

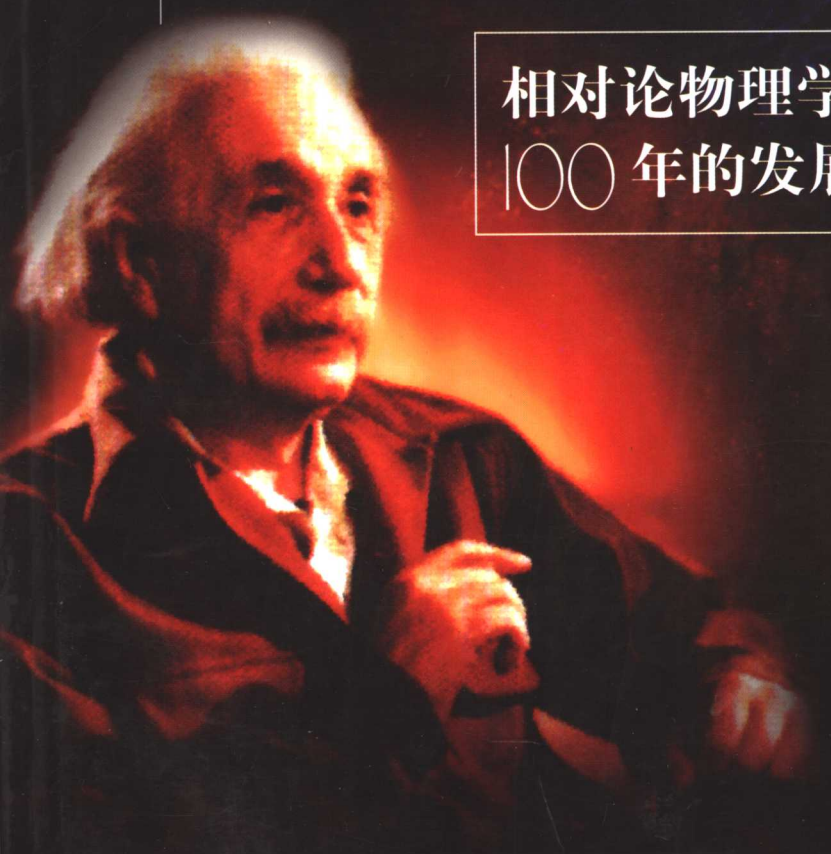
# 科学前沿与未来

KEXUE QIANYAN YU WEILAI

香山科学会议 主编

第十集

相对论物理学  
100年的发展展望



中国环境科学出版社

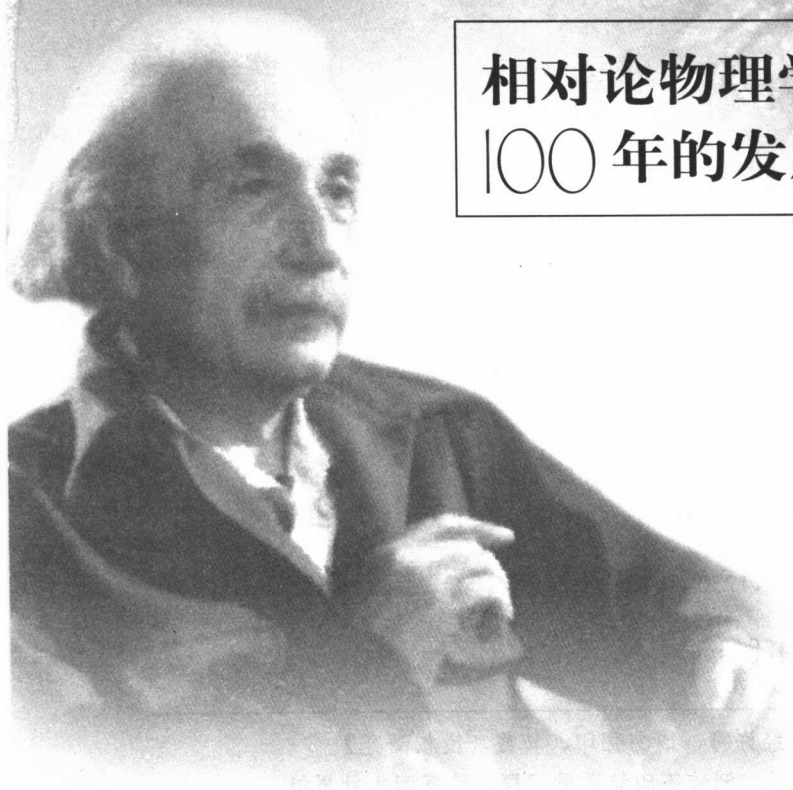
# 科学前沿与未来

KEXUE QIANYAN YU WEILAI

香山科学会议 主编

第十集

相对论物理学  
100年的发展展望



中国环境科学出版社·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

科学前沿与未来. 第10集/香山科学会议主编.—北京: 中国环境科学出版社, 2006.10

ISBN 7-80209-385-6

I. 科… II. 香… III. 科学技术-动态-世界-学术会议-文集 IV. N1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 126803 号

责任编辑 张玉海  
责任校对 尹芳  
封面设计 龙文视觉·陈莹

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京崇文区广渠门内大街16号)  
网 址: <http://www.cesp.cn>  
联系电话: 010-67112765 (总编室)  
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京画中国画印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2006年10月第一版  
印 次 2006年10月第一次印刷  
印 数 1—3 000  
开 本 880×1230 1/32  
印 张 9.5  
字 数 254千字  
定 价 20.00元

---

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

科学顾问 周光召 朱光亚 路甬祥 朱丽兰  
惠永正 张存浩 陈能宽 唐有祺  
许智宏 吴文俊 严东生 涂光炽  
邹承鲁 师昌绪 林 泉

主 编 香山科学会议

编 委 会 (按姓氏笔画排列)

刘玉臣 李增惠 张元仲 张先恩  
何鸣鸿 杨炳忻 周春来 金 铎  
赵生才 韩存志

# 序 一

现代科学正在突飞猛进地发展，不断扩展人类的视野，增长人类的知识，促进社会繁荣，推动经济发展，备受世人关注。

现在，科学技术正处于重大突破的前夕。新发现、新思想、新概念、新方法不断涌现，新学科和新方向不断产生，学科的交叉、渗透和综合趋势的日益增强，复杂性（复杂系统）和整体性研究的崛起，构成当代科学发展蔚为壮观的景象。这不仅对科学的许多原有概念提出了挑战，而且深刻影响到经济和社会生活的各个方面，包括人们的思维方式、生产方式、工作方式和生活方式。

“科学是无止境的前沿”。在科学自身的伟大创造力和经济社会不断出现的巨大需求的推动下，科学不断地推进自己的前沿和扩展研究的领域。现在，这一过程日益加速。学科前沿的错综交叉、变化多端、绚丽多彩、日新月异，令人振奋。

探讨科学前沿，了解其变化和走向，展望未来，对于促进科学发展、促进科技创新，具有战略性的意义。这种预测、研讨活动，本身就是科研工作的重要组成部分。

探明科学前沿、预测科学未来、认清萌生的生长点和蕴藏的新苗头，是非常困难的，需要雄厚的、长期系统的积累，需要扎实的、坚持不懈的努力研究。出版《科学前沿与未来》系列专著，无疑给科技界提供了交流和讨论的机会，并将吸引大家把注意力和兴趣投向最主要、最有希望、发展最快的前沿，主要是交叉前沿，激励大家的研究兴趣，长期坚持下去。这将使我们的科研工作永远处于科学的最前沿，从而充满活力，富有创造性。

《科学前沿与未来》系列专著，以香山科学会议的综述报告和重点发言为基本内容，并欢迎在科学前沿研究工作的科学家投稿。我们希望科技界和全社会，都关心、爱护、支持这个系列专著，齐心协力，把它长期办下去，为科技发展、科技创新、培育人才作出贡献。

周光召

## 序 二

当今世界，科学技术的突飞猛进改变了人类社会的各个方面。科学技术走出实验室已作为一个国家综合国力的代名词。

蓬勃兴起的新科技革命，为我国的改革开放和经济发展提供了契机。在这难得的历史机遇面前，中国科技界任重道远，一方面要花大力气通过先进的科学技术，改造传统产业，发展新兴产业，不断提高科技进步在经济增长和社会发展中的作用，促进整个国民经济持续、快速、健康的发展；另一方面要稳定一批优秀队伍，在基础科学、高科技的前沿等方面作出世界一流的工作，要做到这一点，提供一个宽松的、自由阐述新思想、新概念、新发展的环境是很必要的。正是基于这种考虑，在1992年7月召开的“展望21世纪初的中国自然科学”座谈会上，产生了举办“香山科学会议”的想法。两年多来，在国家科委和中国科学院有关同志的努力下，会议办起来了，迄今已举办了20多次，在科技界产生了很好的影响。最近江泽民主席也对香山科学会议表示关注。这无疑是对我们工作的极大鼓励和鞭策。

《科学前沿与未来》是香山科学会议的评述报告和重要发言的汇编，集各家之言，洋洋洒洒，把这些宏论良策发表出来是希望能引起社会各界，尤其是广大科技工作者的争论和共鸣，从而对当今前沿重大科学问题加深认识乃至对我国科研工作的今后布局产生影响，也希望由此能传播香山科学会议精神，在我国科技界倡导和培育自由、宽松、民主的学术风尚，引导和激励广大科技工作者特别是青年一代勇攀世界科技高峰，为我国的科学研究、技术创新和世界科技进步作出更大的贡献。

赵尔正

1995年1月6日

# 前 言

1905年，爱因斯坦发表的五篇论文涉及了当代物理学发展的三个重要方面，它们是时空理论、分子运动理论、量子理论。其中，影响最广泛的当属狭义相对论，它不但改变了人类几百年所持有的牛顿绝对时空观，而且与量子力学一起成为了现代物理学的两大理论基础。可以说，没有狭义相对论和量子力学就没有现代物理学。为了纪念从1905年开始的现代物理学一百年以来所取得的辉煌成就，联合国大会在2004年6月10日通过决议，把2005年定为“国际物理年”。

今天，伴随着相对论、粒子物理学和宇宙学的辉煌成就，众多待解决的物理问题更加显现出来。例如在相对论和宇宙学方面，近几年，大型的天文观测的地面装置和空间装置陆续获得的大量观测数据，极大地促进了大爆炸宇宙模型的研究，预示了宇宙暗能量的存在；现在的宇宙是一个接近平坦的和加速膨胀的宇宙；宇宙物质的 $2/3$ 由暗能量组成， $1/3$ 由暗物质和常规物质构成。但是，我们对暗物质和暗能量还知之甚少因而仍为国际上目前研究的热点课题。与理论研究相配合的新的大型天文观测装置已经建成或即将陆续建成，例如：用来检验空间弯曲和自旋效应的“引力探测器B”已于2004年4月20日在美国升空，今年即将给出观测数据；引力波天文台的地面激光干涉仪（两个互相垂直的臂长均为4 km）已有两个在美国初步建成，三颗卫星相距500万 km的空间工程正在研制之中，用来更精确测量宇宙微波背景辐射各向异性的卫星探测器预计2008年发射，其他大型的地面和空间装置也在计划之中。在粒子物理方面，电弱统一理论的标准模型中的许多参数的起源还不清楚，有待实验测定；自发破缺中的Higgs粒子是基本粒子还是复合粒子、质量有多大、是否存在其他对称来源等，有待理论研究和实验发现；宇宙中的粒子—反粒子不对称的起源需要在粒子物理的研究中寻找依据；四种基本力的超对称大统一理论包括超弦理论需要在实验中寻找证

明,因而理论预言尤为重要。为了从实验上检验粒子理论的各种预言、发现新物理,正在改进和建造下一代加速器装置,例如北京 BEPC 正负电子对撞机和美国的 CLEOC 等;欧洲核子研究中心的对撞机 LHC 将在 2007 年运转;下一代的各种类型的对撞机也在计划之中。因此,可以预见,未来一二十年或更长一点的时间之内,引力波的探测可能会取得重大突破、宇宙学的研究将有重大进展、广义相对论和基本粒子理论包括大统一理论将会面对真正的严峻考验因而有可能获得重大的突破性发展。所有这些都将为我国的理论物理学家和天文学家提供大显身手的广阔天地。

我国多年来已经形成一支有一定规模的理论物理学和天文学(包括宇宙学)的科研队伍并活跃在高能物理、天体物理、宇宙学、量子物理和其他物理学的重要前沿方向上,并取得了很好的成绩。物理学和天文学等学科发展到今天,许多研究课题已不再能由单一学科所能容纳,而是多个不同学科的交叉和融合,因此,多学科之间已经开始了交流和合作。促进并加强这种交叉、交流和合作是今后的重要任务。

香山科学会议于 2005 年 9 月 26~28 日在北京召开以“相对论物理学 100 年的发展展望”为主题的第 263 次学术讨论会。本次会议执行主席为周光召院士、庄逢甘院士、陈建生院士、欧阳钟灿院士、贺贤土院士、张元仲研究员。会议还邀请我国的理论物理学家和天文学家(包括宇宙学家)及各方面专家与会。这次学术会议为我国的理论物理学家和天文学家(包括宇宙学家)提供一个交流科技思想的平台。科学家们聚在一起,总结一百年来现代物理学包括宇宙学的成就和问题,展望未来一二十年的发展方向、交流学术思想,探讨解决前沿物理问题的可能途径,为我国现代物理学的发展贡献力量,以此纪念“国际物理年”。



# 周光召院士致相对论物理学 100 年的发展 与展望学术讨论会的信

元仲\*：

我因故不能参加本月 26 日举行的香山会议，实感遗憾和抱歉。相对论是二十世纪最伟大的科学发现之一，直到今天仍然显示强大的生命力。可以预期，与天体物理、量子场论和现代数学相结合，相对论将继续向前发展，在认识宇宙的起源、演化、时空和物质的结构和运动方面取得重大的科学突破。中国科学家应当在这个领域有所作为，我希望这次香山会议能够为推动中国相对论的研究，推动学科交叉和融合作出重要的贡献。谨祝会议取得圆满成功，祝与会同志研究有成。

光召  
9月17日

---

\* 张元仲，中国科学院理论物理所研究员，香山科学会议第 263 次学术讨论会——相对论物理学 100 年的发展及展望学术讨论会执行主席。

# 目 录

布朗运动理论一百年.....	郝柏林	1
布朗运动：从花粉无规则行走到生物大分子的有序运动 .....	欧阳钟灿	9
爱因斯坦和固体量子论.....	于 涿	16
空间基础物理研究简介.....	胡文瑞	21
人类即将迎接太阳能时代.....	何祚麻 陈立泉	26
中国高能物理实验研究发展战略.....	陈和生	33
量子场论的发展.....	戴元本	45
强相互作用七十年.....	黄 涛	56
从弱电统一模型到最大对称化的最小统一模型.....	吴岳良	66
标准模型与超对称理论.....	罗民兴	75
爱因斯坦与天文学.....	邹振隆 陈建生	78
弦论与宇宙学.....	李 淼	92
加速膨胀宇宙中的暗能量和宇宙大尺度结构.....	张 杨	98
暴涨宇宙学.....	朴云松 张元仲	100
脉冲星和引力波.....	李柯伽 乔国俊 徐仁新等	109
在中国开展引力波探测的一条可行之路 .....	汤克云 张首刚 张承民	124
高频引力波的电磁响应.....	李芳昱	133
爱因斯坦与诺贝尔奖.....	陆 垚	139
“超光速”现象.....	黄超光	152
相对论性引力理论的实验基础及测试.....	倪维斗	159
近距离牛顿反平方定律的实验检验.....	罗 俊 涂良成 官盛果	188
核聚变与能源.....	陈裕启	200
自由光线的加速度——质疑彭若斯与霍金的奇性定理 .....	赵 峥 田贵花	203

德西特不变的相对论及其宇宙学意义

——纪念爱因斯坦相对论提出 100 周年 .....	郭汉英 210
德西特时空及其相关的物理问题 .....	蔡荣根 234
航天导航测量机制的启示和光速不变假设的试验验证 .....	林 金 246
相对论电子束在超强激光与	
等离子体作用中的加速与准直 .....	贺贤土 252
超强激光脉冲驱动的粒子加速方案以及	
最新研究进展 .....	盛政明 张 杰 268
相对论等离子体中的若干问题 .....	朱少平 286

# 布朗运动理论一百年

郝柏林

由爱因斯坦、斯莫鲁霍夫斯基 (M.Smoluchowski) 等人在 20 世纪初开始的布朗运动理论，在一百年间发展出内容丰富的众多学科分支，现在正在成为分析生物细胞内分子机器运作原理的有力工具。爱因斯坦 1905 年发表的 5 篇论文中，关于布朗运动的文章可能人们知道得最少，而实际上它被引用的次数却超过了狭义相对论。

## 1 我们从布朗运动本身开始回顾

英国植物学家罗伯特·布朗在 1828 年和 1829 年的《哲学》杂志上发表了两篇文章，描述自己在 1827 年夏天在显微镜下观察到花粉颗粒在液体中的不停顿的运动。他最初曾经以为是看到了生命运动，但后来确认这种运动对细小的有机和无机颗粒都存在，因而不是生命现象所致。布朗认为运动的原因在于这些颗粒包含着“活性分子” (active molecules)，而与所处液体没有关系。

事实上，布朗并不是观察到这类运动的第一人。他在上述两篇文章里就曾提到了约十位前人，包括做过大量观察的制作显微镜的巧手列文胡克 (Antonie von Leeuwenhock)。

## 2 爱因斯坦的扩散长度公式

爱因斯坦在 1901—1905 年期间致力于博士论文研究。他 1905 年发表的头一篇文章——“分子大小的新测定”就基于其博士论文。爱因斯坦考察了液体中悬浮粒子对渗透压的贡献，把流体力学方法和扩散理论结合起来，建议了测量分子尺寸和阿佛伽德罗常数的新办法。这样的研究同布朗运动发生关系是很自然的。然而，他 1905 年 5 月撰写的第二篇论文的题目并没有提及布朗运动。这篇题为《热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动》的文章，一开始就说：“可能，这里所讨论的运动就是所谓的布朗分子运动；可是，关于后者我所能得到唯一的资料是如此的不准确，以致在这个问题上我无法形成判断。”

爱因斯坦确实建立了布朗运动的分子理论，并且开启了借助随机过程描述自己现象的数理科学发展方向。

我们不在此重复爱因斯坦当年对扩散系数  $D$  的推导，直接从熟知的（一维）扩散方程出发：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}$$

假定在  $t=0$  时记得粒子位于  $x=0$  处，即  $\rho(x, 0) = \delta(x)$ ，扩散方程的解是：

$$\rho(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

即粒子的密度遵从高斯分布。对于固定的时刻  $t$ ， $x$  和  $x^2$  的平均值分别是：

$$\langle x \rangle = 0, \quad \langle x^2 \rangle = 2Dt$$

于是得到扩散长度的公式：

$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt}$$

这里出现了著名的爱因斯坦的  $1/2$  指数。

### 3 无规行走问题

如果把时间离散化为步长  $\Delta t$  的小段, 令  $t=n\Delta t$ , 同时保持  $\Delta t$  适当的大, 使得每小段时间头尾的运动彼此无关, 于是行走  $n$  步的结果  $x_n$  就是  $n$  个独立随机变量之和。自然:

$$\langle x_n \rangle = 0, \langle x_n^2 \rangle \propto n$$

可见, 均方距离并不比例于步数  $n$ , 而是:

$$\sqrt{\langle x_n^2 \rangle} \propto n^{1/2}$$

这里的  $1/2$  幂次出现在高分子构象统计等许多涉及随机运动的理论中。

离散的无规行走问题本身早已经发展成一个活跃的研究领域。最简单的等步长的无规行走问题, 除了  $\langle x_n \rangle = 0, \langle x_n^2 \rangle \propto n$ , 还有一个重要特征量: 从原点出发再次返回原点的概率。它与空间维数有关。一维行走返回原点的概率为 1; 二维行走返回原点的概率也是 1; 但三维行走返回原点的概率小于 1, 仅为 0.3405373296... (Pólya 常数)。

纯无规行走对于走过的点没有记忆。非随机性表现为对历史的某种记忆。可以考察  $\langle x_n^2 \rangle$  同  $n$  的关系, 来判断所研究的过程偏离完全随机的程度。如果走过的点都不许再碰, 称为自回避行走 (英文缩写是 SAW)。这是对溶液中高分子链的很好描述。一种二维的、只是第一步不许返回的无规行走问题导致统计物理学中著名的二维伊辛 (Ising) 模型的严格解, 但相应的三维推广只给出一个封闭的高温近似解。<sup>[1]</sup>

试问平面中  $n$  步正向 SAW 有多少种? 这个种类数  $m$  是没有封闭解但存在具体答案的计数问题的实例:

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
$m$	1	2	5	12	30	73	183	456	1151	...

这是《整数序列全书》<sup>[2]</sup>中的第 A046170 号序列。

我们再看一个无规行走的“现代”应用：DNA 行走。

对很长的由 4 个字母组成的 DNA 序列，令 A、C、G、T 对应上下左右 4 个方向。从 2 维格子的原点和序列的最左端出发，每见到一个字母移动一格。这不是随机行走，因为每个序列对应一个特定的实现，不能随机重复和取平均值。然而，可以随着  $n$  增加，问行走  $n$  步之后，到原点的距离  $r_n$  的平均值和平方平均值如何随  $n$  变化？自然， $\langle r_n \rangle = 0$ ，但  $\langle r_n^2 \rangle \propto n^\alpha$  中的指数  $\alpha$  是大于、小于还是等于  $1/2$ ？

1992 年发表在英国《自然》杂志上的一篇文章<sup>[3]</sup>考察了一维的 DNA 行走，即只区分两个左右方向：遇嘌呤（A 或 G）向左一步、遇嘧啶（C 或 T）向右一步。他们的结论是  $\alpha > 1/2$ ，而且编码段比非编码段更随机。这篇文章引起了几百篇后继论文，正反参半。

## 4 皮兰实验和诺贝尔奖

爱因斯坦并没有因为布朗运动理论而得到诺贝尔奖，但法国物理学家皮兰（Jean Baptiste Perrin, 1870—1942）却因为 1908 年以来证实爱因斯坦理论的实验研究获得 1926 年的诺贝尔物理学奖。获奖说明是“为了他关于物质离散结构特别是沉积平衡的发现”。

当时布朗运动实验的主要意义在于它证明了分子存在，并且提供了测量阿佛伽德罗常数的一种新办法。沉积平衡的直观实例发生在超速离心机中。高速旋转的处于水平位置的试管里，大小不同的颗粒在离心力作用下沿径向往外运动，越往外离心力也越大，但所受到的液体的黏滞阻力也越大，于是在一定半径处达到平衡。这是现代分子生物学实验室里分离大小分子集团的重要手段之一。由沉积平衡定义的沉积系数  $S$ ，在分子生物学中作为分子量的度量一直沿用至今。例如，23S rRNA 确实比 16S rRNA 大，但并不成简单比例关系。

有趣的是同年的诺贝尔化学奖颁给了瑞典人斯维德堡（Theodor

Svedberg, 1884—1971), 理由是“为了他关于弥散系统的工作”, 而斯维德堡的诺贝尔演讲题目却是“超速离心机”。沉降系数  $S$  又称斯维德堡单位, 并没有因为皮兰而改用  $P$ 。

## 5 朗之万方程

法国物理学家朗之万 (Paul Langevin, 1872—1946) 是中国物理学界的朋友。他在 1931 年作为国际物理学联合会的代表来到当时的北平, 协助建立了中国物理学会, 并且当选为中国物理学会的第一位外籍会员。他是我国声学前辈汪德昭先生的老师。朗之万晚年成为法国共产党人和反法西斯抵抗运动的斗士。

爱因斯坦用统计物理和流体力学方法, 考察多个布朗粒子的分布, 导出了扩散长度公式。朗之万在 1908 年为单个粒子写出“随机力”  $F(t)$  作用下的“牛顿方程”:

$$\frac{dv}{dt} = -kv + F(t)$$

其中摩擦系数由斯托克斯公式  $k=6\pi\eta a/m$  给出, 这里  $\eta$  是液体的黏性、 $a$  是球形粒子的半径, 而  $m$  是粒子质量。

这是历史上第一个随机微分方程。我们先不把随机力  $F(t)$  具体化, 直接对线性的朗之万方程求积分:

$$v(t) = v_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-T)} F(T) dT$$

重要的不是各种物理量的瞬时值, 而是它们的时间平均值, 例如:

$$\langle v(t) \rangle = v_0 e^{-kt} + \int_0^t e^{-k(t-T)} \langle F(T) \rangle dT$$

$$\begin{aligned} \langle v(t)v(t) \rangle &= v_0^2 e^{-2kt} + 2 \int_0^t e^{-k(2t-T)} v_0 \langle F(T) \rangle dT \\ &+ \int_0^t dT' \int_0^t dT e^{-k(2t-T-T')} \langle F(T)F(T') \rangle \end{aligned}$$

上面各式中的尖括号表示对随机力的分布求平均值。



很自然地假定：

$$\begin{aligned}\langle F(t) \rangle &= 0 \\ \langle F(t)F(t') \rangle &= 2D\delta(t-t')\end{aligned}$$

于是在  $t \rightarrow \infty$  的极限，速度的平均值为零，而速度的自关联也极短。

朗之万方程肇始了整个随机微分方程的数学理论。我们主要沿三条线对后来的发展稍作说明：

- (1) 朗之万方程的各种推广：广义朗之万方程；
- (2) 决定朗之万随机变量分布函数的方程：福克—普朗克方程；
- (3) 朗之万解空间上的连续积分。

## 6 广义朗之万方程

线性的朗之万方程后来结合各种应用被大踏步地推广。广义朗之万方程可以写成：

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = K_i(\psi) + \xi_i(t)$$

其中非随机力  $K_i$  由两项组成：

$$K_i(\psi) = -\sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial \psi_j} + M_i(\psi)$$

第一项是可以由位势  $V$  微分得到的广义力， $\sigma_{ij}$  的对称部分对应耗散，而反称部分对应保守的正则力；第二项是不能由位势得到的正则力，例如磁矩在磁场中所受力。这就是川崎恭治用手工加进去的“模模耦合项”：

$$M_i(\psi) = \lambda \sum_j \left[ \frac{\partial}{\partial \psi_i} A_{ij} - A_{ij}(\psi) \frac{\partial V}{\partial \psi_j} \right]$$

其中  $A_{ij}$  是反称的泊松括号或对易子。

对随机力做高斯分布假定：