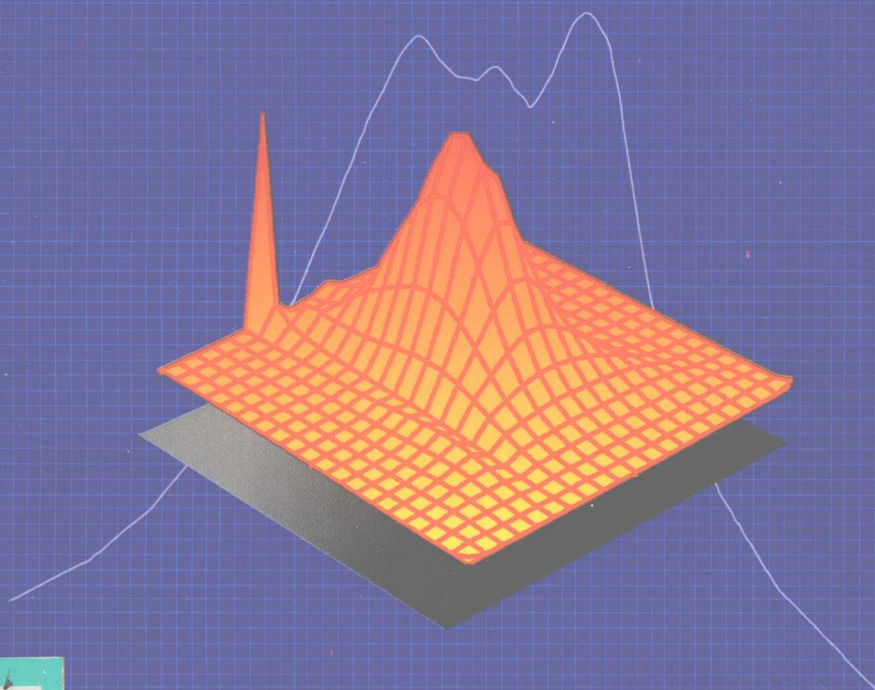


科学与工程计算丛书

超新星爆发机制和数值模拟

CHAOXINXING BAOFAJIZHI HE SHUZHIMONI

王贻仁 张锁春 谢佐恒 汪惟中 编著



SECS

河南科学技术出版社

科学与工程计算丛书

超新星爆发机制 和数值模拟

王贻仁 张锁春 编著
谢佐恒 汪惟中

河南科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

超新星爆发机制和数值模拟/王贻仁等编著. —郑州: 河南科学技术出版社, 2003.6

(科学与工程计算丛书)

ISBN 7-5349-2968-7

I. 超… II. 王… III. ①超新星-射电爆发②超新星-数值模拟 IV. P145.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 010425 号

责任编辑 刘嘉 责任校对 徐小刚 王艳红

河南科学技术出版社出版发行

(郑州市经五路 66 号)

邮政编码: 450002 电话: (0371) 5737028

河南第一新华印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 20 字数: 550 千字

2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—550

ISBN 7-5349-2968-7/T·574 定价: 36.00 元

内 容 提 要

本书是我国国内第一部专门论述与“超新星爆发”有关的天文观测、理论和计算的著作。它特别注意将科学普及和专业知识相结合，综合介绍和重点突出相结合，侧重论述与探讨了与Ⅱ型超新星瞬发爆炸机制相关的理论和计算问题。

全书共分5篇14章。“绪论”篇重点普及“宇宙起源”和“恒星演化”的基础知识。“超新星”篇介绍历史超新星和超新星遗迹、超新星分类特征和诞生率，重点介绍Ⅰ型和Ⅱ型超新星爆发机理。“物理因素”篇重点介绍关键的物理因素，即物态方程、电子俘获率和中微子与物质的相互作用。“计算方法”篇综合介绍恒星演化晚期阶段天体物理中涉及到的流体动力学方程组和中微子输运方程的计算方法。“数值模拟”篇基本上围绕作者自行设计和编制的广义相对论的一维球对称的“SNⅡ - WLYW89”程序，介绍它所涉及的微分方程组、差分格式、计算模型、参数选取，以及部分计算结果的分析。

本书可作为从事天体物理、计算物理及其相关学科的工作者的参考书，尤其适合作为有志于从事超新星理论研究和计算的高等院校的学生、研究生以及教师选修课的教材。

“科学与工程计算丛书”第三届编辑委员会 (2002.9)

名誉主编：郭柏灵

名誉编委：(按姓氏笔画为序)

于 敏	石钟慈	曲钦岳	乔登江	庄逢甘	孙锦山
李德元	何祚庥	谷超豪	陈式刚	陈能宽	林 群
周毓麟	郑哲敏	胡思得	贺贤士	秦元勋	郭柏灵
黄祖洽	符鸿源	程开甲	曾庆存	裴鹿成	

编 委：(按姓氏笔画为序)

刘儒勋	刘儒勋	刘德贵	孙文心	纪立人	李荫藩
李晓梅	吴辉碇	吴湘辉	沈平平	沈隆钧	宋国乡
陈雨生	张锁春	金亚秋	姜宗福	袁光伟	袁健民
郭华谟	黄 敦	蒋伯诚	傅德薰	蔡宗熹	蔚喜军
雷光耀	颜 宏				

常务编委：(按姓氏笔画为序)

刘儒勋	孙文心	陈雨生	张锁春	袁光伟	蒋伯诚
蔚喜军					

责任编辑：吴湘辉

编辑出版工作委员会主任：蔚喜军（兼）

本书执行主编：张锁春

代 序

为促进我国科学与工程计算事业的发展，1988年7月，中国核学会计算物理学会在青岛举办了全国计算物理学术研讨会。会议期间，经有关专家商议，决定出版一套《科学与工程计算丛书》，得到了许多著名科学家的热情关心和支持。经过两年多的筹备，正式开始了这套丛书的编辑出版工作。

计算机是一种延伸、强化人的思维的工具。当世界上第一台计算机 ENIAC 诞生时，冯·诺伊曼就预言这一新工具所拥有的巨大潜力和对人类社会的深远影响。在过去的四十多年里，计算机迅猛发展，其应用范围从国防尖端部门扩大到科学技术和国民经济建设的各个领域，计算机已经给人类社会带来了一场深刻的技术革命。计算机的发展和计算方法的进步极大地提高了人们的计算能力，从而引起了科学方法论上的巨大变革，使计算成为科学研究的第三手段，对研究的定量化起到特殊重要的作用。“实验、理论、计算”三位一体是现代科学研究基本模式，三者既相对独立，又互相补充、互相依赖。人们在计算机上可充分利用数值计算来模拟现实世界的各种过程，部分替代实验或作为实验的补充，检验理论模型的正确性，尤其是还能呈现现实生活中无法重复或无法进行实验的现象，或模拟耗资巨大的实验工程，探索新的奥秘。由于有了计算这一强有力的手段，大大增强了人们科学研究的能力，促进了不同学科之间的交叉渗透，缩短了基础研究到应用开发的过程，加速了把科学技术转化为生产力的进程。

在计算机的发展和数值计算的广泛应用的推动下，科学与工程计算（简称科学计算）作为一门工具性、方法性和边缘交叉性

的新学科，已经开始了自己的发展。它既包含了在各种科学与工程领域中逐步发展起来的计算性学科分支，如计算数学、计算物理、计算力学、计算化学以及计算地震学等计算工程学，又包括经济科学、医学、生物学和系统科学等发展中所需要的计算理论。计算方法则是它们联系的纽带和共性的基础。科学计算就其本质而言，是要解决现代科学与工程中提出的大规模、非线性、非均匀和几何形状非规则的复杂问题，是数学理论和计算艺术的高度结合，是复杂系统的数值计算或模拟。计算机的性能与算法水平的乘积是衡量计算能力高低的指标。

我国在科学与工程计算领域已有了一支较高水平的、能打硬仗的队伍。这支队伍在我国计算机水平相对落后的条件下，以其智力优势和拼搏精神为我国的国防建设和经济建设做出了重大贡献，积累了丰富的实践经验，急需加以总结、提高、推广和交流。编写《科学与工程计算丛书》，正是为了适应这种形势的需要，它的出版将会填补我国这方面的空缺。

这套丛书是采用“众人拾柴火焰高”的集资方式创办的，由于丛书的涉及面极广，故不设主编，由常务编委轮流担任执行主编。丛书作者都是奋战在教学和科研第一线的专家学者，他们为发展我国的科技事业不辞劳苦，呕心沥血，无私奉献。谨向他们表示崇高的敬意。

可以期望，《科学与工程计算丛书》的出版发行，必将有力地推动我国科学计算事业的发展。

《科学与工程计算丛书》编委会

1990年8月

序

超新星爆发是恒星世界中甚至肉眼可以看见的最为剧烈、最为壮观的罕见的天文现象。从中国正式史书上比较系统完整的古天象记录中可以发现，在长达四千多年的时期内可能出现过 8~13 颗明亮的超新星。人们通过现代大型望远镜和先进的 CCD 探测技术不仅可以发现非常遥远的河外星系中爆发的超新星，而且借助于远红外望远镜可以发现银河系内位于银盘上但被星际尘埃云遮掩而无法用光学望远镜探测的超新星爆发现象。迄今，天文学家已经从河外星系发现了一千多颗超新星爆发事件。

在最近已经超过四百年的时期内人们并未发现肉眼可以看见的银河系内超新星（1987 年 2 月出现的肉眼勉强可以看见的超新星是在银河系的近邻星系——大麦哲伦星云中爆发的）。但是在公元 1006 年（宋真宗时期）和 1054 年（宋仁宗时期）相隔的 48 年中，就先后出现了两次极为明亮的超新星：前者最亮时可以明亮鉴物，照出人影，几乎同四分之一的月亮同样明亮。在夜晚，它的耀眼光辉持续了一年多才消失；后者在最明亮时亮度超过了太白金星，白昼显现了 23 天，夜晚它的光辉也持续了两年多。这两颗超新星却分别代表了现代超新星分类中两大类型（I 型和 II 型）的典型。特别有意义的是，1054 年超新星爆发时向外抛射的物质（遗迹）和超新星本身爆发后的中心残骸分别是现代天文学著名的蟹状星云和蟹状星云脉冲星。它们是现代天体物理学中被研究得最多的单个天体。我国宋仁宗时期的有关记录成了国际天文学界非常珍贵的文献。

根据爆发过程中呈现的光谱特征和光变曲线形状，人们将超

新星划分为 I 型 (1985 年以后它又划分为 I_a 和 I_b 两子型, 1990 年以后再划分出 I_c 型) 和 II 型. 但是, 如果按照它们爆发的物理内在原因或图像, 人们将超新星划分为热核爆炸型 (I_a 型) 和核心坍缩型 (II 型、 I_b 型和 I_c 型) 两大类. 实际上, 这两大类型超新星爆发的原因和过程及爆发后的结局都不大相同, 爆发前它们也起源于不同类型的天体.

对于恒星起源与演化的研究来说, 还有许多尚未解决的问题, 甚至还有不少原则性问题不清楚. 但是, 20 世纪天体物理学理论研究所取得的最大成就是人们根据近代物理学原理成功地建立了一整套相当完美的恒星内部结构、恒星起源与演化理论以及有关元素核合成.

超新星爆发同恒星演化的终结、中子星的诞生以及超高能宇宙线的起源在当时几乎是完全独立的四个重要天体物理事件, 最初在理论上被紧密地联结在一起的是 1934 年由 Baade and Zwicky 在一篇仅仅不足半页的闪烁着光辉的经典论文中提出来的. 但是, 由于超新星爆发理论极其复杂, 只有通过超巨型现代电子计算机的数值模拟才可能对它进行深入研究. 在 20 世纪 50 年代, 有关恒星演化理论取得了巨大进展. 在这个基础上, 再结合现代电子计算机的问世并且应用于恒星演化及超新星的研究. 在 20 世纪 60 年代后期, 人们开始有关超新星爆发的数值模拟计算研究, 超新星爆发的现代理论模型是 70 年代以后才出现的. 超新星的研究是当今天体物理最活跃、也是最困难的核心领域之一. 它不仅是恒星演化理论发展的一个极重要的环节, 同恒星形成、星系及其化学元素演化、星爆星系、宇宙线高能粒子的起源、近几年非常热门的研究课题—— γ 爆的天体起源等问题以及整个核天体物理学都密切相关; 它也是天体演化学和极端条件下物理学的交叉点, 同粒子物理、核物理、广义相对论等理论物理分支都紧密地联系.

由于问题极为复杂，完全从理论分析出发，难以获得有关超新星性质的重要结论。1965 年以前，人们关于超新星的爆发图像、爆发物理原因以及它们的前身星的探讨都只是推测性的研究。迄今有关超新星研究的所有重要进展都是建立在上述现代理论物理和现代数值计算方法基础上，利用先进的大型电子计算机进行模拟计算研究获得的。30 多年来，无论是 I_a 型超新星爆发或是 II 型（包括 I_b 型和 I_c 型）超新星爆发的理论研究，都取得了非常大的进展，有关爆发图像的主体骨架都已基本建立。由于超新星爆发过程涉及许许多多复杂物理因素，而这些因素之间纠缠在一起，迄今人们仍未研究清楚。因此，无论是有关 I_a 型超新星爆发理论研究或是关于 II 型超新星爆发的理论研究中都存在着许多尚待解决的重大疑难问题。例如，II 型超新星爆发的真正物理机制至今也未搞清楚。迄今没有一个公认的合理模型能够根据现在人们已经认识的物理原理模拟计算出来 II 型超新星的爆发，这显然是令当代天文学家和理论物理学家们最为头痛的主要困难问题之一。虽然如此，人们绞尽脑汁地想出不少巧妙的方法与技术，从这些异常复杂且还在不断探讨与改进的深奥物理理论中，抓住主要的因素，逐步改进模拟计算，不断地取得新的进展。可以说，超新星爆发机制及其模拟计算研究是当今天文学家与物理学家最为关注的重大课题之一。

本书作者是我国从事 II 型超新星爆发数值模拟计算研究的几位专家。同国际（如美国）上最初从事超新星爆发数值模拟计算研究的情况相类似，以王贻仁研究员为首的这个研究小组中的三位（包括张锁春研究员和汪惟中研究员）同志早年参与我国核爆炸物理与数值模拟计算研究，与国际上同行显著不同的是，他们从事超新星爆发研究的环境与条件是极其艰苦的。国际上各个有关研究小组不仅都具有国际最先进的大型电子计算机，而且国际上学术交流极为频繁，最新的研究进展、信息与资料能很快地互

相传递。此外，各个研究小组所采用的极为复杂的计算程序都是近 40 年来许许多多研究专家长期在前人撰写的程序基础上不断地彼此改进与深化而建立的。当今国际上几乎没有一个超新星爆发研究小组的数值模拟计算程序从头至尾是完全由一家编写完成的。但是，以王贻仁为首的研究小组自 1983 年刚从我国核爆炸研究转向超新星爆发的研究以来的 17 年期间，由于众所周知的有关“保密”制度的原因，他们不可能同国际同行直接交流，更不可能引进国外已经相当成熟的研究程序。他们只能“闭门造车”，完全凭着他们已经从核爆炸研究中所具备的理论物理学与计算数学的深厚基础，凭着他们令人钦佩的才能和难以想像的、惊人的顽强毅力，完全独立于国际上相关研究小组，完成了这一整套极为复杂的有关超新星爆发动力学机制研究的数值模拟计算程序。不仅如此，为了深入地探讨同超新星爆发现象密切相关的主要物理因素及其变化，研究它们对于超新星的爆发现象的影响作用，王贻仁小组引进了一些与国际上其它研究小组不同的、具有自己特点的处理方法。例如，他们在采用四粒子简化模型基础上，在处理原子核系统经历气泡相向核物质相转变过程时，用独特的王贻仁平衡方程改进了难以处理的 Cooperstein 平衡方程。在这些改进后的模拟计算中他们发现，在某些特殊构造的模型中，可以获得超新星瞬时爆发的现象。

在 II 型超新星爆发问题的研究中，当今国际上仍处于混乱状况的局面，各个研究小组具有各自特色。王贻仁小组独自数值模拟计算研究的结果并不比国际同行的结果逊色。这充分显示了王贻仁小组集体的智慧与才能，完全可以同国际同行相匹敌，犹如“乱世出英雄”。他们所取得的成果，充分显示了我国科学家卓越的才能与可敬的拼搏精神。

这本书的主体基本上是他们 20 年来从事这项研究的精彩总结。这是一本在国际上尚未曾出现过的关于超新星爆发问题研究

的专著。笔者自 1960 年以来一直关注着包括超新星爆发理论在内的核天体物理学，并从事这方面的物理问题的研究。就我所知，虽然有不少比较系统和非常出色的评述性文章，如 H. A. Bethe 的 Supernova Mechanism [Rev. of Modern Phys., 1990, 62 (4): 801] (这篇文章长达 100 多页) 等，但像本书这样系统与全面介绍超新星爆发的专著，还是首次出现。本书从统计物理学、核物理学的理论、中微子物理学（包括星体内各种发射中微子过程、中微子同重原子核及各种粒子的相互作用以及中微子输运过程的 Boltzman 方程）等各个不同物理领域出发，全面而系统地介绍超新星爆发的有关理论，并同时采用广义相对论来处理与计算超新星核心的坍缩、反弹激波的传播以及它的消失或导致恒星星幔向外爆发的复杂动力学过程。不仅如此，本书对于有关超新星爆发模拟计算中采用的数值计算方法的系统介绍与讲述也是本书的特色之一。在有关超新星爆发理论的文献（包括各种有关评述性文章）中，也未曾看见过如此系统完整的介绍。

这本书第一篇是针对非天文界人士而撰写的有关宇宙学和恒星演化的简短科普知识。对于非天文界学者来说，在系统阅读有关超新星爆发理论之前，阅读这部分内容很有必要。

总之，这是一本为物理学界和天体物理学界对此有兴趣的学者，特别是年轻的研究生系统学习超新星爆发理论而非常有益的专著。笔者早就比较了解他们的研究，非常钦佩他们。笔者有幸首先拜读他们这本专著后，更是激动万分。不仅从书中学习到许多我迫切需要补充的专门知识，更重要的是，从这本书中，我更需要学习他们追求真理、不为名利而顽强拼搏的科学精神。这种精神是伟大的，它将带领中国科学家走向更加光辉的未来。

南京大学天文系 彭秋和

2002 年 2 月 22 日

前 言

超新星 (SN) 爆发是宇宙中发生的最激烈的事件之一, 近代天体物理的许多研究与之密切相关. 重元素的起源与合成、中子星与黑洞的形成、宇宙射线的起源与加速等, 都与超新星爆发有关. 由于它爆发时光度大, 可作为测量遥远星系距离的标准烛光, 亦可为宇宙论研究哈勃常数 H_0 和减速因子 g_0 提供依据. 现代超新星的研究涉及到前身星演化、爆发机制、辐射传能、爆炸物理, 而爆炸物理本身又涉及到物理学中的相对论、基本粒子、核物理、激波、高温高密物质等, 爆发时又涉及到全波段观察它们的遗迹、化学演化、与星际物质的相互作用等. 总之, 超新星及其爆发的研究, 对于研究宇宙学、恒星演化、高能天体物理、核天体物理, 都具有十分重要的意义, 始终是国际天文学界研究的前沿课题之一.

撰写本书最初的由衷是想把以王贻仁为首的超新星科研小组 (1983~2000 年), 围绕 II 型超新星瞬发爆炸机制理论研究所开展的数值模拟工作, 以及所取得的研究成果进行系统的总结和提高, 并将自行设计和编制的程序, 以及模型参数等宝贵的资料进行整理, 以便保存下来. 征求有关专家意见后, 认为这种想法固然很好, 科研告一段落后写成专著也很有必要, 但希望把知识面拓宽些, 使专业知识和科学普及相结合. 这样做的好处是既可以使专业工作者在现有的基础上得以继承和发展, 又可以使天文爱好者产生兴趣, 容易地进入该领域, 使该书能发挥更大的使用价

值，获得好的社会效益。

正是采纳了这种好的建议，本书的内容安排如下：第一篇是“绪论”，介绍一些有关“宇宙起源”和“恒星演化”方面的知识，因为超新星爆炸是恒星在宇宙中演化到晚期阶段走向死亡那一瞬间出现的现象。第二篇是“超新星”，除了介绍历史上超新星的发现、我国对超新星的观测和发现、SN 1987A 等基本情况外，还介绍了超新星分类和诞生率，重点介绍 I 型和 II 型爆发机理，以及 II 型超新星的“瞬发爆炸”和“延缓爆炸”机制有关的基本知识。由于我们研究的重点是偏重于 II 型超新星的“瞬发爆炸”机制，故本书后续的内容就侧重在这个方面。又由于目前开展这方面研究惟一有效的手段，就是利用计算机进行数值模拟，故后面三篇的内容不是为数值模拟做准备的，就是涉及数值模拟的结果。第三篇是“物理因素”，II 型超新星涉及到坍缩动力学和后续爆发过程中许多物理因素，其中关键的是物态方程、电子俘获率以及中微子与物质的相互作用。第四篇是“数值计算方法”，主要介绍流体动力学方程组和中微子输运方程有关的计算方法。其内容是综述性和全方位的，尽管在我们编制的程序中真正使用的是其中的一种或是最简单的方案。第五篇是“数值模拟”，紧紧围绕我们编制的程序中使用的相对论的一维球对称流体动力学方程组、差分格式、前身星模型、计算环境的设定、瞬发爆炸模型的构造等，计算结果的分析和研究性成果除了分散在各篇章中有所体现外，在这篇中还特专门介绍激波传播和对流不稳定的结果。最后附有计算中使用的基础性的“源程序”及其使用说明，还有经常使用的典型模型的“参数”。

现代超新星的研究涉及诸多方面，作者的研究仅仅涉及其中的一小部分，其它众多内容实属作者的能力所不及，也不可能在一本书中包罗万象，面面俱到。由于作者的知识水平有限，加上时间仓促，错误和不妥之处在所难免，恳请读者不吝指教，批评

指正.

作者需要郑重声明的是, 本书的基本素材, 除了直接引用我们研究小组发表的研究论文外, 还有一小部分内容是来自李宗伟、彭秋和、黄润乾、李启斌等人公开出版的著作或论文. 所涉及的国内外文献都详细罗列在本书最后的“参考文献”之中, 但并不是在所引之处都一一详细指出.

作者还要特别说明的是: 在我们小组研究工作的开创时期, 小组成员黄维章、李鸿、姚进和张天树等人付出了辛勤的劳动, 做了大量工作. 虽然他们没有直接参与本书的编写, 但实际上他们也是本书的作者.

作者特别感谢南京大学的曲钦岳教授、汪珍如教授、彭秋和教授, 北京师范大学的李宗伟教授, 北京大学的乔国俊教授, 中科院应用数学研究所的秦元勋教授, 中国科学院理论物理所的何祚麻教授、庆承瑞教授等对我们工作的一贯支持; 尤其是彭秋和教授, 在百忙之中特抽时间专门审查本书的书稿, 提出了宝贵的修改意见, 并为本书作序, 在此表示衷心的感谢.

本项目在开展研究的过程中曾获得基金资助的情况是: 中科院院重点基金: “微分方程和计算物理”(1983.1~1988.12); 国家自然科学基金(# 1880494): “计算物理理论和方法研究”(1989.1~1991.12); 理论物理所开放课题: “SN 1987A 的两次中微子爆可能性探索”(1989.1~1990.12); 国家自然科学基金(# 19173019): “II 型超新星爆发的理论模拟研究”(1992.1~1994.12); 国家攀登项目(No.8): “天体剧烈活动的多波段观测和研究”中的二级子课题: “超新星爆发的理论模拟”(1993.1~1997.12); 国家自然科学基金(# 19673015): “II 型超新星瞬发爆炸机制的深入研究”(1997.1~1999.12). 因此, 我们十分感谢国家自然科学基金和“攀登计划”所给予的科研经费的大力支持!

最后，作者特别感谢“科学与工程计算丛书”编委会的蒋伯诚教授和河南科学技术出版社对本书的出版所给予的有力支持！在此一并致谢！

编著者

2001 年 12 月于北京

单位说明

由于天体物理中至今仍用 CGS (厘米、克、秒) 制, 而且我们编写的程序也是在 CGS 制下编制的, 所以本书没有改为 SI 制。

1. 基本单位 (CGS 制)

l (长度): cm (厘米)

m (质量): g (克)

t (时间): s (秒)

E (能量): erg (尔格), 反应能、化学势用 MeV (兆电子伏)

p (压强): (dyn/cm^2) 达因/厘米² $\equiv \text{erg}/\text{cm}^3$

ρ (密度): g/cm^3 (克/厘米³)

T (温度): K (开氏度)

2. 基本常数

光速 $c = 2.997\,9 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ (厘米/秒)

引力常数 $G = 6.672\,0 \times 10^{-8} (\text{dyn} \cdot \text{cm}^2) / \text{g}^2$ [(达因·厘米²) / 克²]

普朗克常量 $h = 2\pi\hbar$

$= 6.626\,2 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ (尔格·秒)

阿伏加德罗常数 $N_A = 6.022\,0 \times 10^{23} / \text{mol}$ (1/摩尔)

玻耳兹曼常量 $k = 1.380\,7 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$ (尔格/开)

$= 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (电子伏/开)

$= 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (焦/开)