

“若遇天景曠霾，夜色暝黑，又不能辨方向，则当纵老马前行，令识道路。或出指南车或指南鱼，以辨所向。指南车法世不传，鱼法以薄铁叶剪裁，长二寸，阔五分，首尾锐如鱼形。置炭火中烧之，候通赤，没尾数分则止。以密器收之。用时置水碗于无风之处，平放鱼在水面令浮，其首常南向午也。”

这段话中记述的指南鱼制作方法，符合科学道理。把鱼形铁片加热到通红，这时它的温度高于居里点，铁片原有的磁畴瓦解，整个铁片成为顺磁体。在蘸水冷却时，磁畴重新形成，在形成过程中，由于受地磁场作用，磁畴形成规则排列，鱼即被磁化。对着北方的鱼尾被磁化成为指北极，鱼首则成指南极。所以，这段话是利用地磁场的磁化法制造人工磁体的可贵记录。

在上面这段记载中，古人不但利用热处理法使指南鱼获得磁性，而且还

使用淬火法。淬火相变使得磁化了的指南鱼具有较强的矫顽力。同时，指南鱼“首尾锐如鱼形”，呈长条状，这有助于减小退磁因数，使指南鱼的磁性可以保持更长久。

还需要指出的是，“没尾数分则止”，包含着深刻的科学道理。因为鱼尾向下倾斜，使得整个鱼体与地磁场方向更为接近，从而增强了磁化效果。我们知道，在中高纬度地区，地磁场有相当大的倾角，如果把鱼水平放置，那就只有地磁场的水平分量起作用，磁化效果就要差一些。古人不懂得地磁场和地磁倾角，他们是在实践中把握住了这些因素。“以密器收之”，指的是对指南鱼的保存。如果“密器”是用铁做成的封闭盒子，或者盒内置有磁石铁条之类物体，指南鱼放进去以后，就会与铁盒或磁石、铁条形成闭合磁路，这有利于保存指南鱼的磁性。其他质地和形式的“密器”则无此功效。

指南鱼的制作，比之司南要简便得多。而且它浮在水面上，转动时所受摩擦力也要小得多，这就提高了它指南的准确度。但是，用地磁场磁化所得到的磁性毕竟是比较弱的，这就限制了它的普及和使用。所以，最后指南鱼还是让位给了指南针。因为指南针采用了新的磁化方法，磁性较强，而且它用磁针代替指南鱼扁长的铁片，既提高了指向精度，又减小了退磁因数，因而比指南鱼更为进步。

指南针出现的具体时间，现在很难断定。但可以肯定的是，它不会迟于11世纪。11世纪上半叶，北宋学者杨惟德撰相墓书《莹原总录》，其卷一提到：

“客主的取，宜匡四正以无差。当取丙午针，于其正处，中而格之，取方直之正也。”

意思是说，定方位时，应使东西南北没有差错。为此，应该使用磁针。磁针稳定不动时，它的指向为丙午方向，这时再加以修正，就能得到正确的水平四向。

这段话给我们提供了两个信息：其一，当时已经发明了磁针；其二，人们还发现了磁偏角现象，并提出了校正磁针定向误差的方法。《莹原总录》撰进于庆历元年（1041年），与曾公亮等撰《武经总要》（1040—1044年）同时。这表明磁针与指南鱼问世时间差不多，而磁针不久就全面取代了指南鱼。

最早明确提到指南针制法的文献，是北宋沈括的《梦溪笔谈》，该书卷二十四“杂志一”写道：

“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。水浮多荡摇，指爪及碗唇上皆可为之，运转尤速，但坚滑易坠，不若缕悬为最善。其法取新纩中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之，则针常指南。其中有磨而指北者。予家指南、北者皆有之。磁石之指南，犹柏之指西，莫可原其理。”

这些话给我们传递了一些有价值的信息。它表明，当时人们已经掌握了用天然磁石摩擦磁化铁针来制作指南针的方法。在现代电磁铁出现之前，这种方法是制作指南针最常见而有效的方法。在这段话中，沈括不但记叙了指南针的制作方法，提示了磁偏角的存在，而且还讨论了指南针的安装方法。他介绍了四种安装方法：水浮法、指甲托法、碗口托法，丝悬法（如图1所示）。在这四种方法中，第二和第三种虽然运转灵活，但“坚滑易坠”，因而不常被人们所采用。水浮法到后来发展成为水罗盘，在古代航海中获得了

广泛应用；丝悬法则至今仍在一些实验中使用。

沈括对于丝悬法评价很高，这是有道理的。他选用独缕蚕丝悬针，因为独缕，本身没有扭转的弊病，不会似合股丝线呈螺状结构。另外，用芥菜子大小的蜡珠粘合独缕蚕丝，缀于针腰，这就避免了像结扭针腰那样使独缕产生弹性。这样，能够使磁针产生扭矩的，只有地磁场的作用。因此，用丝悬法安置的指南针，灵敏度是相当高的。

沈括之后，人们仍然在不断探讨指南针的装置方法。其中值得一提的是南宋陈元靓著的《事林广记》卷十中所记的指南龟的制法。根据他的记述，在做指南龟时，先以木刻龟，在龟体上沿首尾方向开一洞，放入条形磁石，然后以蜡填满，在龟尾部敲入一根针，作为表示方向之用。再用一块木板，上面安一个竹钉，把龟腹下面挖一小孔，支在竹钉上。转动木龟，当它静止后，龟首指北，针尾即指南。其构造如图 2 所示。从结构上来看，这里用竹钉作支轴，可以说是后世旱罗盘用支轴托磁针的先驱。

磁针的安置问题解决以后，指南针形制的进一步发展，就是与方位盘联成一体，这就是后人所谓的罗盘或罗经盘，它在古代社会生活中发挥了巨大作用。

指南针在古代主要被堪舆家们用于相宅相墓，同时也被用于航海及其他。正是这后者对人类社会进步发挥了巨大作用，因而指南针才得以跻身于古代四大发明的行列。我国典籍记载指南针用于航海，始于宋代朱彧 1119 年写的《萍洲可谈》，书中写道：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针。”之后，类似的文献层出不穷，这表明在航海活动中，指南针普及得相当快。这一发明后来经阿拉伯传入欧洲，对欧洲的航海业乃至整个人类社会的文明进程，都产生了巨大影响。

跋

中国古代是否存在物理学和化学，是关注中国科学史的人们讨论的问题之一。因为一旦对此做出了否定的回答，接着的一个问题就是：既然古代不存在物理学和化学，那么物理学史和化学史不就成了“空中楼阁”了吗？它们以什么为研究对象呢？

其实，上述问题并无必然的逻辑联系。首先，不论古代是否存在我们今天所谓的物理学和化学，都不影响这两门学科史的存在。因为科学史研究的基本任务之一就是対古人各种各样的知识进行分类整理、阐释说明，以探讨它们的发展演变，揭示当代各学科在古代的相应源起，并藉此了解当时的社会。进行这种研究，并不要求古人也有与今天相应的学科分类体系。现在我们研究自然界，把它区分为物理学问题、化学问题、生物学问题等等，自然界本身又何尝存在这样的划分？

其次，中国古代是否存在物理学和化学，这并非不言自明，因为它涉及到对这些学科概念的理解。古代当然不存在当今意义上的物理学和化学，但在中国古代传统文化中，确有许多知识可以在近代“物理”、“化学”的意义下将其整理归类。从发展的角度来看，物理、化学概念当然可以涵盖古代的这些知识。例如，炼丹术的演变最终促成了近代化学的产生，这是众所周知的。总的说来，与今人一样，古人对自然界也有着浓厚的兴趣，他们在研究自然现象时，同样涌现出了众多杰出人物，撰述了大量相关著作，提出了

自己的理论学说，发明了有关仪器，进行了观测和实验。这些，都是中国物理学史和化学史的重要研究对象。这两门学科可以大有作为，这不仅在理论上能够得到证明，而且已被中国科学史工作者丰富的研究实践所证实。这也正是本书得以存在的理由。

1992年春，辽宁教育出版社从繁荣学术角度出发，组织作者撰写《中国古代科学技术史纲》丛书，并约我等撰物理化学卷。自从事中国科学史研究，迄今甫及十载，读书有限，所论不多，自知承担这一任务有相当难度，虽然如此，仍然硬着头皮应约。因为我觉得辽宁教育出版社这一选题富有吸引力，它以自己独特的撰写体例，提纲挈领地向读者展示中国科学史的基本形貌。

《史纲》的体例既符合古代科学的特征，又突破了传统科学史著作格式，令人感觉新颖，并且给作者留下了足够的写作余地。非但如此，出版社的同志还申明，本书的目的不是要编成一套四平八稳面面俱到的工具书，而是要在力争比较全面地反映中国科学史概貌的基础上，努力表现科学史研究新的进展，展示作者的学术见解。自从事中国科学史研究以来，读书作文，略有心得，希望能公之于众，领受针砭。现在有了这样的机会，自然应当好好利用，况且还可以借此对这两门学科作全面回顾，从中学习到许多新的东西，为今后在学术上的发展做进一步的积累。虑及于此，虽然绠短汲深，也仍然鼓起勇气受任。现在，经过努力，书稿已经完成，是非短长，读者可以评说了。

《史纲》作为一套丛书，在内容安排上，各卷要彼此兼顾。这样，古代某些与物理、化学有关的人物、著作等，就不能放在本卷之中，这是应予以说明的。还应指出的是，在本卷书的篇目中，“《周易参同契》”、“狐刚子”、“陶弘景”、“秋石炼制”、“炼丹器具”等五篇系由孙毅霖硕士执笔。这些篇目的写作，为本书增添了光辉。另外，本书在写作过程中，还参阅了前人和当代学者的大量研究成果。没有这些基础，本书难以问世，但由于体例所限，对于所参考文献，文中恕难全部列举。在本书的写作和出版过程中，许多同志都向作者提供了帮助。我们谨在此表示衷心的感谢。

本书当然还存在不足，希望读者给予批评指导。

作者

