

# 带电粒子在磁镜磁场中的运动

报告人：吴昕

指导老师：程福臻

2017.6.21

## 目录 CONTENTS

- 一 | 基本理论
- 二 | 计算方法
- 三 | 模拟结果
- 四 | 结果讨论
- 五 | 参考文献
- 六 | 致谢

## 一、基本理论

### 1. 运动方程

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

### 2. 磁压力

$$m \frac{dv_z}{dt} = -\nabla(\mu B)$$

### 3. 梯度漂移(B的横向不均匀)

$$v_G = \frac{\mu}{qB^2} \bar{\mathbf{B}} \times \nabla B$$

### 4. 曲率漂移(B的纵向不均匀)

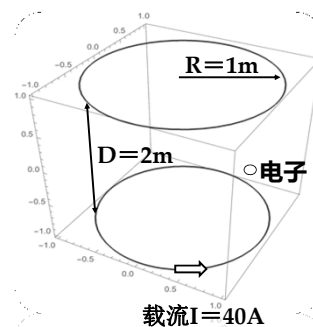
$$v_d = \frac{mv_z^2}{qB^2 R^2} \mathbf{R} \times \mathbf{B}$$

### 5. xOy面上载流线圈的磁场

$$B_{x0}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz \cos\theta}{(R^2 + x^2 + y^2 + z^2 - 2Rx\cos\theta - 2Ry\sin\theta)^{3/2}} d\theta$$

## 二、计算方法

约定：之后的模拟设定的参数：



## 二、计算方法

### 2.1: 磁场计算：

范围： $(-1,1) \times (-1,1) \times (-2,2)$

数值积分 + 插值

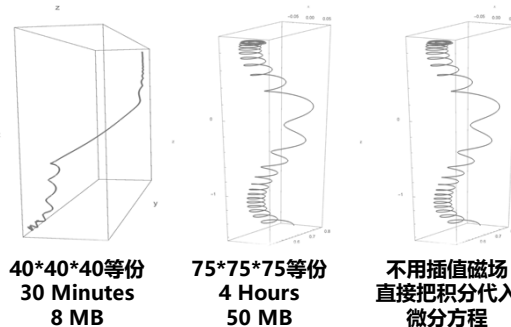
函数：  
NIntegrate

75\*75\*75等份  
40万个点

- \* 分割当然是越细越好，但要考虑时间。
- \* 试验得到的两全的参数

## 二、计算方法

经历的失败：分割精度不够



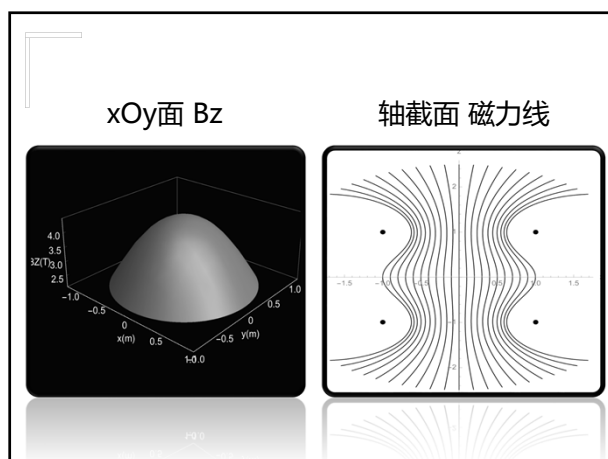
```

=1; d=2R; n=50;
Bz[x_, y_, z_] := NIntegrate[z Cos[theta], {theta, 0, 2 Pi}]

```

**计算耗时:**  
 2017.4.30 14:00  
 2017.4.30 17:49  
**接近4小时**

单个线圈  
 两个线圈  
 分割  
 插值  
 写入硬盘



## 二、计算方法

### 2.2: 轨迹计算:

**参数设定 + 微分方程数值解**

电子  
 100~1000km/s  
 10us~1000us  
 直线运动估算  
 运动长度~装置尺度  
 很快就能找出合适区间

NDSolve, 插值函数

```

BK = cc "Users\apple\Documents\NDSolveFrom Mathematica\数值\磁场的数值解\Bz.m";
BY = cc "Users\apple\Documents\NDSolveFrom Mathematica\数值\磁场的数值解\Bz.m";
BZ = cc "Users\apple\Documents\NDSolveFrom Mathematica\数值\磁场的数值解\Bz.m";

```

读取B  
 设置参数  
 解微分方程  
 作图  
 写入硬盘

## 二、计算方法

### 2.2: 轨迹计算:

**\* 模拟试验原则:**

1. 时间先短后长
2. 先抓主要特点, 再设置大量循环验证结论普适性

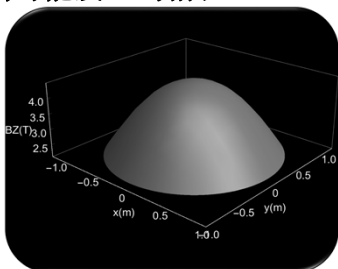
**电磁学知识: 理论指导与预测  
 模拟之来验证  
 并发现新现象**

## 二、计算方法

### 2.3: 一个实例: 我是怎么总结出规律的? 已有的基本知识—— 一般的梯度漂移:

二、计算方法

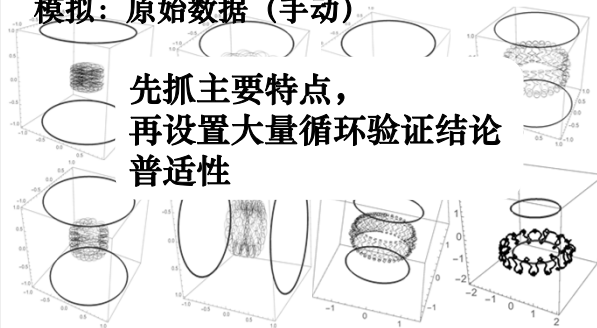
2.3:一个实例: 我是怎么总结出规律的?  
根据磁镜场xOy面磁场特点, 作类比推广, 预测可能发生的情况



二、计算方法

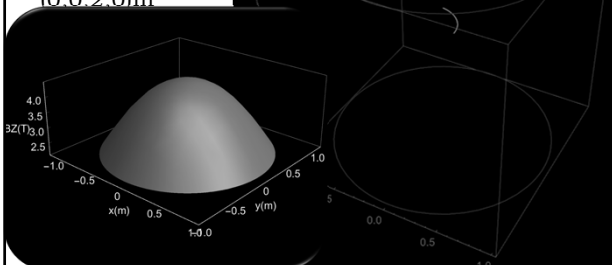
2.3:一个实例: 我是怎么总结出规律的?  
模拟: 原始数据 (手动)

先抓主要特点,  
再设置大量循环验证结论  
普适性



三、模拟结果

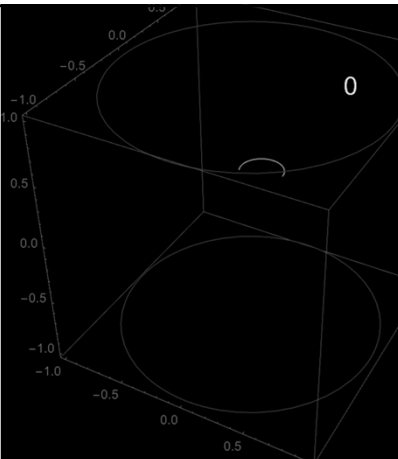
1.xOy 平面漂移  
( $V_z=0$ , 初位置在  
xOy面上)  
初位置:  
(0,0,2,0)m



三、模拟结果

1.xOy 平面漂移

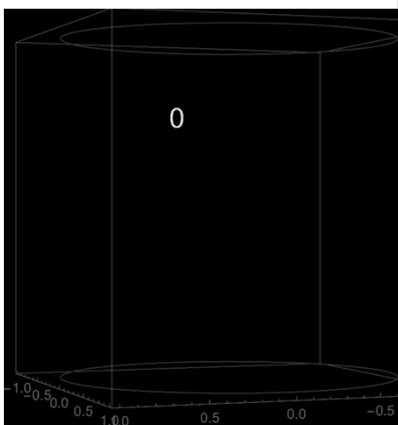
初位置:  
(0,0.5,0)m  
初速度:  
(0,400,0)km/s



三、模拟结果

2.xOy 平面漂移  
+螺旋线  
(情况1 +  $V_z$ )

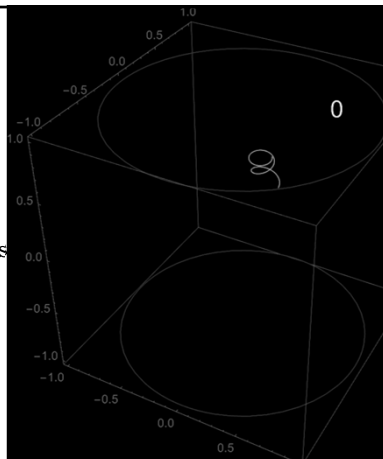
初位置:  
(0,0.8,-1.6)m  
初速度:  
(0,0,150)km/s

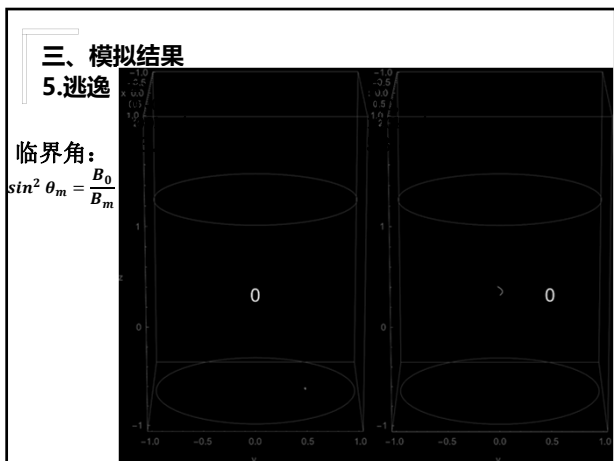
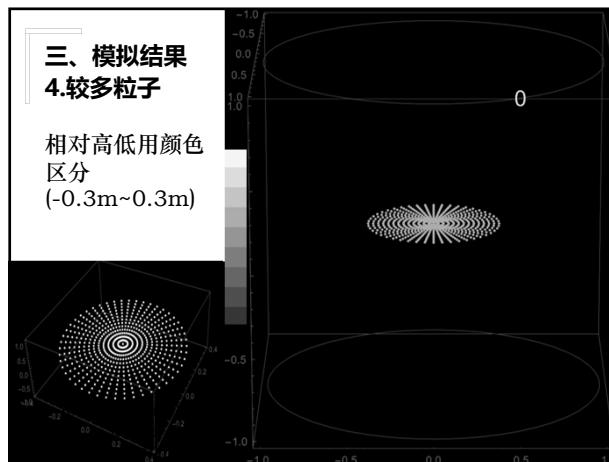
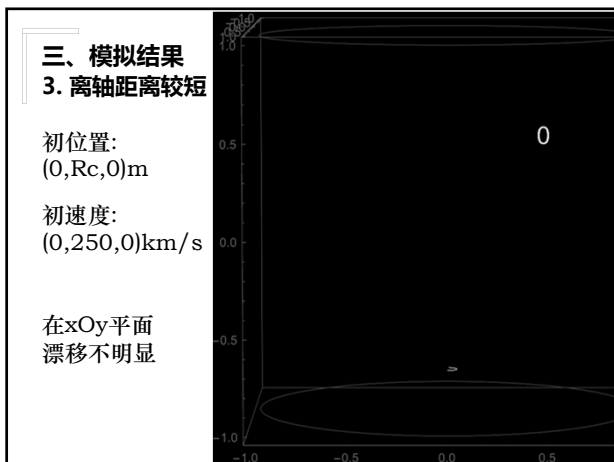
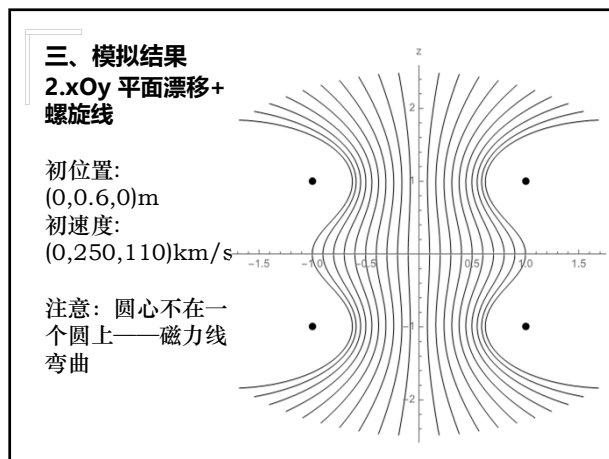
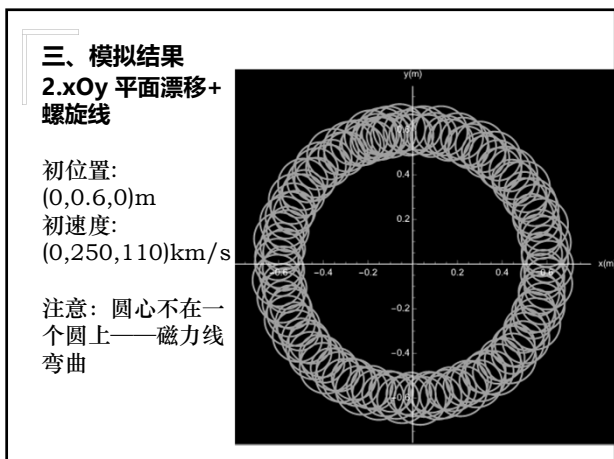


三、模拟结果

2.xOy 平面漂移+  
螺旋线

初位置:  
(0,0.6,0)m  
初速度:  
(0,250,110)km/s





**四、结果讨论**

**带电粒子在磁镜中的运动 =**  
 平面上的漂移+沿磁力线的螺旋运动+反弹+逃逸

- 限制在一定磁场强度范围内(圆)
- “扭曲的弹簧”
- 两端逃逸(临界角)

**结论合理性:**  
 1. 与课堂学过的知识相符  
 2. 经过大量实践检验

#### 四、结果讨论

##### 发展展望:

在本研究基础之上,  
可以考虑各种因子的修正:

1. 相对论效应
2. 粒子间相互作用
3. 粒子产生的电磁场

#### 五、参考文献

- [1] 胡友秋、程福臻、叶邦角、刘之景.电磁学与电动力学(上册)[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2015
- [2] 常庚哲、史济怀.数学分析教程(上册)[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2015
- [3] 常庚哲、史济怀.数学分析教程(下册)[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2015
- [4] 董健.Mathematica与大学物理计算[M].北京:清华大学出版社,2013
- [5] 姚若河、吴为敬、张晓东、刘玉文.磁镜场约束中粒子运动的数值计算[J].真空科学与技术学报,2004
- [6] 代国红、李兴奎、黄伟军、方利广.带电粒子在磁镜场中运动时速度的演变[J].物理与工程,2010
- [7] 刘列、刘永贵、杨建坤.磁镜场约束等离子体的粒子模拟[J].国防科技大学学报,2001.
- [8] 李兴奎.带电粒子在非均匀磁场中的漂移运动分析[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2005
- [9] 马怀君.磁镜原理简介[J].大学物理,1989
- [10] 张琳、蔡莉莉.磁镜原理及其在磁约束中的应用[J].物理与工程,2013
- [11] 方瑞银.MATLAB仿真带电粒子在磁场中磁镜现象[J].电子世界,2012

#### 六、致谢

感谢程老师的宝贵意见!

感谢程老师电磁学班同学的信任!

#### 七、提问环节

## 感谢聆听!

带电粒子在磁镜  
磁场中的运动

报告人: 吴昕

指导老师: 程福臻

2017.6.21

\*源代码&磁场数据获取:  
E-mail: wx1999@mail.ustc.edu.cn