



普通物理学

第五分册 近代物理学基础

(第二版)

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

梁绍荣 修订



高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

全书共五册,于1987—1989年期间出版了第一版,并在1992年国家教育委员会举办的全国优秀教材评选中获国家教委二等奖。现根据国家教委1991年12月颁发的中学教师进修高等师范专科物理教育专业教学大纲,并考虑师专、教育学院及函授等各方面的教学需要修订再版。

本书系第五分册:近代物理学基础,其内容包括狭义相对论时空观、量子物理学基础、多电子原子及分子光谱、原子核物理学、粒子物理学和固体物理学等六章。各章末皆附有思考题和习题。书中除基本部分外,还有加*号的内容,以供参考或选用。

本书可作为卫星电视教育、师专、教育学院、函授和自学等各种形式物理专业的教材,亦可供其他学习近代物理学的人员参考。

普通物理学

第五分册:近代物理学基础

(第二版)

梁绍荣 刘昌年 盛正华 主编

梁绍荣 修订

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

中国科学院印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 字数 380 000

1989年5月第1版

1994年10月第1版 1994年11月第1次印刷

印数0001—1 141

ISBN 7-04-005114-1/O·1377

定价 8.50 元

第二版前言

全书共五册,是适应师专教学改革的要求及培养、提高初中物理师资的需要,参照师专、教育学院、中学教师进修高等师范专科等三种教学大纲编写而成。于1987—1989年陆续出版后,受到各方面的欢迎和好评。本书是受当时国家教委高校理科物理教材编审委员会普通物理编审组委托编写的,现根据国家教委1991年12月颁发的中学教师进修高等师范专科物理教育专业教学大纲,并考虑师专、教育学院及函授等各方面的需要修订再版。全书分力学、热学、电磁学、光学和近代物理学基础等五个分册。

全书加强了普通物理学各分册之间的联系;增加了物理学导论作为全书的第一章,使读者在学习物理学之初对它的全貌有一大致的了解,以图消除“只见树木,不见森林”的弊端;全书力求具有体系严谨、深入浅出、概念准确、叙述简明、知识面宽、求实求新、便于自学等特点。是否做到了这一点,请读者鉴定。

本书为第五分册(近代物理学基础),除保持原书的优点和编写意图外,其主要修改之处有:(1)结构上有较大的调整,将原书五篇改为六章,内容也相应地有所精减。粒子物理学部分减少近半(原考虑加强近代内容,这部分内容比通常教材多写一些,所以改编时减少的也多)。黑体辐射、光电效应和康普顿效应等内容纳入本书第四分册(光学)。(2)有几章的第一节和其中较繁难的一些节都重新改写,如碱金属光谱、粒子物理学和固体物理学等部分均有新编节目。(3)删去一些过难的内容以及相应的例题和习题。(4)增加一些现代性的内容。(5)调整了若干节,并加*表示,这样,既减轻了仅学基本内容的读者的负担,又兼顾了多方面的需要。(6)对书中的讲述的严谨性以及语言表达的可读性等方面作

了较仔细的修订。(7)改正了原书中书写、印刷、符号、表述以及习题答案等若干不妥和错误。

本书由原编者共同讨论确定修改原则后,由梁绍荣执笔修订。在此期间,承蒙川北教育学院许弟余副教授、邯郸地区教育学院赵国晴先生提出了许多意见和建议,特别是许弟余同志提出了一系列可行的、中肯的意见和建议。几年来,不少热心的教师和读者来函提出了若干改正意见。第五章由原作者北师大史天一教授进行了复核。高等教育出版社钟金城编审为本书出版付出了辛勤的劳动,作出了有益的贡献。全书由北师大胡镜寰副教授审校,提出了许多宝贵的意见和建议。在此,对以上各位先生表示衷心的感谢。

编 者

1993.11. 于北京师范大学

前 言

这是《普通物理学》的第五分册——近代物理学部分，该书是在国家教委高等学校理科物理教材编审委员会的指导下，根据有关大纲，为适应卫星电视教育、教育学院等校培训初中物理教师以及师专物理专业的教学需要而编写的。

我们在编写本分册时，考虑到上述学校与师范院校本科不同，因为在这类学校中再没有后续课，所以应在《普通物理学》的层次内讲清物理学的全貌。基于这种认识，我们在第五分册中增加了近代物理的成分。首先，从量子物理学的观点讲解原子物理学的内容；其次，增写了一篇粒子物理学(17学时)和一篇固体物理学(10学时)。本册共需96学时。这是本书改革的初次尝试。如不拟这样作，即不讲粒子物理学和固体物理学部分，本册用70学时即可。还有，狭义相对论部分如在力学中已经讲过，本册用60学时也就够了。

本册共分五篇十四章，第一、二、三、四章由北京师大梁绍荣同志和唐山师专、唐山教育学院王天泰同志编写，梁执笔初稿，王负责整理、选配思考题和习题；第五、六、七、八、九、十四章由宜昌师专王正清同志编写；第十、十一、十二、十三章由北京师大史天一同志编写。在编写过程中，作者之间经多次讨论，相互吸取有益的意见和建议并进行修改。全书由梁绍荣同志复核定稿。

本书承山东大学余寿绵教授(主审)、北京大学许祖华同志、北京教育学院张维善同志、衡阳师专曾锡滨同志、内江师专朱洪玉同志等审定，他们提出很多中肯的意见和建议，对此，我们深表谢意。

由于我们水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

一九八八.六.

目 录

第一章 狭义相对论时空观	1
§ 5-1-1 狭义相对论的实验基础.....	3
§ 5-1-2 爱因斯坦理论.....	11
§ 5-1-3 洛伦兹变换.....	19
§ 5-1-4 速度合成公式.....	31
* § 5-1-5 “观测”与“观看”.....	35
§ 5-1-6 相对论力学简介.....	40
思考题.....	53
习题.....	54
第二章 量子物理学基础	56
§ 5-2-1 微观客体的波粒二象性.....	57
§ 5-2-2 原子的核模型.....	67
§ 5-2-3 氢原子光谱的实验规律.....	81
§ 5-2-4 玻尔理论.....	84
§ 5-2-5 量子力学的建立.....	99
§ 5-2-6 波函数的统计解释.....	101
§ 5-2-7 薛定谔方程.....	108
§ 5-2-8 无限深势阱.....	113
* § 5-2-9 线性谐振子.....	117
§ 5-2-10 势垒贯穿 隧道效应.....	120
§ 5-2-11 氢原子.....	124
§ 5-2-12 电子自旋.....	137
§ 5-2-13 不确定关系.....	143
思考题.....	150
习题.....	151
第三章 多电子原子及分子光谱	153

§ 5-3-1 碱金属原子.....	153
§ 5-3-2 两个价电子的原子.....	175
§ 5-3-3 氦氖激光器原理.....	184
§ 5-3-4 元素周期表.....	188
§ 5-3-5 X射线.....	202
*§ 5-3-6 磁场对原子能级的影响.....	209
*§ 5-3-7 分子结构和分子光谱.....	223
思考题	240
习题	241
第四章 原子核物理学	245
§ 5-4-1 原子核的基本性质.....	246
§ 5-4-2 原子核衰变的基本规律.....	262
§ 5-4-3 α 衰变 β 衰变.....	273
§ 5-4-4 γ 衰变和内转换.....	285
*§ 5-4-5 放射性的应用和防护.....	290
§ 5-4-6 原子核结构模型.....	297
§ 5-4-7 原子核反应.....	313
*§ 5-4-8 核反应截面和反应机制.....	323
*§ 5-4-9 加速器.....	331
§ 5-4-10 核裂变 核聚变	334
思考题	348
习题	349
第五章 粒子物理学	352
§ 5-5-1 粒子物理学的发展概况.....	353
§ 5-5-2 粒子间的相互作用.....	360
§ 5-5-3 粒子的分类和基本性质.....	368
§ 5-5-4 夸克模型.....	377
*§ 5-5-5 同位旋 奇异性.....	381
*§ 5-5-6 对称性和守恒定律.....	391
思考题	405
习题	406

第六章 固体物理学	408
§ 5-6-1 引言.....	408
§ 5-6-2 晶体的结合.....	412
§ 5-6-3 金属的自由电子论.....	419
§ 5-6-4 固体的比热容.....	426
§ 5-6-5 固体的能带理论.....	433
§ 5-6-6 超导体.....	443
思考题	457
习题	458

第一章 狭义相对论时空观

狭义相对论是关于时间和空间的理论。对于时间和空间虽然人们天天接触,但对它们的认识却是不足的。从欧几里德几何学开始,就知道空间是三维的,再加上时间这一维就能够正确地描述运动。运动学是几何学的自然延伸,它于十七世纪后才初具规模,接着建立了力学,于是形成了**经典力学**的世界图象。在经典力学中,一直认为各种物体共存于同一空间里,并共同处于同一时间的长流中。这种对时间和空间的看法称为**绝对时空观**(又称经典时空观),即时间和空间就其本性而言,与物质及其运动无关。

对同一现象的描述,两个惯性系的时空坐标之间存在确定的变换关系,时间和空间的性质正是通过这种变换而显示出来。在本书第一册的第三章中已经讲过力学相对性原理,它说明任何一个力学规律在各惯性系中皆有相同的表示式,这是通过**伽利略变换**来实现的。所以,伽利略变换是经典时空观(即绝对时空观)的体现。

在本书第三册的第十章中,曾得出式(3.10.19):

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

式中 c 为真空中的光速(即电磁波的传播速度),它是一个常量。若上式是在惯性系 S 中得出的,而另一惯性系 S' 相对于 S 系沿光的传播方向以速度 v 作匀速直线运动,那么惯性系 S' 中的观察者测得的光速是多少呢?根据伽利略变换应为 $(c - v)$ 。这样,真空中的光速不再是常量,而是与所选择的惯性系有关了,但式(3.10.19)是由麦克斯韦方程组得出的,因此,描述电磁场基本规律的麦克斯韦方程组也不是在任何惯性系中都能成立,它应仅在某一特

定的惯性系中才成立。这样，电磁规律就不服从相对性原理了！

到19世纪后期，物理学已取得了很大成就，物体的机械运动在速度远小于光速时遵循牛顿力学的规律；热现象有热力学和统计物理学的理论；电磁现象总结为麦克斯韦方程组；光现象有光的波动理论，最后也归结为麦克斯韦方程。这样，当时不少物理学家都认为物理学理论的发展已经完善，物理学的大厦已基本建成，物理理论上的一些基本的、原则的问题已经解决，以后的任务或是提高实验的精度，在已知规律的公式中的小数点后面再加上几位数字就行了；或是研究理论的应用，根据物理学原理解释自然现象。

但“好景不长”，正当人们为物理学的伟大成就而欢欣鼓舞之时，在物理学的许多领域中出现了一系列理论与实验的尖锐矛盾，其中关于寻找绝对参考系的迈克耳孙-莫雷实验使物理学晴朗天空的远处出现了一朵小小的令人不安的乌云。正是这朵小小的乌云很快发展成物理学中的一场革命风暴。

当时，面临的问题是：经典时空观、相对性原理和电磁理论三者不相容，三者之中至少有一个是不正确的。多数物理学家认为相对性原理不成立。为此而寻找绝对参考系，但终未奏效。1905年，年仅26岁的爱因斯坦（1879—1955）大胆地否定了经典时空观，建立了新的狭义相对论时空观，从而使物理学产生了一次革命性的飞跃。狭义相对论对近代物理的发展，特别是对核物理和高能物理的发展有重大作用，它是近代物理学的重要基础。

狭义相对论时空观仅在物体作高速（与真空中的光速 c 可比）运动时才显现出来，但是日常生活和生产实践中所遇到的问题多属于低速（远小于光速 c ）运动，所以对高速运动的现象不好想象，因此在学习时切忌“想当然”，必须严格遵循狭义相对论的基本理论、基本公式进行逻辑推理和数学运算，才能得出正确的结果。

在物理学中，时间和空间是描述自然现象不可缺少的最常用、最平凡的基本概念，但是这两个人们熟悉的基本概念却并不简单。究竟什么是时间，什么是空间？很难找到恰当满意的定义。所谓

时空观，就是对有关时间和空间的物理性质的认识。对于时间和空间这两个基本概念，这里要讲的并不是如何准确地测量它们，而是着重研究它们之间的关系，认识它们与物质运动的联系。

在日常生活中，人们对经典时空观已很熟悉，并习惯地认为它是正确的，对于时间，牛顿写道：“绝对的、纯粹的数学的时间，就其本身和本性来说，均匀地流逝而与任何外在的情况无关。”对于空间，牛顿写道：“绝对空间，就其本性来说，与任何外在的情况无关，始终保持着相同和不变。”总之，在绝对时空观中，时间、空间和“外在的情况”这三者彼此是相互独立的，时间的流逝和空间的延伸都是绝对的。在日常生活和生产中我们没有必要去改变上述的绝对时空观，因为我们遇到都是物体运动速度远小于真空中的光速的情况。但是，当物质运动速度与真空中的光速可以相比时，例如在粒子物理中，绝对时空观的概念就完全不适用了，而应建立新的时空观。这个新的时空观就是爱因斯坦的狭义相对论时空观，它使人们对时间和空间概念的认识发生了根本性的改变。本章将从狭义相对论的实验基础讲起，使读者逐步认识狭义相对论的时空观。

§ 5-1-1 狭义相对论的实验基础

在绝对时空观中，光在真空中的传播速度应遵从伽利略变换，即遵从经典的速度合成公式。前面已经讲过，在绝对时空观中，真空中的光速不是常量，而是与所选择的惯性系有关。因此描述电磁场的基本规律的麦克斯韦方程组就只对一个特定的惯性系成立，而不是对所有的惯性系都成立。显然，这个特定的惯性系比其它的惯性系都优越，我们把这个特定的惯性系称为**绝对惯性系**。它是绝对静止的。如果我们能够在宇宙中找到这样一个特殊的绝对惯性系，那么，任何一个物体相对于这一绝对惯性系而言的运动，都是绝对运动。寻找这个绝对惯性系和确定地球相对于这个惯性系的运动就成为上世纪末物理学的一个重要课题。

麦克斯韦的电磁场理论预言了电磁波的存在。在真空中，所预言的电磁波的传播速度与光速相同，所以人们认为光也是电磁波。1888年赫兹在实验室中验证了麦克斯韦的预言。于是，光是一种电磁波就在理论和实验上完全确定了。机械波只能在介质中传播，在真空中是无法传播的。例如，声波在空气等介质中传播，水波在水中传播。那么，电磁波在什么“介质”中传播呢？实验证明，电磁波能在真空中传播，于是，19世纪的物理学家设想真空中存在一种“介质”，并称之为“以太”。他们认为“以太”不仅在真空中存在，而且无处不在，充满整个宇宙，并且具有许多特殊的性质。它可以渗透到一切物质的内部，用来传播电磁波，但是却不具有质量。并且认为，“以太”是绝对静止的，因此，“以太”就是所寻找的那个特殊的绝对惯性系。

为了寻找“以太”，物理学家们作了许多观测和实验，其结果都否定了这种“以太”的存在，也就否定了绝对惯性系的存在。其中有著名的迈克耳孙-莫雷实验和光行差的观测等，这一系列的观测和实验是狭义相对论的实验基础。下面只介绍光行差的观测和迈克耳孙-莫雷实验。

（一）光行差现象

所谓光行差现象，就是从地面上看到的恒星位置（视位置）与恒星的真实位置稍有偏移的现象。1727年，英国天文学家布拉德雷（1692—1762）首先报道了他的光行差观测结果：当观测处于你正上方的恒星时，你必须将望远镜稍微倾斜一个角度，才能看到这一恒星，这个倾斜的角度大约和垂直线成 $20.5''$ 。在一年中，望远镜的轴线画一个光行差圆锥。

为了说明光行差发生的原因，我们打一个比喻。设一滴水从高处垂直向地面匀速落下，要想使这滴水穿过一个在地面上静止的管子，我们就必须使管子与地面垂直，并且使管口对准落下的水滴，水滴才正好穿过（见图5-1-1a）。如果管子沿地面水平方向匀速运动，要是还想让水滴穿过管子，并且当水滴从管子下口出来

时,管子下口正好移动到水滴垂直下落所经过的路线上,就必须把管子朝运动的方向倾斜(见图 5-1-1b)。管子倾斜的角度可由下式算出:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{v_1}{v_2} \quad (5.1.1)$$

上式中 v_1 是管子相对于地面的速率, v_2 是水滴相对于地面下落的速率。

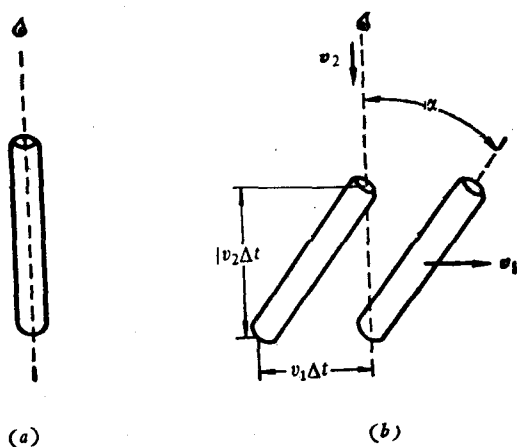


图 5-1-1

比较光行差现象与上面的现象,将恒星发出的光和水滴对应,望远镜和管子相对应,地球相对于“以太”的运动和管子相对于地面的运动相对应。那么,如果地球在“以太”中是静止的,为了观测你正上方的恒星,你就必须将望远镜垂直指向上方,如图 5-1-2a 所示。如果地球相对于“以太”以速率 v 向右运动,则为了观测这一恒星,你就必须将望远镜筒向右倾斜,如图 5-1-2b 所示。在这种情况下,恒星的视位置比真实位置稍向前偏移一点。

设地球相对于“以太”的速率为 v , 光相对于“以太”的速率为 c , 按前面分析得出的式(5.1.1), 望远镜的倾角 α 应服从下式:

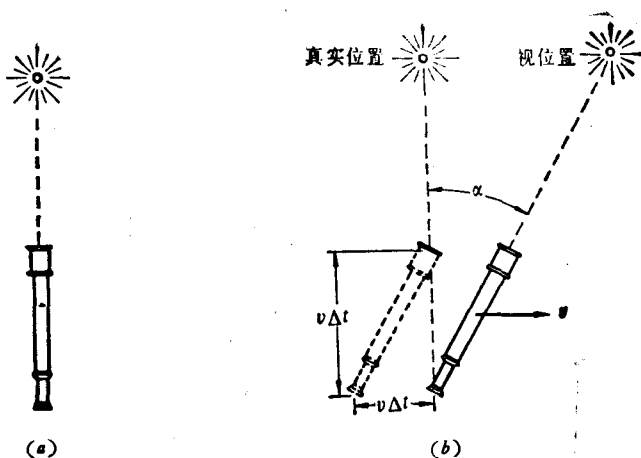


图 5-1-2

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c} \quad (5.1.2)$$

v 取地球的轨道速率,其值约为 $3 \times 10^4 \text{ m/s}$, 而光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 由此可得 $\alpha \approx 20.5''$. 地球绕太阳的轨道运动近似是圆, 每隔 6 个月光行差的方向要反向, 因此, 望远镜的轴线在一年内将描画出一个光行差圆锥, 如图 5-1-3 所示。

以上的分析计算与观测的结果完全相符。

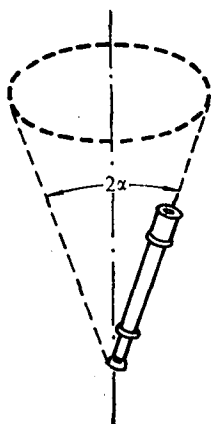


图 5-1-3

光行差现象的意义何在? 物理学家曾认为接近地球表面的“以太”恰如空气一样, 由于被地球吸引而随着地球一起运动。换句话说, 地球表面附近的“以太”被地球拖曳着一起运动, 这就是所谓的“拖曳假说”。如果这种假设成立, 就意味着“以太”相对于地球静止, 观测我们头顶的恒星时望远镜就不必倾斜, 即不会存在光行差现象。光行差现象说明: 地球在“以太”中运动, “以太”没有被地

球拖曳着一起运动。

(二) 迈克耳孙-莫雷实验

这个实验的目的是寻找“以太”，以验证“以太”假说。1881年，迈克耳孙(1852—1931)首先作了这个实验。1887年，迈克耳孙又与莫雷(1838—1923)合作进行了更精密的测量。

他们的想法是这样的，如果在“以太”中光速是一定的，那么，当观察者以一定的速度相对于“以太”运动时，光相对于观察者的速度在不同方向应是不同的。他测量到迎面而来的光，速度大，从后面追来的光，速度小，即光速与观察者相对于“以太”的速度有关。如果能测量到这个差别，就支持了“以太”假说。

对此，我们可以作如下的比喻。

设想一乘客乘坐在匀速行驶的火车里，在与铁路平行的公路上有来往行驶的汽车，假设这些汽车的速度大小相等，那么，乘客一定会看到，迎面开来的汽车相对于他的速度大，而从后面开来的汽车相对于他的速度小。如果把地球比喻成“以太”，那么，汽车就好比是光，观察者就是在行驶的火车中的乘客，来往汽车相对于乘客的速度不同，就如同光相对于观察者的速度在不同方向上不同。

光速为每秒 30 万公里，而一般物体速度都很小，所以，即使不同方向的光速是不相同。我们也很难测量出来。迈克耳孙-莫雷实验不是直接测量不同方向的光速值本身，而是测量不同方向的速度之间的差，这正是该实验的巧妙之处。

实验是用迈克耳孙发明的干涉仪作的。把迈克耳孙干涉仪固定在地球上，如图 5-1-4 所示，设想“以太”相对于太阳是静止的，则与地球固连的干涉仪将以 30km/s 的速率（地球绕太阳的轨道速率）相对于“以太”运动，其方向要随季节而变，如图 5-1-5。暂时略去地球的自转运动。光束从光源 S 发出，被半镀银镜 M 分成两相干光束：通过 M 的光束 1 和被 M 反射的光束 2。光束 1 被 M_1 反射回到 M ，光束 2 则被镜 M_2 反射回到 M 。然后，返回的光束 1 部分地被 M 反射，返回的光束 2 部分地透过 M ，都达到 T 处，在那

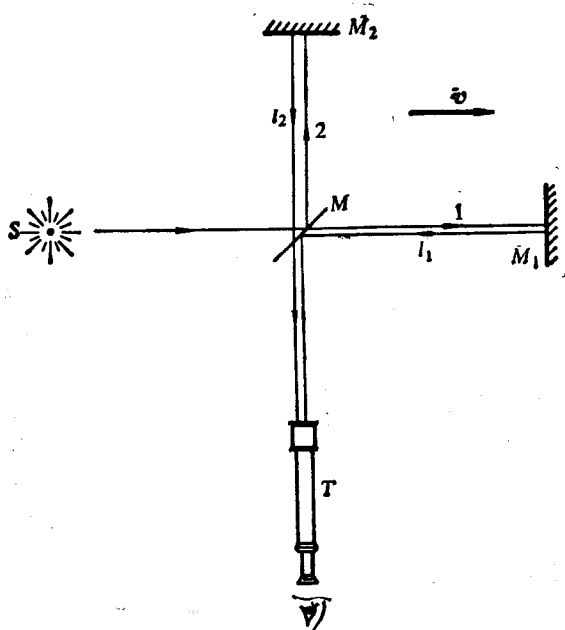


图 5-1-4

里发生干涉。

设干涉仪的两臂长度 l_1 和 l_2 相等，则光束 1 和光束 2 的光程

差是由于与地球固连的仪器相对于“以太”运动引起的。假定地球沿 MM_1 方向以速率 v 相对于“以太”运动，则沿 $M-M_1-M-M-T$ 传播的光束 1 与沿 $M-M_2-M-M-T$ 传播的光束 2 所用的时间是不一样的。光在“以太”中沿任何方向的传播速率均为 c 。因为干涉仪

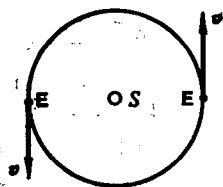


图 5-1-5

的 l_1 臂沿 MM_1 方向相对于“以太”以速率 v 运动，所以，根据速度合成法则，从实验室参考系来看，光束 1 沿 MM_1 的速率为