

实验一 超冷原子量子振荡跃迁

黄荣 19307110346

一、实验目的

近年来，随着量子信息、量子计算、量子通讯的快速兴起和应用突破，以量子力学为基础的量子科技成为新一轮产业革命和科技战略点。

然而，作为近代物理学的基础的量子力学在理论和应用上虽然取得了巨大突破，相关的实验教学却并不容易。这主要有以下几个原因：(1)量子物理实验一般在超净实验室中运行，对实验空间环境要求严格，如温度、湿度、空气粉尘颗粒；(2)量子物理实验采用的大型激光器等设备价格昂贵，且专项技能培训周期长；(3)大功率激光具有极强的破坏性，具有激光辐射危险性；(4)实验环境温度低于宇宙空间温度，现实不可及。

而在本实验中，通过虚拟技术，可以不受现实条件的约束，集中再现多个物理过程；也能较好地实现量子力学实验的相关结果。

本实验主要预期达到三个目标：1. 掌握迈克尔逊干涉仪的光路搭建、调整和使用方法；2. 掌握卡诺制冷循环和激光制冷的工作原理；3. 掌握量子振荡跃迁的原理和分析方法。

二、实验原理

本实验的原理主要包含三个部分：迈克尔逊干涉原理、多普勒激光制冷原理和量子振荡跃迁原理。

1. 迈克尔逊干涉原理

一束激光通过如图 1 所示的迈克尔孙干涉仪后会产生两束全同激光，之后在空间中发生干涉，在光屏上呈现出明暗相间的同心圆环。根据光路的原理，激光的波长为

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{N}$$

式中， λ 为激光波长， Δd 为光程差， N 为增加或消失的圆环数。

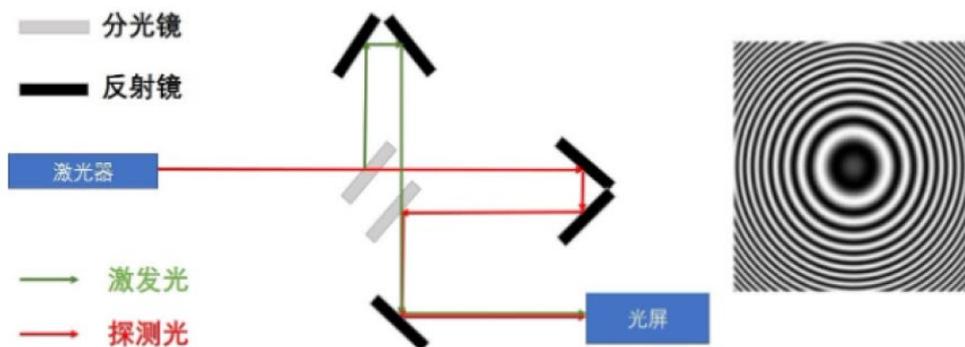


图 1：迈克尔逊干涉条纹原理示意图和干涉条纹

2. 多普勒激光制冷原理

多普勒激光制冷利用了光束的多普勒频移效应，当原子运动方向与光束同向时，原子感受到的光频率小于真实光频率；当原子运动方向与光束相反时，原子感受到的光频率大于真实光频率。若原子处在与其运动方向相反的光束中，则原子将从与原子运动方向相反的光束中吸收光子，获得与运动方向相反的净动量，且被激发至激发态。原子吸收光子后将通过自发辐射过程回到基态，而由于自发辐射过程是各向同性的，统计平均后，辐射过程传递给原子的净动量为零。最终原子获得了与运动方向相反的动量，即原子被冷却。理论估算表明多普勒冷却的极限温度是：

$$T_{min} = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

式中， \hbar 为约化普朗克常数， Γ 为激发态的自发辐射速率， k_B 为玻尔兹曼常数。

3. 量子振荡跃迁原理

利用激光冷却技术将宏观数量的原子俘获在基态的能级上，然后通过光子激发，将原子

从基态激发到较高能量的量子态。第一组光子将原子从基态部分激发到激发态得到叠加量子态，电子在基态和激发态之间进行周期性快速迁移，周期为 T 。利用第二组完全相同的激光将激发态原子退激发到初始态基态，将这两组激光之间的时间延迟 τ 稳定在 \AA s 时间尺度上，其中激发态 P_e 和基态 P_g 的几率分布满足：

$$P_e = f(T, \tau) = A \cos(2\pi\tau / T + \pi/2)$$

$$P_g = 1 - f(T, \tau) = 1 - A \cos(2\pi\tau / T + \pi/2)$$

通过时间延迟调节技术调节 τ 可以观测多体系统中的相干动力学随时间的演化。量子振荡跃迁的实验装置如图 2。

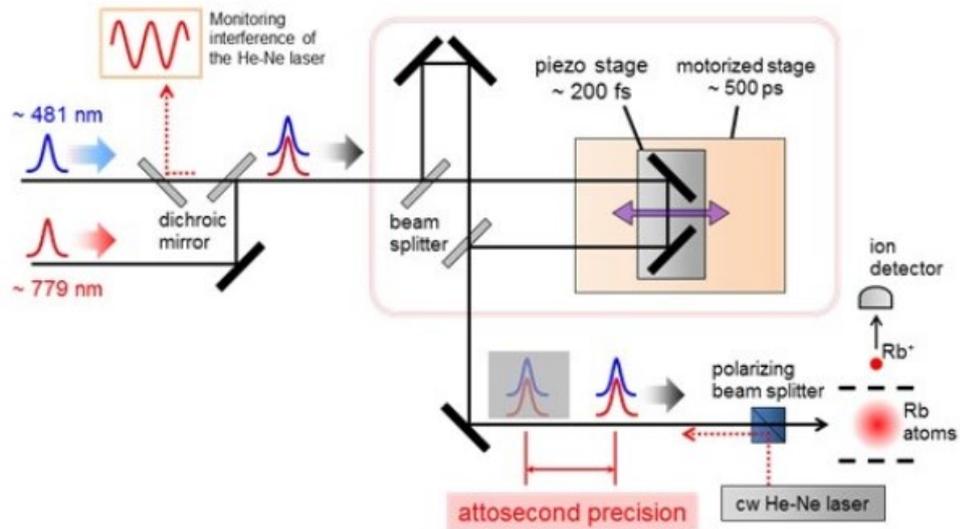


图 2：量子振荡跃迁实验图

三、实验仪器

He-Ne 激光器 (632.8nm)，2 块分光镜，5 块反射镜，外加压缩机的冷原子激发装置，示波器。

四、实验过程

1. 实验前准备

本实验需要在超净空间中进行。实验前需穿着好实验服，佩戴目镜，并经过风淋除尘，然后进入实验室。

2. 搭建迈克尔逊干涉光路

迈克尔逊光路中首先通过一块分光仪将入射的 He-Ne 激光分为彼此垂直的两束，再分别反射后重新叠加，得到相干光。此时，再利用一块反射镜，将得到的相干光引导至冷原子激发装置中。

实验中调节得到光路如图 3。

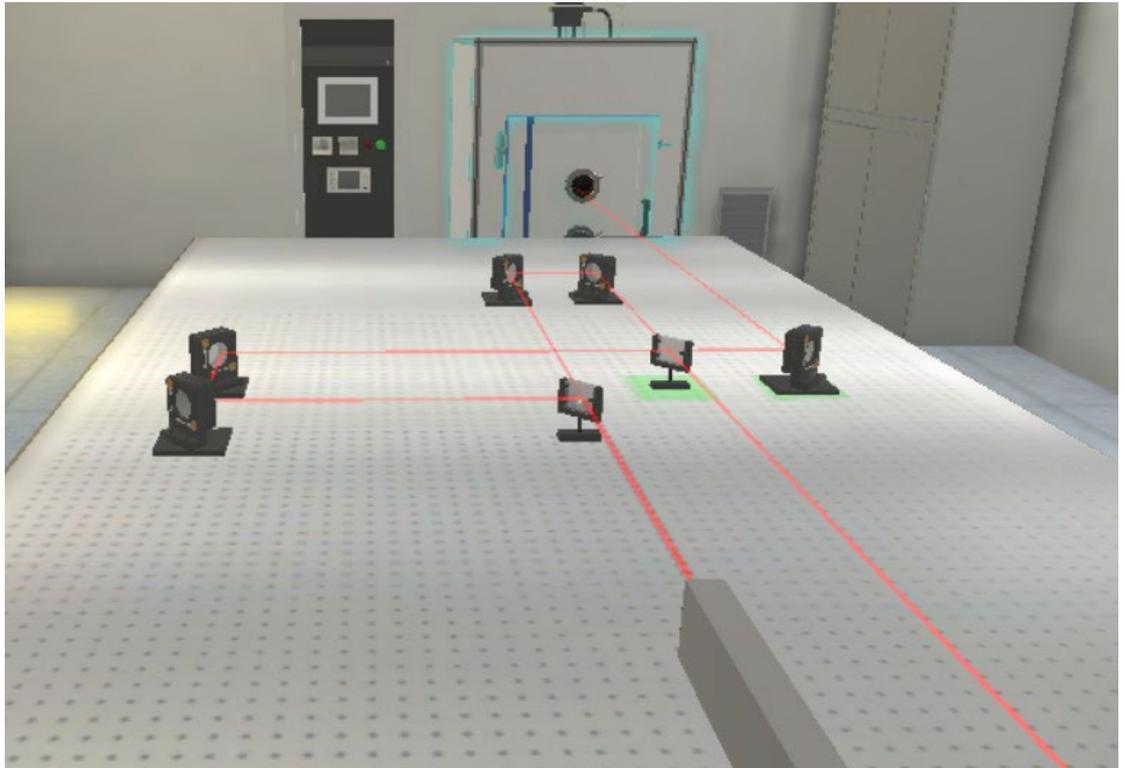


图 3：迈克尔逊干涉光路

3. 原子的冷却

实验过程中，利用两种方式将原子从 300K 冷却至 0.1K：首先通过卡诺制冷机将原子冷却至 243K；之后，通过 x、y、z 三个方向激光制冷，将原子冷却至 0.1K。

4. 观察量子振荡跃迁

观察示波器上由量子振荡跃迁产生的波形图。改变光程差，观察波形变化，用正弦函数拟合得到振荡跃迁周期。

五、现象分析和数据处理

1. 不同温度下的原子热运动

实验中可以观察到不同温度下原子的热运动情况。在 300K 时，原子在空间各方向快速运动；而当通过卡诺循环，使温度降低至 243K 后，可以观察到源自运动速率明显变

慢。之后依次打开 x、y、z 三个方向激光制冷，可以看到原子在对应方向运动也逐渐停止。当 x、y 方向激光冷却启动后，原子只剩下 z 方向的运动；而当三个方向激光制冷均启动后，原子几乎不再运动，处在基态上。

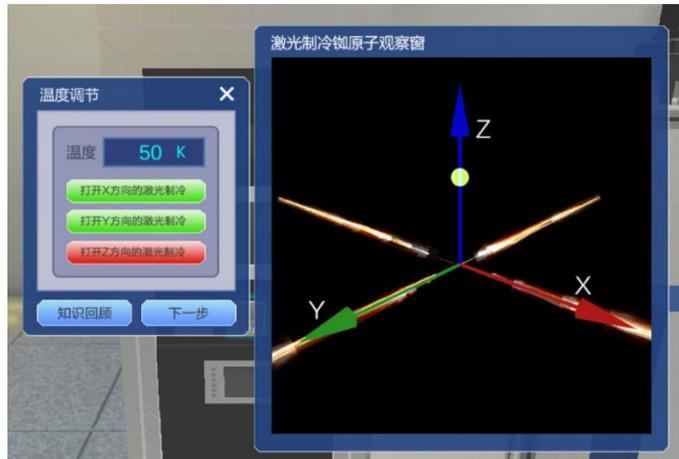


图 4：x、y 方向激光冷却启动后原子的运动情况

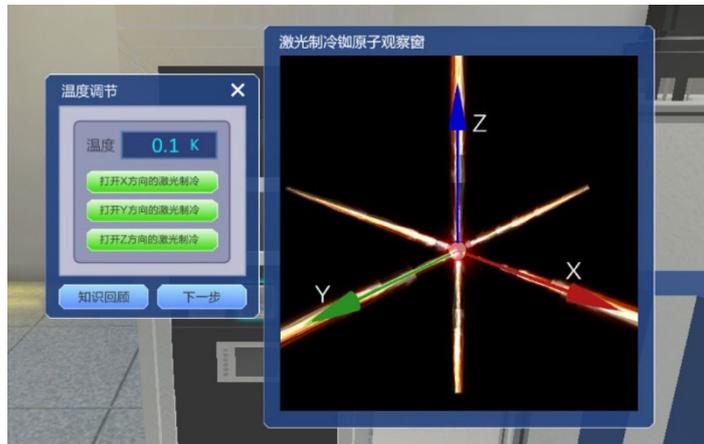


图 5：x、y、z 方向激光冷却启动后原子的运动情况

2. 不同光程差下的量子振荡跃迁

实验中，当原子被冷却至 0.1K 后，通过调节光程差至合适范围，可以观察到量子振荡跃迁形成的波形图。

实验中光程差的可调范围为 $0.617\mu\text{m}$ 至 $0.017\mu\text{m}$ ，最小步幅为 $0.0125\mu\text{m}$ 。

当光程差在 $0.617\mu\text{m}$ 到 $0.3795\mu\text{m}$ 及 $0.242\mu\text{m}$ 到 $0.017\mu\text{m}$ 时，量子振荡曲线表现为纯噪声。当光程差在 $0.242\mu\text{m}$ 至 $0.3795\mu\text{m}$ 时，可以观察到较为良好的振荡曲线。

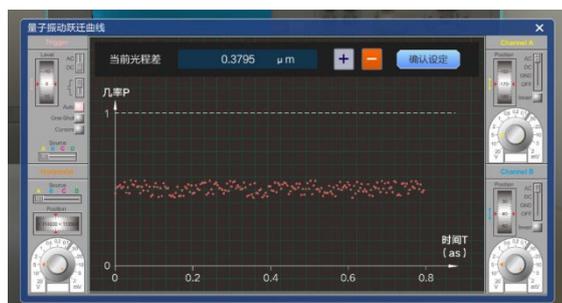


图 6(a)： $0.3795\mu\text{m}$ 时的波形图

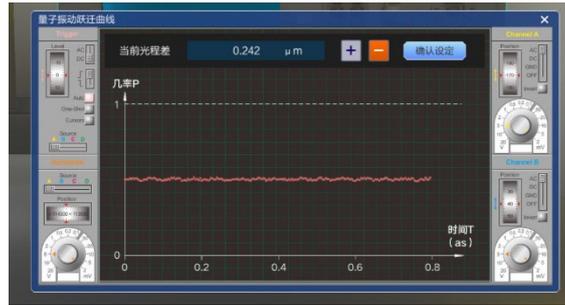


图 6(b)： 0.242 μm 时的波形图

当光程差在 0.242 μm 至 0.3795 μm 时，观察不同光程差下的振荡波形图，当光程差等于 0.317 μm 时，正弦波的振幅最大约为 1。且不同光程差下振荡波形图的周期相同，无关，约为 0.23Ås

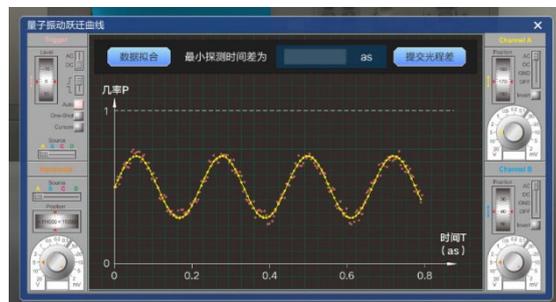


图 7(a)： 0.3545 μm 时的波形图与拟合曲线

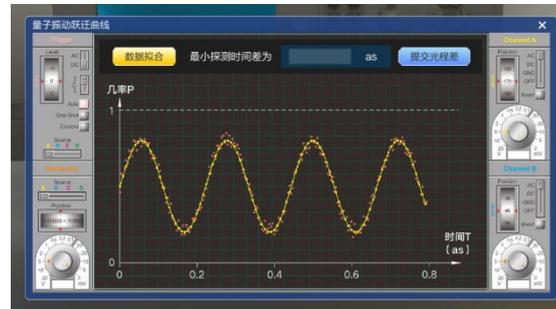


图 7(a)： 0.3420 μm 时的波形图与拟合曲线

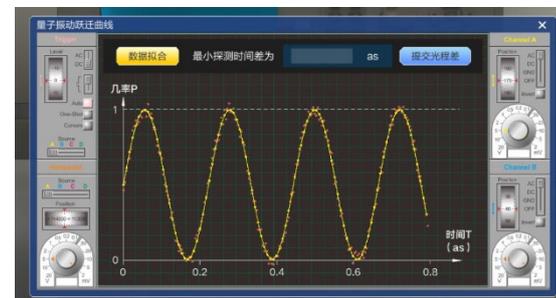


图 7(a)： 0.3170 μm 时的波形图与拟合曲线

六、结论

实验中利用 He-Ne 激光器 (632.8nm) 和迈克尔孙干涉光路，制备了相干光来冷却原子，

并作为基态原子的激发光源；利用卡诺循环制冷及激光制冷将铷原子制冷到 0.1K，使其处在基态上；最后用得到的相干光源激发原子，使其在基态和激发态之间振荡跃迁，读取量子跃迁信号并用正弦函数拟合，得到其周期约为 0.23Ås。

实验二 快速电子的动量与动能的相对论关系

黄荣郅 19307110346

一、实验目的

经典力学总结了低速物体的运动规律，它反映了牛顿的绝对时空观：认为时间和空间是两个独立的观念，彼此之间没有联系；同一物体在不同惯性参照系中观察到的运动学量(如坐标、速度)可通过伽利略变换而互相联系。这就是力学相对性原理：一切力学规律在伽利略变换下是不变的。

但在 19 世纪末至 20 世纪初，人们试图将伽利略变换和力学相对性原理推广到电磁学和光学时遇到了困难；实验证明对高速运动的物体伽利略变换是不正确的，而迈克尔逊-莫雷实验则否定了以太假说的可能，证明了在所有惯性参考系下真空光速均相等，为一与参考系下无关的常数。在此基础上，1905 年，爱因斯坦提出了狭义相对论，建立起相对论下的时空观。

实验上主要通过测定高速运动物体的动量-动能关系来验证狭义相对论。本实验中通过虚拟技术，结合磁谱仪即能够较好地测定高速运动物体的动量及能量，从而观察此时的粒子运动是否需要考虑相对论修正，

二、实验原理

本实验的原理主要包含三个部分：狭义相对论、磁谱仪。

1. 狭义相对论

由狭义相对论可知，物体运动应满足洛伦兹变换。静止质量为 m_0 ，速度为 v 的物体，狭义相对论定义的动量 p 为：

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}v = mv$$

式中， $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ， $\beta = v/c$ 。狭义相对论的能量 E 为：

$$E = mc^2$$

此即著名的质能关系。 mc^2 是运动物体的总能量，当物体静止时 $v = 0$ ，物体的静止能量为 m_0c^2 。总能量与静止能量之差即为动能：

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

由上还可得到：

$$E^2 - p^2 c^2 = E_0^2$$

$$E_k = E - E_0 = \sqrt{p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2} - m_0 c^2$$

此即相对论下的动能-动量关系。此时动能不再正比于动量的平方，这是相对论与经典力学的显著区别。

2. 磁谱仪

实验中利用磁谱仪完成对粒子动量的测量。 β 源射出的高速 β 粒子经准直后垂直射入一均匀磁场中，粒子因受到与运动方向垂直的洛伦兹力的作用而作圆周运动。如果不考虑其在空气中的能量损失(一般情况下为小量)，则粒子具有恒定的动量数值而仅仅是方向不断变化。粒子作圆周运动的方程为：

$$\frac{dp}{dt} = -evB$$

式中， e 为元电荷， v 为粒子速度， B 为磁感应强度。对于某一确定的动量值，其速率为常数，故质量为定值。由牛顿运动方程：

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = m \frac{v^2}{R}$$

$$p = eBR$$

式中， R 为粒子轨道的半径，即源与探测器间距的一半。

由于 β 源($0 \sim 2.27\text{MeV}$)射出的 β 粒子具有连续的能量分布($0 \sim 2.27\text{MeV}$)，因此探测器在不同位置(不同 ΔX)就可测得一系列不同的能量与对应的动量值。这样就可以用实验方法确定测量范围内动能与动量的对应关系，进而验证相对论给出的这一关系的理论公式的正确性。

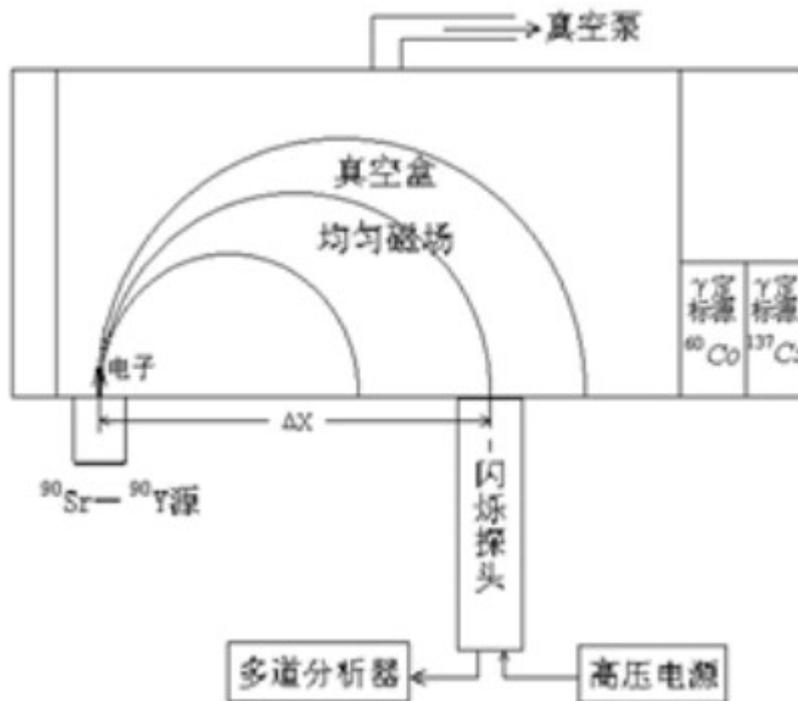


图 1：磁谱仪

三、实验仪器

①真空、非真空半圆聚焦 b 磁谱仪；②b 放射源⁹⁰Sr(强度≈1 毫居里)，定标用 γ 放射源¹³⁷Cs和⁶⁰Co (强度≈2 微居里)；③200mmAl 窗 NaI(Tl) 闪烁探头；④数据处理计算机软件；⑤高压电源、放大器、多道脉冲幅度分析器。

四、实验过程

1. 放射定标

从电离隔离箱中取出⁶⁰Co至桌面上, 打开半圆磁谱仪, 将⁶⁰Co放射源放入磁谱仪中, 并将闪烁探测器中心对准⁶⁰Co放射源。

设置半圆磁谱仪高压源。根据提示, 将其设置为 830V。磁场为 610.35Gs。

使用多道分析软件分析能谱结果, 记录其在 1.17Mev、1.33Mev 时对应的道数。

关闭磁谱仪, 将放射源更换为¹³⁷Cs, 打开磁谱仪, 分析能谱结果。记录其在 0.66Mev 时对应的道数。

2. 测量⁹⁰Sr放射能谱

关闭磁谱仪, 将放射源更换为⁹⁰Sr。此时⁹⁰Sr被固定在 11.00cm 处。在 23.00-38.00cm 范围内改变闪烁探头的位置, 记录不同位置处出射的电子能谱。得到 6 组数据。

3. 验证相对论关系

利用 1 中所得数据, 拟合得到道数与粒子动能的关系; 结合 2 中数据, 即可得到 6 组动能-动量关系。分别用经典曲线和相对论曲线拟合, 观察结果。

五、数据处理

1. 定标分析

实验中测得⁶⁰Co在 1.17Mev、1.33Mev 时对应的道数分别为 527、591; 测得¹³⁷Cs在 0.66Mev 时对应的道数为 295。

将以上数据带入实验自带的数据分析软件, 进行线性拟合, 得到:

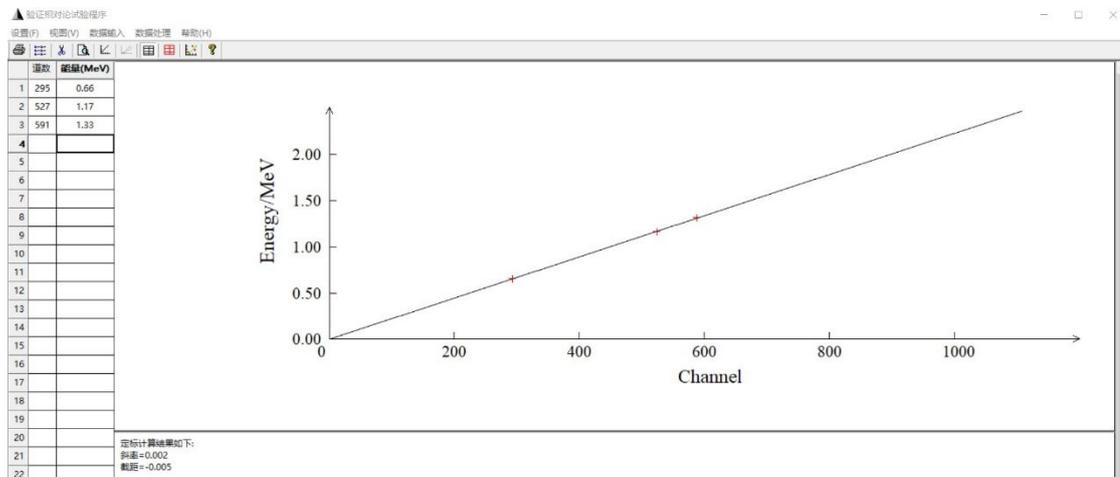


图 2: 定标数据拟合结果

拟合结果给出:

$$k = 0.002 \text{ Mev/道数}, b = -0.005 \text{ Mev}$$

由此得到动能与道数的关系：

$$E_k = 0.002 \times \text{道数} - 0.005 \text{ Mev}$$

2. 验证相对论关系

实验中测量⁹⁰Sr放射能谱，结果如下表：

序号	1	2	3	4	5	6
位置 X/cm	23.00	24.00	26.90	32.20	34.30	37.80
半径 R/cm	6.00	6.50	7.95	10.60	11.65	13.40
全能峰峰位 N	229	262	360	537	611	734
PC(Mev)	1.0986	1.1902	1.4557	1.9409	2.1332	2.4536
Ek(Mev)	0.453	0.519	0.715	1.069	1.217	1.463

表 1：⁹⁰Sr放射能谱

表中第五行根据原理中 $p = eBR$ 代入计算得到。光速C取 3×10^8 m/s；第六行则根据上一部分得到的动能-道数关系计算得到。

由于实验自带的拟合软件无法使用，将以上数据代入Origin中，分别用相对论关系及经典关系进行拟合：

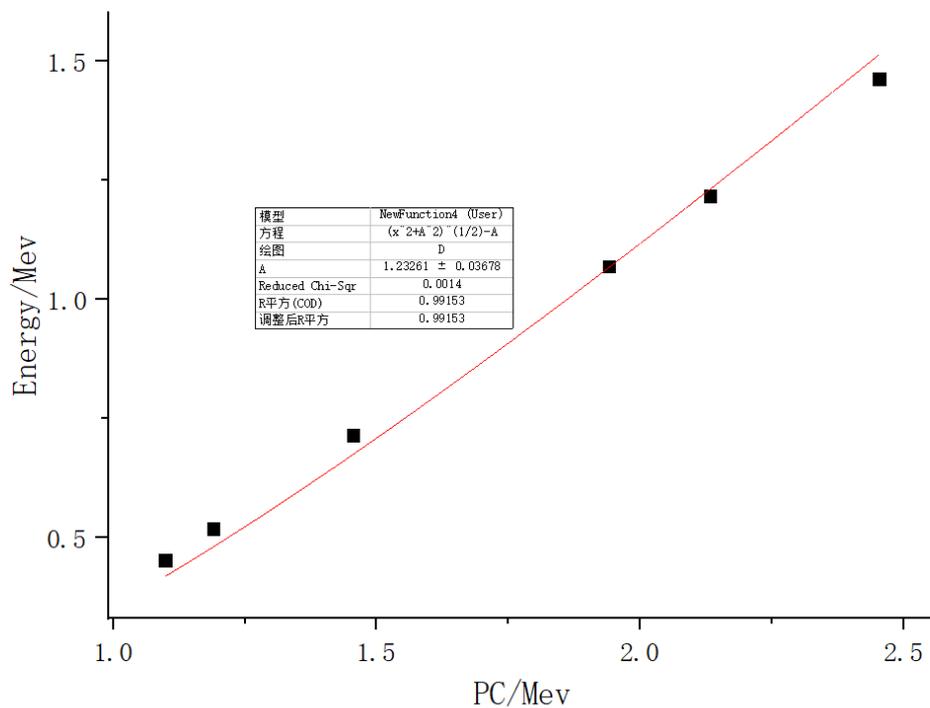


图 3(a)： 相对论关系拟合结果

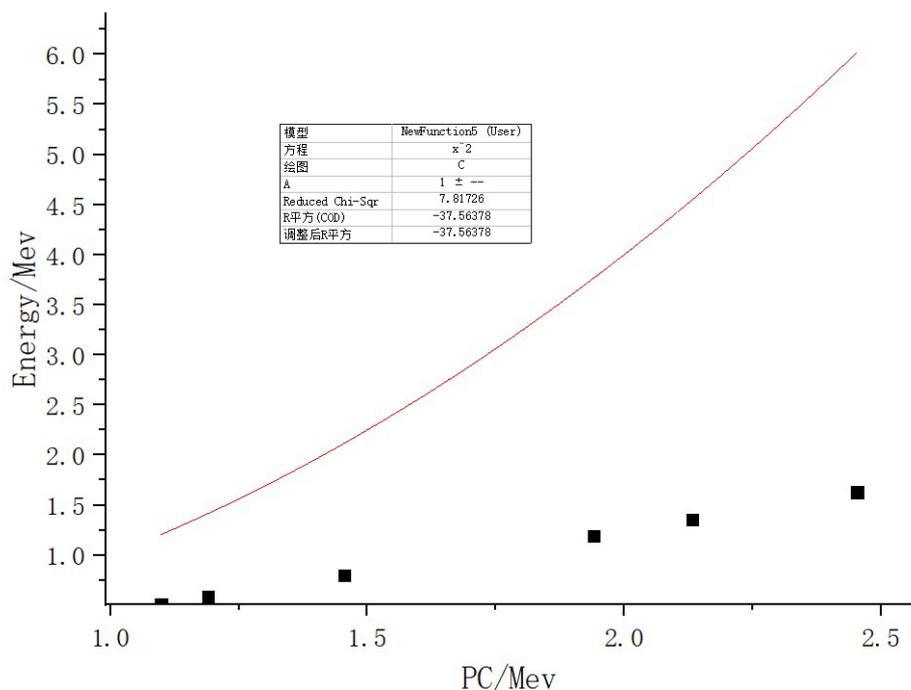


图 3(b): 经典关系拟合结果

显然，相对论关系拟合结果要明显优于经典关系。证明在实验条件下，由⁹⁰Sr放射产生的β粒子已经不再满足经典力学的表述，而需要用相对论力学进行修正；拟合结果和实验结果的良好符合，证明了相对论关系成立。

六、结论

实验中利用⁶⁰Co、¹³⁷Cs、⁹⁰Sr三种放射源和磁谱仪完成了相对论关系的验证。首先利用⁶⁰Co、¹³⁷Cs完成对磁谱仪的定标，从而得到了β粒子动能和道数的关系；继而利用⁹⁰Sr的能谱结果，完成了对相对论关系的验证。实验证明，在实验条件下，由⁹⁰Sr放射产生的β粒子已经不再满足经典力学的表述，而需要用相对论力学进行修正

当然，实验在设计上也还存在着一些缺陷和不合理之处。例如在对磁谱仪定标时，数据量明显偏少，此时利用线性拟合来处理数据明显不合理；在测定⁹⁰Sr的能谱结果时，可调位置实际有限；实验自带的拟合功能还不够完善等。