

朗道

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТОМ II

Л. Д. ЛАНДАУ

Е. М. ЛИФШИЦ

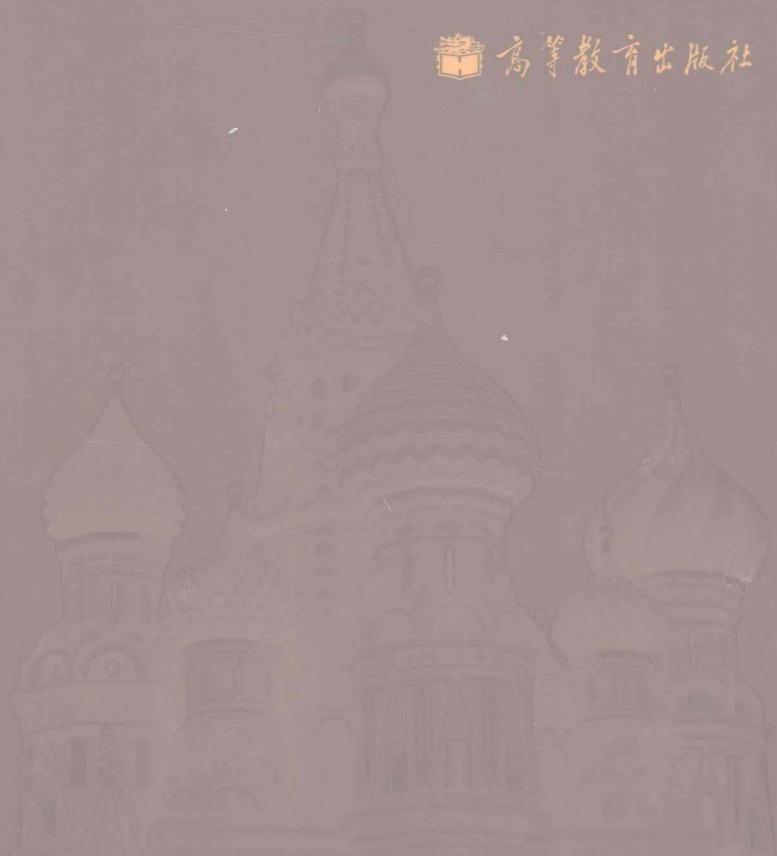
ТЕОРИЯ ПОЛЯ

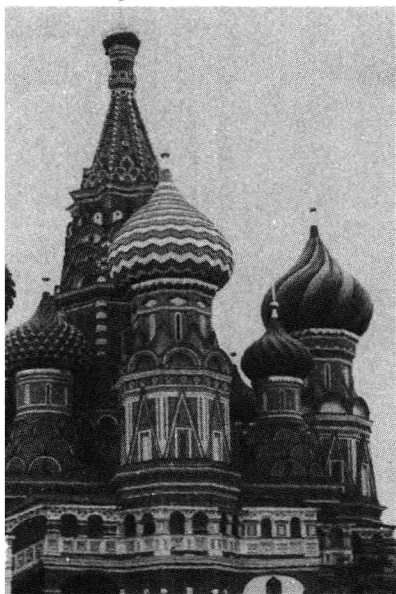
理论物理学教程 第二卷

场论 (第八版)

Л. Д. 朗道 Е. М. 栗弗席兹 著 鲁欣 任朗 袁炳南 译 邹振隆 校

 高等教育出版社





ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТОМ II

Л. Д. ЛАНДАУ
Е. М. ЛИФШИЦ

ТЕОРИЯ ПОЛЯ

理论物理学教程 第二卷

CHANGLUN

场



(第八版)

Л. Д. 朗道 Е. М. 栗弗席兹 著 鲁欣 任明 袁炳南 译 邹振隆 校

俄罗斯联邦教育部推荐大学物理专业教学参考书



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字:01-2007-0911 号

Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Учебное пособие
для вузов в 10 томах

Copyright © FIZMATLIT ® PUBLISHERS RUSSIA, ISBN 5-9221-0053-X
The Chinese language edition is authorized by FIZMATLIT ® PUBLISHERS
RUSSIA for publishing and sales in the People's Republic of China

图书在版编目(CIP)数据

理论物理学教程. 第2卷, 场论: 第8版/(俄罗斯)
朗道, (俄罗斯)栗弗席兹著; 鲁欣, 任朗, 袁炳南译.

-- 北京: 高等教育出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-04-035173-6

I. ①理… II. ①朗… ②栗… ③鲁… ④任… ⑤袁
… III. ①理论物理学-教材②场论-教材 IV. ①
O41②O412.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 160899 号

策划编辑 王超
责任校对 刘春萍

责任编辑 王超
责任印制 田甜

封面设计 张志

版式设计 余杨

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京铭成印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 28.75
字 数 540千字
插 页 1
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年8月第1版
印 次 2012年8月第1次印刷
定 价 99.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 35173-00

第七版编者序言

E. M. 栗弗席兹从 1985 年起就开始准备《场论》的新版本，甚至在他临终前在医院卧病的日子里仍然坚持着这项工作。他建议的修改在这个版本里都考虑到了。其中需要指出的是，本书对相对论力学中角动量守恒定律的证明进行了某些修改，对引力理论中克里斯托夫符号的对称性问题进行了更为详细的论述。在电磁场应力张量的定义中改变了符号（在上一版本中这个张量的定义方式和本教程其余几卷都不一样）。

针对本书出版的准备过程中产生的一系列问题，B. П. 沙弗朗诺夫和我进行了讨论，我对他表示感谢。

Л. П. 皮塔耶夫斯基

1987 年 6 月

第六版序言

本书第一版问世已经三十多年了。在这数十年间，本书历经修改和增补，多次再版，现在的篇幅和最初相比几乎增加了一倍。但是，朗道所提出的构建理论的方式和他所提倡的行文方式始终无须改变，其主要特点就是——追求简单明了。即使在我不得不独自一人完成修订工作的时候，我也尽一切努力保持这种风格。

和上一版（第五版）相比，本书前九章关于电动力学的内容几乎没有变化。对论述引力场理论的相关章节作了修改和补充。这些章节的内容在历次再版时都有显著增加，所以最终有必要对这些内容进行重新编排和整理。

在这里我想对自己的所有同事表示深切的感谢，由于人数太多，实难在此一一列举他们的姓名。他们提出大量意见和建议帮助我弥补了书中的不足之处，使本书得以不断完善。假如没有这些建议，没有这些在我遇到问题时随时准备提供的帮助，继续出版这套教程的工作肯定会困难得多。

我要特别感谢 JI. II. 皮塔耶夫斯基，我一直和他讨论修订中出现的问題。也要特别感谢 B. A. 别林斯基，他帮助检查了全书的公式并审读了校样。

E. M. 栗弗席兹

1972 年 12 月

第一版和第二版序言摘录

本书阐述电磁场和引力场的理论，也就是电动力学和广义相对论。完整的、逻辑上严谨的电磁场理论本身就包含了狭义相对论。因此，我们将后者作为叙述的基础。基本关系的推导以变分原理为出发点，这样做能使对问题的表述达到最大限度的普遍性和统一性，就其实质而言，给出最为简单的表述。

按照我们对《理论物理学教程》的整体规划（本书是其中的一部分），这一卷完全没有涉及连续介质的电动力学问题，只局限在“微观”的电动力学——真空和点电荷的电动力学。

为了阅读本书，必须了解普通物理学课程范围内的电磁现象，还必须熟练掌握矢量分析。不要求读者具有张量分析的预备知识，因为有关内容会在建立引力场理论时一并予以叙述。

Л. 朗道, Е. 栗弗席兹
莫斯科, 1939年12月
莫斯科, 1947年6月

重要符号

三维空间中的量

三维张量的指标用希腊字母表示

dV, df, dl	体积元, 面元, 线元
\mathbf{p} 和 \mathcal{E}	粒子的动量和能量
\mathcal{H}	哈密顿函数
φ 和 \mathbf{A}	电磁场的标势和矢势
\mathbf{E} 和 \mathbf{H}	电场强度和磁场强度
ρ 和 \mathbf{j}	电荷密度和电流密度
\mathbf{d}	电偶极矩
\mathbf{m}	磁偶极矩

四维空间中的量

四维张量的指标用拉丁字母表示

字母 i, k, l, \dots 的取值范围是 0, 1, 2, 3

采用带有号差 (+ - - -) 的度规

指标的上移和下移法则——在 16 页

四维矢量的分量以 $A^i = (A^0, \mathbf{A})$ 的形式列出

e^{iklm} 四阶反对称单位张量, 并且 $e^{0123} = 1$
(定义见 19 页)

$d\Omega = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3$ 四维体积元

dS^i 超曲面元 (定义见 22 页)

$x^i = (ct, \mathbf{r})$ 四维径矢

$u^i = dx^i/ds$ 四维速度

$p^i = (\mathcal{E}/c, \mathbf{p})$ 四维动量

$j^i = (c\rho, \rho\mathbf{v})$ 四维电流

$A^i = (\varphi, \mathbf{A})$ 电磁场的四维势

$F_{ik} = \frac{\partial A_k}{\partial x^i} - \frac{\partial A_i}{\partial x^k}$ 四维电磁场张量 (分量 F_{ik} 与 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 的分量之间的关系见 69 页)

T^{ik} 四维能量动量张量 (其分量的定义见 89 页)

在引用本教程其他各卷的章节和公式时，卷号与书名的对应关系为：

第一卷：《力学》，俄文第五版，中文第一版；

第三卷：《量子力学（非相对论理论）》，俄文第六版，中文第一版；

第五卷：《统计物理学 I》，俄文第五版，中文第一版；

第六卷：《流体力学》，俄文第五版，中文第一版；

第八卷：《连续介质电动力学》，俄文第四版，中文第一版。

目 录

第七版编者序言	i
第六版序言	ii
第一版和第二版序言摘录	iii
重要符号	iv
第一章 相对性原理	1
§1 相互作用的传播速度	1
§2 间隔	4
§3 固有时	8
§4 洛伦兹变换	10
§5 速度的变换	13
§6 四维矢量	15
§7 四维速度	24
第二章 相对论力学	27
§8 最小作用量原理	27
§9 能量与动量	28
§10 分布函数的变换	32
§11 粒子的衰变	34
§12 不变截面	38
§13 粒子的弹性碰撞	40
§14 角动量	45

第三章 电磁场中的电荷	49
§15 相对论中的基本粒子	49
§16 场的四维势	50
§17 场中电荷的运动方程	53
§18 规范不变性	55
§19 恒定电磁场	56
§20 在恒定均匀电场中的运动	58
§21 在恒定均匀磁场中的运动	59
§22 电荷在均匀恒定的电场和磁场中的运动	63
§23 电磁场张量	68
§24 场的洛伦兹变换	70
§25 场的不变量	71
第四章 电磁场方程	74
§26 第一对麦克斯韦方程	74
§27 电磁场的作用量	75
§28 四维电流矢量	77
§29 连续性方程	80
§30 第二对麦克斯韦方程	82
§31 能量密度和能流	84
§32 能量动量张量	86
§33 电磁场的能量动量张量	90
§34 位力定理	94
§35 宏观物体的能量动量张量	96
第五章 恒定电磁场	99
§36 库仑定律	99
§37 电荷的静电能	100
§38 匀速运动电荷的场	102
§39 库仑场内的运动	105
§40 偶极矩	107
§41 多极矩	109
§42 外场中的电荷体系	112
§43 恒定磁场	114
§44 磁矩	116

§45 拉莫尔定理	118
第六章 电磁波	121
§46 波动方程	121
§47 平面波	123
§48 单色平面波	128
§49 谱分解	133
§50 部分偏振光	134
§51 静电场的傅里叶分解	140
§52 场的本征振动	141
第七章 光的传播	146
§53 几何光学	146
§54 强度	149
§55 角程函	151
§56 窄束光线	153
§57 宽光线束成像	160
§58 几何光学的极限	161
§59 衍射	163
§60 菲涅耳衍射	169
§61 夫琅禾费衍射	173
第八章 运动电荷的场	178
§62 推迟势	178
§63 李纳-维谢尔势	180
§64 推迟势的谱分解	183
§65 精确到二阶的拉格朗日量	186
第九章 电磁波的辐射	191
§66 电荷体系在远处所产生的场	191
§67 偶极辐射	195
§68 碰撞时的偶极辐射	198
§69 低频韧致辐射	201
§70 库仑相互作用的辐射	202
§71 四极辐射和磁偶极辐射	210
§72 在近处的辐射场	214

§73	快速运动电荷的辐射	218
§74	同步辐射(磁韧致辐射)	222
§75	辐射阻尼	229
§76	相对论情形下的辐射阻尼	234
§77	在极端相对论情形下辐射的谱分解	237
§78	被自由电荷散射	241
§79	低频波的散射	246
§80	高频波的散射	247
第十章	引力场中的粒子	251
§81	非相对论力学中的引力场	251
§82	相对论力学中的引力场	252
§83	曲线坐标	255
§84	距离与时间间隔	259
§85	协变微分	264
§86	克里斯托夫符号与度规张量的关系	269
§87	引力场中粒子的运动	272
§88	恒定引力场	276
§89	旋转	283
§90	引力场存在时的电动力学方程	284
第十一章	引力场方程	288
§91	曲率张量	288
§92	曲率张量的特性	292
§93	引力场的作用量	299
§94	能量动量张量	301
§95	爱因斯坦方程	307
§96	引力场的能动张量	313
§97	同步参考系	319
§98	爱因斯坦方程的标架表示	325
第十二章	引力物体的场	329
§99	牛顿定律	329
§100	中心对称的引力场	333
§101	中心对称引力场中的运动	342
§102	球形物体的引力坍缩	345

§103	类尘埃球的坍缩	352
§104	非球形转动物体的引力坍缩	358
§105	物体远距离处的引力场	367
§106	二级近似下物体系统的运动方程	374
第十三章	引力波	383
§107	弱引力波	383
§108	弯曲时空内的引力波	386
§109	强引力波	388
§110	引力波的辐射	392
第十四章	相对论宇宙学	398
§111	各向同性空间	398
§112	封闭的各向同性模型	402
§113	开放的各向同性模型	407
§114	红移	411
§115	各向同性宇宙的引力稳定性	418
§116	均匀空间	424
§117	平直各向异性模型	430
§118	靠近奇点的振动状态	434
§119	爱因斯坦方程一般宇宙学解的时间奇异性	439
索引		442
译后记		445

第一章

相对性原理

§1 相互作用的传播速度

为了描述自然界中所发生的过程，必须有一个所谓**参考系**。参考系应理解为一个坐标系和固定在这个坐标系里的钟。坐标系用来刻画一个粒子在空间的位置，钟用来指示时间。

有这样一类参考系，在其中，一个自由运动物体，即一个无外力作用于其上的运动物体，是以恒定速度行进的。这类参考系叫做**惯性系**。

如果两个参考系彼此相对作匀速直线运动，而其中的一个又是惯性系，那么，另外一个显然也是惯性系（在这个参考系中每一个自由运动也将是匀速直线运动）。因此，我们可以有任意多个惯性参考系，它们彼此相对作匀速直线运动。

实验表明，所谓**相对性原理**是有效的。按照这个原理，所有的自然定律在所有惯性参考系中都是相同的。换句话说，表示自然定律的方程对于由一个惯性系到另一个惯性系的时间与坐标的各种变换来说是不变的。这就是说，描述自然界定律的方程，如用不同的惯性参考系的坐标与时间写出来，将有同样的形式。

粒子间的相互作用在普通力学中由相互作用势能来描述，相互作用势能是相互作用的粒子的坐标的函数。很容易看出，这种描述相互作用的方式，包含着一个假定，即假定相互作用是瞬时传播的。事实上，按照上面的说法，每一个粒子在某一瞬时受到其他各粒子的作用力，仅与那些粒子在该瞬时的位置有关。在这些相互作用的粒子中，如果有一个粒子改变了位置，立刻就会影响到其他各粒子。

然而，实验表明，瞬时的相互作用在自然界中是不存在的。因此，基于相互作用的瞬时传播概念的力学本身就含有某些不准确性。实际上，如果相

相互作用的物体中的一个发生任何变动，仅仅在过了某段时间以后才能影响到其他物体。只有在这段时间以后，由最初变动所产生的物理过程才开始在第二个物体上发生。用这段时间除两个物体间的距离，就得到**相互作用的传播速度**。

我们要注意，这个速度，严格地说，应该称为相互作用的**最大传播速度**。这个速度仅仅决定某一物体的变动**开始**在第二个物体上表现出来所需要的时间间隔。显然，相互作用的**最大传播速度**的存在，同时也就暗示着，在自然界中，物体运动的速度一般不可能大于这个速度。事实上，假若真的有这种运动存在，那么我们就可以利用这种运动实现一个相互作用，其传播速度比上面所说的**最大传播速度**还要大。

从一个粒子向另一个粒子传播的相互作用往往叫做“信号”，它由第一个粒子发出，将第一个粒子所经历的变化“通知”第二个粒子。因此相互作用的传播速度称为**信号速度**。

值得注意的是，由相对性原理可以推断相互作用的传播速度在**所有惯性参考系中都是一样的**。因此，相互作用的传播速度是一个普通常数。

以后我们将要证明，这个恒定速度就是光在真空中的速度。我们通常用字母 c 来代表**光速**，其值等于

$$c = 2.998 \times 10^{10} \text{ cm/s.} \quad (1.1)$$

这个速度很高，这可以解释经典力学为何在大多数情况下都足够精确。我们有机会遇到的各种速度通常都比光速小得多，以至假设光速为无限大，对结果的精确性并无实质上的影响。

把相对性原理同相互作用传播速度的有限性结合起来，就是**爱因斯坦的相对性原理**（爱因斯坦在 1905 年提出这个原理），它不同于伽利略的相对性原理，伽利略的相对性原理基于无限大的相互作用传播速度。

以爱因斯坦的相对性原理（以后我们通常简称它为相对性原理）为基础的力学，称为**相对论力学**。在运动物体的速度远小于光速的极限情形下，我们就可以略去传播速度的有限性对于运动的影响。这样一来，相对论力学就变为通常的力学了，通常的力学基于相互作用**瞬时传播**这一假定；这种力学称为**牛顿力学**或**经典力学**。在相对论力学的公式中，取 $c \rightarrow \infty$ 极限，就可由相对论力学在形式上过渡到经典力学。

在经典力学中，距离已经是相对的，就是说，不同事件的空间关系依赖于描述这些事件所用的参考系。所以，说两件不同时的事件发生在空间同一点上，或者更普遍而言，说两件不同时的事件发生在彼此间有一定距离的两点上，只有当我们指明了我们所用的是哪一个参考系时才有意义。

另一方面，在经典力学中，时间是绝对的；换句话说，经典力学假定时间的特性与参考系无关，对所有参考系来说，时间只有一个。这就是说，假如对于某一个观察者来说，有两个现象是同时发生的，那么，对所有其他观察者来说，这两个现象也是同时发生的。更普遍而言，两个给定事件发生的时间间隔在一切参考系中必须一样。

然而，很容易证明，绝对时间的概念是与爱因斯坦的相对性原理完全冲突的。为了说明这一点，我们只需回忆一下，在以绝对时间的概念为基础的经典力学中，速度合成的通用法则是有效的。按照这个法则，复合运动的合速度简单地等于组成这个运动的各个速度的（矢量）和。这个法则既然是普遍适用的，就应该可以应用于相互作用的传播。由此可以推出，传播速度在不同的惯性参考系中必定是不同的，这就与相对性原理冲突了。但是，实验完全证实了相对性原理。在 1881 年迈克耳孙首次测量的结果显示，光速与其传播方向并无关系；然而，按照经典力学，光速在与地球运动方向相同的方向上，应该比在与地球运动方向相反的方向上为小。

因此，相对性原理导出一个结果，即时间不是绝对的。在不同的参考系中，时间的流逝也是不同的。所以，“两个不同的事件之间有一定的时间间隔”这样的陈述，仅在肯定地指明了所应用的是哪一个参考系的情况下才有意义。特别是，在某一个参考系内同时发生的事件，对另一个参考系来说并不是同时的。

为了弄清楚这个概念，我们先考虑下面的简单例子。

我们来研究两个惯性参考系 K 和 K' ，其坐标轴分别为 xyz 及 $x'y'z'$ ，而 K' 则相对于 K 沿 x 和 x' 轴向右运动（图 1）。

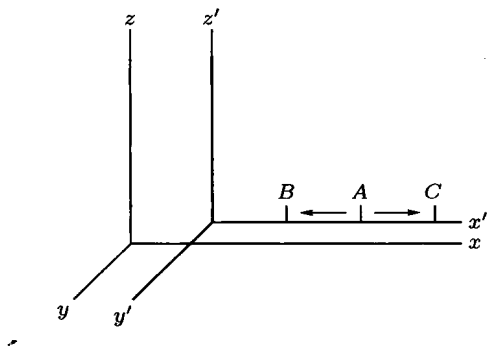


图 1

设信号从 x' 轴上某一点 A 向两个相反的方向发出。既然信号在 K' 系中的传播速度，正如在所有惯性系中一样，（在两个方向上）都等于 c ，那么，它

就会（在 K' 系里）同时到达与 A 等距离的两点 B 及 C 。

但是，很显然，同样的两事件（信号到达 B 及 C 两点），对于在 K 系内的观察者来说，绝不是同时的。实际上，按照相对性原理，信号相对于 K 系的速度也等于 c ，并且因为 B 点对于 K 系而言，是对着向它发出的信号移动，而 C 点则背离（由 A 向 C 发出的）信号移动，所以在 K 系中，信号到达 B 点要比到达 C 点为早。

因此，爱因斯坦的相对性原理使基本物理概念发生了极深刻的和根本的改变。由我们日常生活经验所导出的空间和时间的概念仅仅是近似的，因为我们日常生活所遇到的速度，都比光速小得多。

§2 间隔

以后我们常常要用**事件**这一概念。一个事件是由其发生的地点及其发生的时间来描述的。因此，在某一实物粒子上所发生的事件可由粒子的三个坐标及事件发生的时间来决定。

为表述便利起见，使用一个假想的四维空间往往是很实用的。在这个四维空间的四个轴中，三个用来刻画位置坐标，一个用来标示时间。在这个空间内，事件可用点来表示，这个点称为**世界点**。在这个假想的四维空间内，每一个粒子都对应于一条线，称为**世界线**。这条线上的各点决定了粒子在所有时刻的坐标。很容易证明，与一个作匀速直线运动的粒子相对应的世界线是一条直线。

现在我们用数学形式来表示光速不变原理。为此，我们考虑两个彼此以恒定速度作相对运动的参考系 K 及 K' 。这时我们选择 x 轴与 x' 轴重合，而 y 和 z 轴则分别与 y' 和 z' 轴平行，并以 t 和 t' 分别表示在 K 和 K' 参考系内的时间。

设第一个事件是：在 K 系内的 t_1 时刻从具有坐标 x_1, y_1, z_1 （在同一参考系中）的点送出一个以光速传播的信号。我们就在 K 系内观察这个信号的传播。再设第二个事件是：信号在 t_2 时刻到达点 x_2, y_2, z_2 。信号传播的速度既然是 c ，所以它所经过的距离就是 $c(t_2 - t_1)$ 。另一方面，这同一个距离又等于 $[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$ 。因此，我们可以写出 K 系内两个事件的坐标的关系：

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 = 0. \quad (2.1)$$

同样两个事件，即该信号的传播，也可以在 K' 系内观察：

设第一个事件在 K' 内的坐标为 x'_1, y'_1, z'_1, t'_1 ，而第二个事件则为 x'_2, y'_2, z'_2, t'_2 。按照光速不变原理，信号传播的速度在 K' 系内与在 K 系