高等院校物理学习辅导丛书
Exercise Series in Physics for Higher Education

大学物理辅导

University Physics Tutorship

吕金钟 主编
Lü Jinzhong

清华大学出版社

内容简介

本书是与张三慧先生主编的《大学物理学》第二版教材相对应的辅导教材。它包括例题、思考题解答、有关问题说明和测验题四部分。例题的选择有两个目的：一是为了加深学生对基本概念、基本定律的理解和掌握；二是为了和教材上的例题、习题相对应，力求在方法和内容上起到辅助作用。本书对《大学物理学》第二版教材上的思考题做了全面的解答，有助于学生自学，也有利于激发学生学习物理的兴趣。书中说明的一些问题，有的是教学中的体会，有的是对某些问题的强调，有的是学生感兴趣经常问及的问题。安排测验题则是为学生提供一个自我检查学习的机会，一些选择题是有目的地针对一些基本概念，有助于学生对一些基本概念的理解。要说明的是，有的测验题是从清华大学出版社出版的北京市非物理专业工科院校物理竞赛题集中摘录的，对学生开阔视野是有益的。

本书可以作为使用《大学物理学》教材的院校学生的自学辅导书，也可以作为习题课的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理辅导/吕金钟主编. —北京：清华大学出版社，2004.8
(高等院校物理学习辅导丛书)
ISBN 7-302-09160-9

Ⅰ.大…　Ⅱ.吕…　Ⅲ.物理学—高等学校—教学参考资料　Ⅳ.O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 078106 号

出 版 者：清华大学出版社　　**地　　址**：北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**客户服务**：010-62776969
组稿编辑：朱红莲
文稿编辑：赵从棉
印 刷 者：清华大学印刷厂
装 订 者：三河市金元装订厂
发 行 者：新华书店总店北京发行所
开　　本：185×230　**印张**：22.5　**字数**：459 千字
版　　次：2004 年 8 月第 1 版　2004 年 8 月第1 次印刷
书　　号：ISBN 7-302-09160-9/O・384
印　　数：1～5000
定　　价：29.80 元

前言

FOREWORD

大学物理课是一门重要的基础理论课程。为配合张三慧先生编著的《大学物理学》第二版教材的课堂教学，帮助学生进一步理解和掌握相应的大学物理知识，巩固和提高所学基本内容，我们编写了《大学物理辅导》。编写本书的初衷是帮助同学自学，起到课外辅导与答疑的作用，同时也希望给教员的物理教学提供参考。

本书在北京科技大学以讲义的形式已经使用过两年，同学和教员都给予了比较好的评价。本书是在原讲义的基础上，进行重新整理和编写而成。

全书共分 10 章。第 1 章、第 2 章和第 7 章由刘柏松执笔，第 3 章、第 4 章和第 10 章由吕金钟执笔，第 6 章和第 8 章由丁红胜执笔，第 5 章和第 9 章由尹红执笔。全书由吕金钟统稿。

在本书的编写过程中，张三慧先生给予了热情的支持和指导，并对稿件进行了审阅，在此表示衷心的感谢。

同时要感谢北京科技大学教务处及大学物理课程组全体教师的热心帮助，感谢刘红、邱红梅为此书所做的努力，感谢清华大学物理系邓新元教授等的支持。特别需要说明的是，本书的编写过程中参考了若干现有的教材及有关杂志，在许多方面得到了启发，因难以一一指明，谨在此一并表示感谢！

由于编者业务水平有限，书中一定会存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

2003 年 10 月

目录

CONTENTS

第 1 章

牛 顿 力 学

1.1 例题

1. 一质点在 xy 平面内运动，其运动方程为

$$\boldsymbol{r}=(2t^2-1)\boldsymbol{i}+(3t-5)\boldsymbol{j}$$

求在任意时刻 t 质点运动的速度、切向加速度、法向加速度的大小和此时质点所在处轨道的曲率半径。

解 对运动方程 $\boldsymbol{r}=(2t^2-1)\boldsymbol{i}+(3t-5)\boldsymbol{j}$ 求导，得 t 时刻质点运动的速度①

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=4t\boldsymbol{i}+3\boldsymbol{j}$$

其中速度的大小为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=\sqrt{16t^2+9}$$

质点运动的加速度为

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=4\boldsymbol{i}$$

切向加速度的大小为

$$a_{\mathrm{t}}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\sqrt{16t^2+9})=\frac{16t}{\sqrt{16t^2+9}}$$

法向加速度的大小为

$$a_{\mathrm{n}}=\sqrt{a^2-a_{\mathrm{t}}^2}=\frac{12}{\sqrt{16t^2+9}}$$

---

① 书中未标注单位的量，其单位都默认为国际标准单位。

曲率半径为

$$\rho = \frac{v^2}{a_n} = \frac{1}{12}(16t^2+9)^{\frac{3}{2}}$$

2. 设一条河的河水从岸边到河心的流速按正比增大，岸边处水流速度为零，河中间流速为 v_0，河宽为 d。一船以不变的速度 u 垂直于水流方向从岸边驶向河心。求：

(1) 船的运动方程；

(2) 船的轨道方程。

解 取岸为参照系，坐标系 Oxy 如图 1.1 所示。船从 O 点出发，设船离岸时开始计时。

(1) 船的速度在 x 和 y 方向的分量为

$$v_x = ky, \quad v_y = u$$

因为 $y=d/2$ 时 $v_x=v_0$，所以 $k=\frac{v_x}{y}=\frac{2v_0}{d}$。由于 $v_y=u=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$，有 $\mathrm{d}y=u\mathrm{d}t$，两边积分并利用初始条件($t=0$ 时 $y=0$)得

$$y = \int_0^t u\mathrm{d}t = ut$$

因为 $v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{2v_0}{d}y=\frac{2v_0}{d}ut$，有 $\mathrm{d}x=\frac{2v_0}{d}ut\,\mathrm{d}t$，积分并利用初始条件($t=0$ 时 $x=0$)得

$$x = \int_0^t \frac{2v_0 u}{d}t\,\mathrm{d}t = \frac{v_0 u}{d}t^2$$

所以，船的运动方程为

$$x = \frac{v_0 u}{d}t^2, \quad y = ut$$

(2) 从运动方程中消去 t，即可得到船的轨迹方程为

$$x = v_0 y^2/(ud)$$

在 $0\leqslant y\leqslant d/2$ 范围内其轨迹为一抛物线。

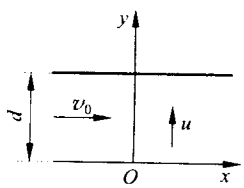

图 1.1

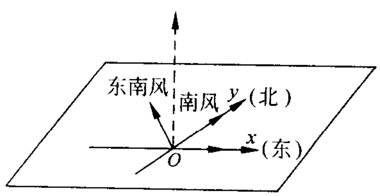

图 1.2

3. 一人骑自行车向东而行，如图 1.2 所示。在速度为 10 m/s 时，觉得有南风；速度增至 15 m/s 时，觉得有东南风。求风对地的速度。

解　在速度为 10 m/s，人觉得有南风时，设地面为 S 系，人为 S' 系，根据伽利略速度变换可得方程

$$\begin{cases} v_x = v'_x + 10 = 10 \\ v_y = v'_y + 0 \end{cases}$$

v_x，v_y 为风相对地面的风速在 x 方向和 y 方向的分量。在速度增至 15 m/s，觉得有东南风时，设人为 S'' 系，再根据伽利略速度变换得方程

$$\begin{cases} v_x = v''_x + 15 \\ v_y = v''_y = -v''_x \end{cases}$$

得到 $v_x = 10$ m/s，$v_y = 5$ m/s。所以，相对地面风速为

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = 10\boldsymbol{i} + 5\boldsymbol{j}\ (\mathrm{m/s})$$

此题使用了伽利略速度变换的分量形式，当然也可直接使用其矢量形式 $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{u}$，即

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = \boldsymbol{v}'_{风\to人} + \boldsymbol{u}_{人\to地}$$

根据条件有

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = \boldsymbol{v}'_{风\to人}\boldsymbol{j} + 10\boldsymbol{i}$$

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = -\boldsymbol{v}''_{风\to人}\boldsymbol{i} + \boldsymbol{v}''_{风\to人}\boldsymbol{j} + 15\boldsymbol{i}$$

则

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = \boldsymbol{v}'_{风\to人}\boldsymbol{j} + 10\boldsymbol{i} = -\boldsymbol{v}''_{风\to人}\boldsymbol{i} + \boldsymbol{v}''_{风\to人}\boldsymbol{j} + 15\boldsymbol{i}$$

矢量相等，对应分量相等，因此，有

$$\boldsymbol{v}''_{风\to人} = 5\ (\mathrm{m/s}),\quad \boldsymbol{v}'_{风\to人} = \boldsymbol{v}''_{风\to人} = 5\ (\mathrm{m/s})$$

所以相对地面风速为

$$\boldsymbol{v}_{风\to地} = 10\boldsymbol{i} + 5\boldsymbol{j}(\mathrm{m/s})$$

4. 有一光滑的刚性平面曲线，以匀角速度 ω 绕铅垂的对称轴转动，如图 1.3 所示。如要使穿在光滑刚性曲线上的小珠在任意位置均可保持相对静止，则此曲线方程应如何？

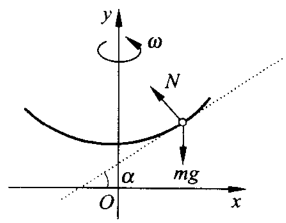

图　1.3

解　设 xOy 平面为曲线所在平面，y 轴为铅垂的对称轴，则 x 轴将随曲线绕 y 轴以匀角速 ω 旋转。由于曲线是光滑的，曲线给小珠的支撑力 $\boldsymbol{N}$ 必然垂直于小珠所在点的曲线的切线。要使小珠在任意位置均可保持相对静止，$\boldsymbol{N}$ 的 y 方向分量和重力应使小珠 y 方向上的加速度 $a_y = 0$。$\boldsymbol{N}$ 的 x 方向分量正好是小珠绕 y 轴作圆周运动的向心力。设切线和 x 轴的夹角为 α，则由牛顿第二定律得

$$N\cos\alpha - mg = ma_y = 0$$

$$N\sin\alpha = m\frac{v^2}{x} = m\omega^2 x$$

由此两式，得 $\tan\alpha = \frac{\omega^2}{g}x$。而$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \tan\alpha$，即有$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} = \frac{\omega^2}{g}x$，则

$$\mathrm{d}y = \frac{\omega^2}{g}x\,\mathrm{d}x$$

积分得

$$y = \frac{\omega^2 x^2}{2g} + C$$

它是以 y 轴为对称轴的抛物线，其中 C 为积分常数，不同 C 值表示抛物线沿 y 轴的平移。

5. 如图 1.4(a)所示。在以匀加速度 a_0 上升的升降机内，固定一定滑轮。一根跨过定滑轮的绳子连接质量分别为 m_1 和 m_2 的两个物体(假定滑轮是光滑的，且滑轮和绳子的质量均可不计)。设 $m_2 > m_1$，求每个物体的加速度及绳子的张力。

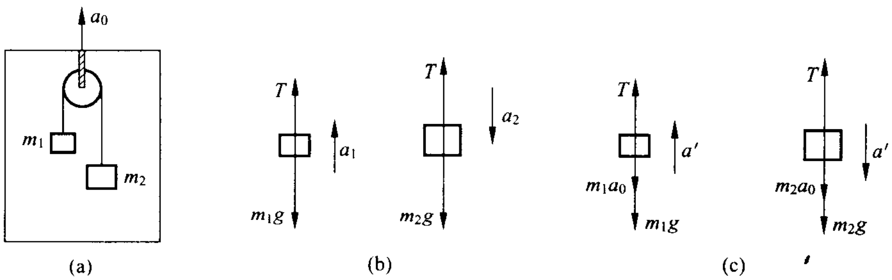

图 1.4

解 升降机作匀加速运动，由于绳子不伸长，m_1 和 m_2 两个物体将以相同大小的加速度 a'相对于升降机运动。而且不计滑轮质量，绳子的张力应相同。

以地面为参照系(惯性系)。m_1、m_2 受力如图 1.4(b)所示。由牛顿第二定律有

$$T - m_1 g = m_1 a_1$$

$$m_2 g - T = m_2 a_2$$

由伽利略变换 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{a}_0$，得

$$a_1 = a' + a_0$$

$$a_2 = a' - a_0$$

由以上四个式子，得出

$$a' = \frac{(m_2 - m_1)(g + a_0)}{m_1 + m_2}$$

$$a_1 = \frac{2m_2a_0 + (m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2}$$

$$a_2 = \frac{2m_1a_0 - (m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2}$$

$$T = \frac{2m_1m_2(g + a_0)}{m_1 + m_2}$$

若选升降机为参照系(非惯性系),分析 m_1,m_2 受力,如图 1.4(c)所示,得

$$T - m_1g - m_1a_0 = m_1a'$$

$$m_2g + m_2a_0 - T = m_2a'$$

以上两式相加,消去 T,得

$$a' = \frac{(m_2 - m_1)(g + a_0)}{m_1 + m_2}$$

由于加速度 a' 是对升降机而言的,因此 m_1、m_2 相对地面的加速度和张力分别为

$$a_1 = \frac{2m_2a_0 + (m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2}$$

$$a_2 = \frac{2m_1a_0 - (m_2 - m_1)g}{m_1 + m_2}$$

$$T = \frac{2m_1m_2(g + a_0)}{m_1 + m_2}$$

6. 把长为 L 的细链条静止地放在光滑的水平桌面上,且链条的一半从桌边下垂,试求链条刚滑下桌面时的速度。

解　整个物体的质量没变,但物体各个部分连续地进入某一运动状态,而进入某一运动状态的质量是变的。链条刚滑下桌面时,指链条末端刚滑到桌子边缘,此时链条上各处速度是相同的,且方向都是铅垂向下,所以选取桌角为坐标原点 O,铅垂向下为 Y 轴正方向。设链条密度为 λ,下垂部分为 y。

这是一个变质量问题,对于这类问题首先要认清什么是主体 m,什么是质元 $\mathrm{d}m$。以下垂链条段 y 为主体,则

$$m = \lambda y$$

而质元为链条在下滑过程中进入 y 的链条段的微量,即

$$\mathrm{d}m = \lambda \mathrm{d}y$$

由于质元和主体彼此相连,故质元与主体的速度相同(或质元相对于主体的速度 $u=0$),则

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}$$

对于 m,其受重力 $mg=\lambda yg$,受张力为 T。由牛顿第三定律可知,这张力就是使

$(L-y)$段产生加速度 a 的拉力

$$T=\lambda(L-y)a$$

显然$(L-y)$段的加速度的大小等于 y 段这一主体加速度的大小，故

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

对 m 应用牛顿第二定律有 $mg-T=ma$，即

$$\lambda yg-\lambda(L-y)\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\lambda y\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

$$\lambda L\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\lambda yg$$

因为$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}v$，把它代入上式，整理后可得 $Lv\mathrm{d}v=gy\mathrm{d}y$。因为在 $y=\frac{L}{2}$时 $v=0$；在 $y=L$ 时 $v=v$，两边积分有

$$\int_0^v Lv\mathrm{d}v=\int_{L/2}^L gy\mathrm{d}y$$

因此有

$$v=\frac{1}{2}\sqrt{3gL}$$

可见末速度 v 和链条长度 L 的平方根成正比，而和链条密度无关(此题也可把$(L-y)$段链条看作主体，而把进入 y 段链条元长看作质元)。

7. 如图 1.5 所示，有一固定于光滑的水平面上的内半径为 R 的光滑圆环，质量为 m 的质点逆时针在环内沿着环的内侧作匀速率圆周运动，速率为 v。求质点从 A 点沿着圆环运动到 B 点的过程中，它所受环作用力的冲量。

解法 1 用力的冲量定义计算。

质点在法向(径向)受到环的作用力 N，在竖直方向受到重力和水平面的支持力，两者相互抵消。因为质点作匀速率圆周运动，它所受环的作用力为

$$\boldsymbol{N}=m\frac{v^2}{R}\boldsymbol{n}$$

其中 $\boldsymbol{n}$ 表示法向单位矢量。

设某时刻质点运动到图示位置，选直角坐标系如图 1.5 所示，它与 y 轴夹角为 θ，则

$$\boldsymbol{N}=N_x\boldsymbol{i}+N_y\boldsymbol{j}=N\sin\theta\boldsymbol{i}-N\cos\theta\boldsymbol{j}$$

质点从 A 点运动到 B 点过程中所受作用力 N 的冲量为

$$\boldsymbol{I}=\int_0^t\boldsymbol{N}\mathrm{d}t=\int_0^t\left(m\frac{v^2}{R}\sin\theta\boldsymbol{i}-m\frac{v^2}{R}\cos\theta\boldsymbol{j}\right)\mathrm{d}t$$

因为 $v=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\frac{R\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$，则 $\mathrm{d}t=\frac{R\mathrm{d}\theta}{v}$，所以

$$I = \int_0^{\pi/2} m \frac{v^2}{R}(\sin\theta \boldsymbol{i} - \cos\theta \boldsymbol{j}) \frac{R\mathrm{d}\theta}{v} = mv(\boldsymbol{i} - \boldsymbol{j})$$

解法 2　用质点的动量定理计算。

设质点在 A、B 两点的速度分别为$\boldsymbol{v}_A$、$\boldsymbol{v}_B$，则

$$\boldsymbol{v}_A = -v\boldsymbol{i}, \quad \boldsymbol{v}_B = -v\boldsymbol{j}$$

由质点的动量定理，质点从 A 点运动到 B 点，作用力的冲量为

$$\boldsymbol{I} = m\boldsymbol{v}_B - m\boldsymbol{v}_A = m(-v\boldsymbol{j}) - m(-v\boldsymbol{i}) = mv(\boldsymbol{i} - \boldsymbol{j})$$

两种解法结果一致。

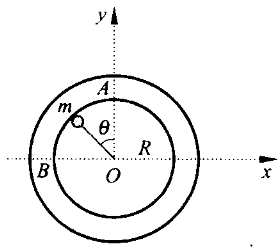

图　1.5

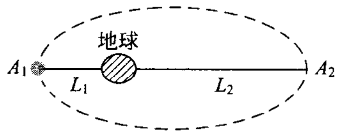

图　1.6

8. 我国第一颗人造地球卫星沿椭圆轨道运动，地球的中心为该椭圆的一个焦点。已知地球半径 R=6378 km，人造地球卫星与地面的最近距离 L_1=439 km，与地面的最远距离 L_2=2384 km，如图 1.6 所示。若人造卫星在近地点 A_1 的速度 v_1=8.1 km/s，求人造卫星在远地点 A_2 的速度 v_2。

解　人造卫星只受地球引力作用，作用力指向地心 O，其所受力矩为零，人造卫星与地球系统角动量守恒，有

$$(R + L_1)mv_1 = (R + L_2)mv_2$$

所以

$$v_2 = \frac{R + L_1}{R + L_2} v_1 = \frac{6378 + 439}{6378 + 2384} \times 8.1 = 6.3(\mathrm{km/s})$$

9. 如图 1.7 所示，一质点受力 $\boldsymbol{F} = (2y\boldsymbol{i} + 4x^2\boldsymbol{j})$，当质点从原点 O 分别沿 OAC 和 OC 路径运动到 x=2 m，y=1 m 的 C 点的过程中，力 $\boldsymbol{F}$ 所做的功是多少？

解　因为 $\boldsymbol{F} = 2y\boldsymbol{i} + 4x^2\boldsymbol{j}$，位移可写成 $\mathrm{d}\boldsymbol{r} = \mathrm{d}x\boldsymbol{i} + \mathrm{d}y\boldsymbol{j}$，所以力 $\boldsymbol{F}$ 所做的功为

$$A = \int_O^C \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = \int_O^C (2y\mathrm{d}x + 4x^2\mathrm{d}y)$$

(1) 沿 OAC 路径。在 OA 段，y=0，$\mathrm{d}y$=0，所以

$$\boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{r} = 0$$

在 AC 段，$x=2\text{m}$，$\mathrm{d}x=0$，所以有

$$\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=16\mathrm{d}y$$

沿 OAC 路径力 $\boldsymbol{F}$ 所做的功为

$$A=\int_{OAC}\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_0^1 16\mathrm{d}y=16\ (\text{J})$$

(2) 沿 OC 路径。由于 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}=\frac{1}{2}$，有 $\mathrm{d}x=2\mathrm{d}y$，所以

$$\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=2y\times2\mathrm{d}y+4x^2\times\frac{1}{2}\mathrm{d}x=4y\mathrm{d}y+2x^2\mathrm{d}x$$

沿 OC 路径力 $\boldsymbol{F}$ 所做的功为

$$A=\int_{OC}\boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\int_0^1 4y\mathrm{d}y+\int_0^2 2x^2\mathrm{d}x=7.3\quad(\text{J})$$

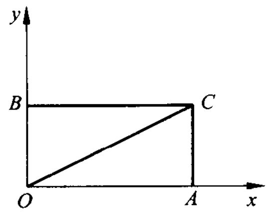

图 1.7

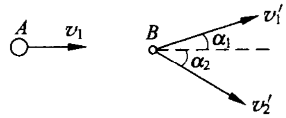

图 1.8

10. 以速率 $v_1=6.0\times10^4$ m/s 运动的粒子 A 与另一个质量为其一半而静止的粒子 B 相碰，如图 1.8 所示。假定碰撞是完全弹性的，碰后粒子 A 的速率为 $v_1'=5.0\times10^4$ m/s。求碰后粒子 B 的速率 v_2' 以及碰后粒子 A 与 B 的速度分别相对于碰前粒子 A 的速度方向的偏角 α_1 与 α_2。

解 这是二维斜碰问题。设粒子 A 质量为 m，则粒子 B 的质量为 $m/2$。对粒子 A、B 系统，碰撞过程动量守恒、机械能守恒，从而有

$$mv_1=mv_1'\cos\alpha_1+\frac{m}{2}v_2'\cos\alpha_2$$

$$0=mv_1'\sin\alpha_1-\frac{m}{2}v_2'\sin\alpha_2$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2=\frac{1}{2}mv_1'^2+\frac{1}{2}\left(\frac{m}{2}\right)v_2'^2$$

代入数据，解出

$$v_2'=\sqrt{2(v_1^2-v_1'^2)}=4.69\times10^4\ (\text{m/s})$$