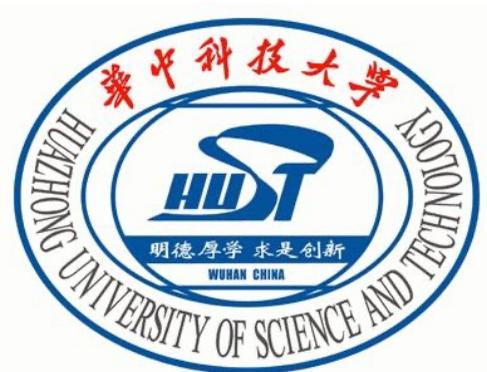




Production and detection of axions by interferometry

欧阳泽

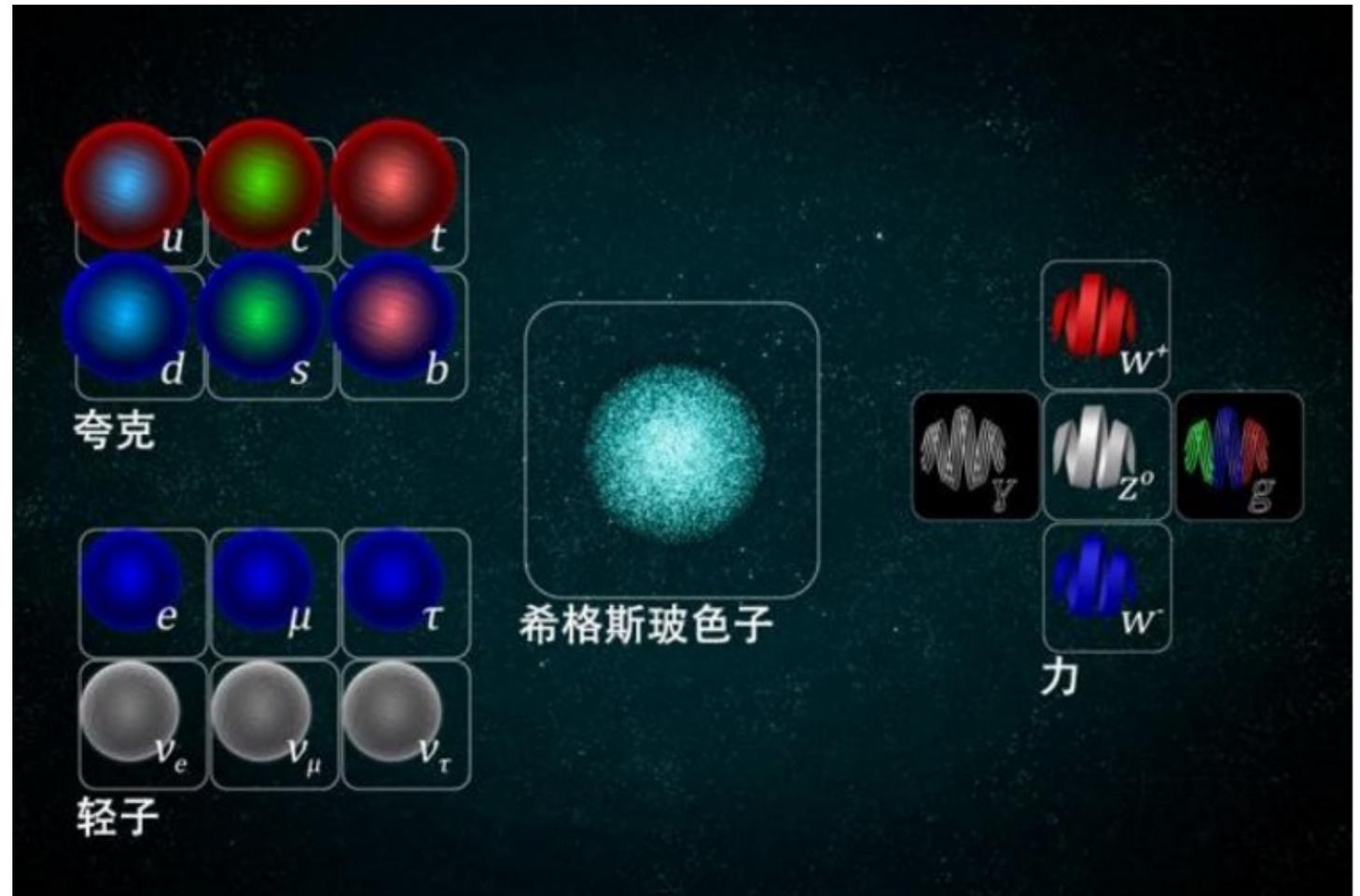
2020.3.29



·理论背景

·实验原理

·实验设计



Primakoff effect: 光子在外加磁场中可以转化成轴子（偏振方向平行于磁场）或类轴子粒子（ALPs，偏振方向垂直于磁场）。

1. 磁星，一类具有极强磁场的中子星。它可以高效地转化光子为轴子，这将体现在磁星的辐射上。另外如核坍缩超新星，它爆发时短时间产生海量的光子也将产生高通量的轴子。
2. 恒星内部进行核聚变反应，释放高能光子，这些光子有一定概率转化为轴子。由于轴子与物质的相互作用很弱，恒星对轴子近似透明的，轴子容易逃逸出来。如果以星震学和太阳中微子流量、能谱精确测定太阳的成分、结构和核反应，就可以给出太阳轴子的流量、能谱；再与从太阳的电磁辐射得到的结果比较，也能对轴子理论有一定的限制。

发生转化后，由于新产生的粒子携带了能量，光波的振幅会减小；此外，如果新产生的粒子有质量，原光波会产生相移。

实验原理



当光子的偏振方向与外加磁场的方向相同时，光子转换成轴子的转换系数（概率）为

$$\eta_{\gamma \rightarrow a} = \frac{1}{4v_a} (g_{a\gamma\gamma} BL)^2 \left(\frac{2}{qL} \sin \left(\frac{qL}{2} \right) \right)^2$$

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{g_\gamma \alpha}{f_a \pi}, \quad m_a = \frac{z^{1/2}}{1+z} \frac{f_\pi m_\pi}{f_a}. \quad \leftarrow \text{表征轴子的两个重要参数, } f_a \text{ 在 } 10^9 \sim 10^{12} \text{ GeV}$$

v_a 是轴子的速度， B 是外加磁场的强度， L 是外加磁场的长度， q 是动量传递（ $q = m_a^2 / 2\omega_\gamma$ ）
真空中 $\omega_\gamma = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$

当 $L \sim 10 \text{ m}$ ， $m_a \sim 10^{-5} \text{ eV}$ 时，得到 $\eta_{\gamma \rightarrow a} \approx \frac{1}{4} (g_{a\gamma\gamma} BL)^2$.

取 $B \sim 10 \text{ T}$ ，则转换系数的数量级为 10^{-26}

振幅减为 $A - \delta A$

$$\text{式中 } \delta A_{\gamma \rightarrow a} = \frac{A \eta_{\gamma \rightarrow a}}{2} \approx \frac{g_{a\gamma\gamma}^2 B^2 L^2 A}{8}.$$

该近似只在 $m_a \ll m_0 \equiv \sqrt{2\pi\omega_\gamma/L}$ 时成立。当 $m_a \gg m_0$ 时，减小的振幅由 $g_{a\gamma\gamma}^2 B^2 L^2 A (m_0/m_a)^4$ 给出

m_a 在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{eV}$ ， m_0 在 10^{-4}eV 左右

1.介质的选择：使得光子频率较大，从而 m_0 较大

2.磁场的参数：L过大会使得 m_0 减小，L过小则振幅变化也会减小，从而更加不容易探测到信号

实验原理



磁场关闭时，激光束的色散关系为 $\omega^2 = k^2$

磁场打开时，部分光子转换成轴子，色散关系变为

$$\omega^2 = k^2 + \frac{1}{2} \left(m_a^2 + \boxed{g_{a\gamma\gamma}^2 B^2} \pm \sqrt{(m_a^2 + g_{a\gamma\gamma}^2 B^2)^2 + 4g_{a\gamma\gamma}^2 k^2 B^2} \right)$$

取 $B=10\text{T}$, $g_{a\gamma\gamma} \approx 10^{-12}\text{GeV}^{-1}$.

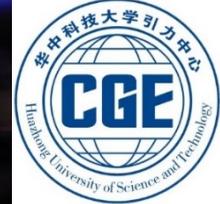
小量

由 $v = \frac{d\omega}{dk}$ 相位滞后量为 $\delta\theta = \left(\frac{L}{v_1} - \frac{L}{v_2} \right) \cdot \frac{v_1}{\lambda_1}$

当两束光线传播距离 L 时，相对于没有发生转换的激光束而言，产生了转换的激光束的相位滞后量为

$$\delta\theta \approx \frac{g_{a\gamma\gamma}^2 B^2 \omega_\gamma^2}{m_a^4} \left(\frac{m_a^2 L}{2\omega_\gamma} - \sin\left(\frac{m_a^2 L}{2\omega_\gamma}\right) \right)$$

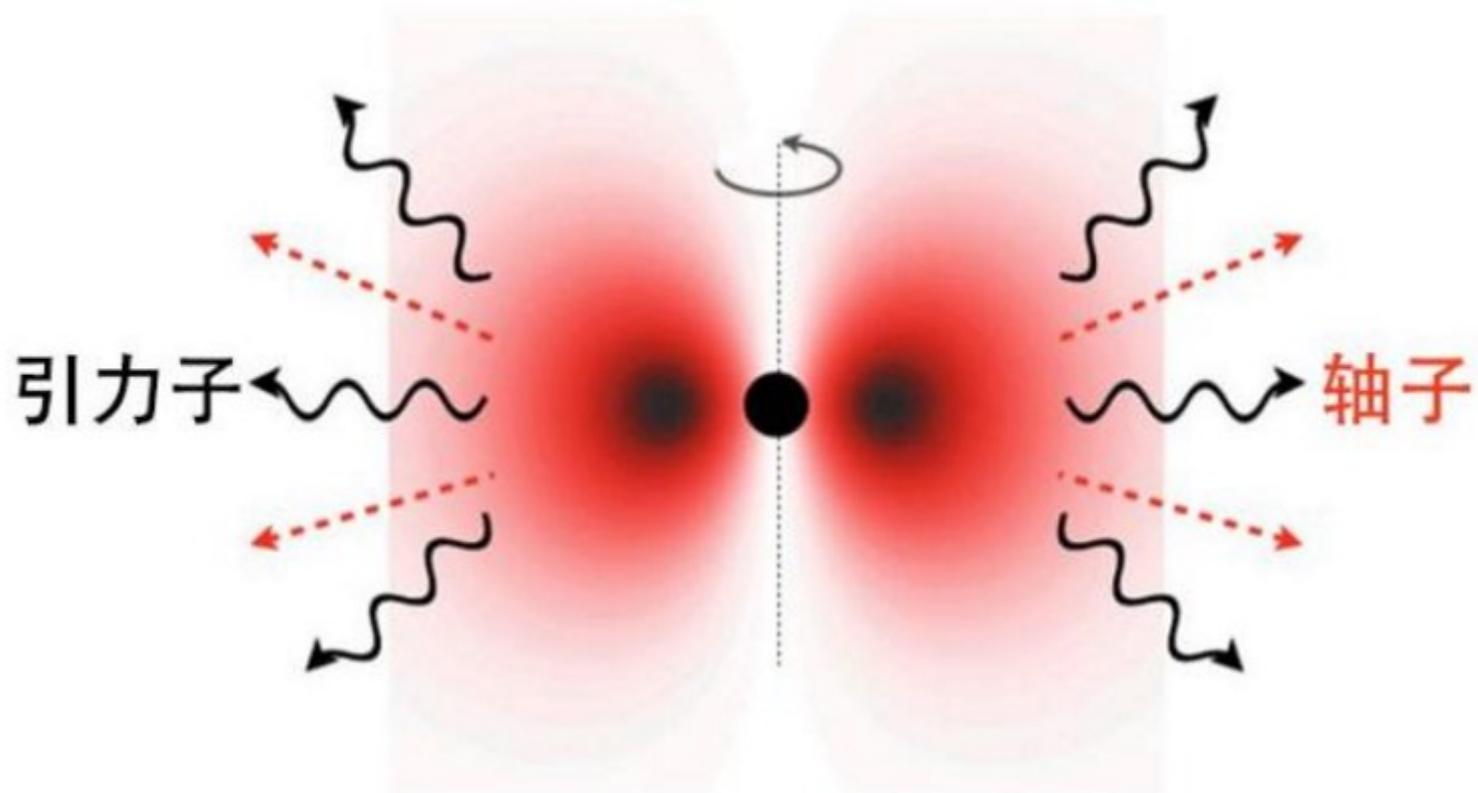
实验原理



与振幅减少量相比，相位滞后量几乎可以忽略

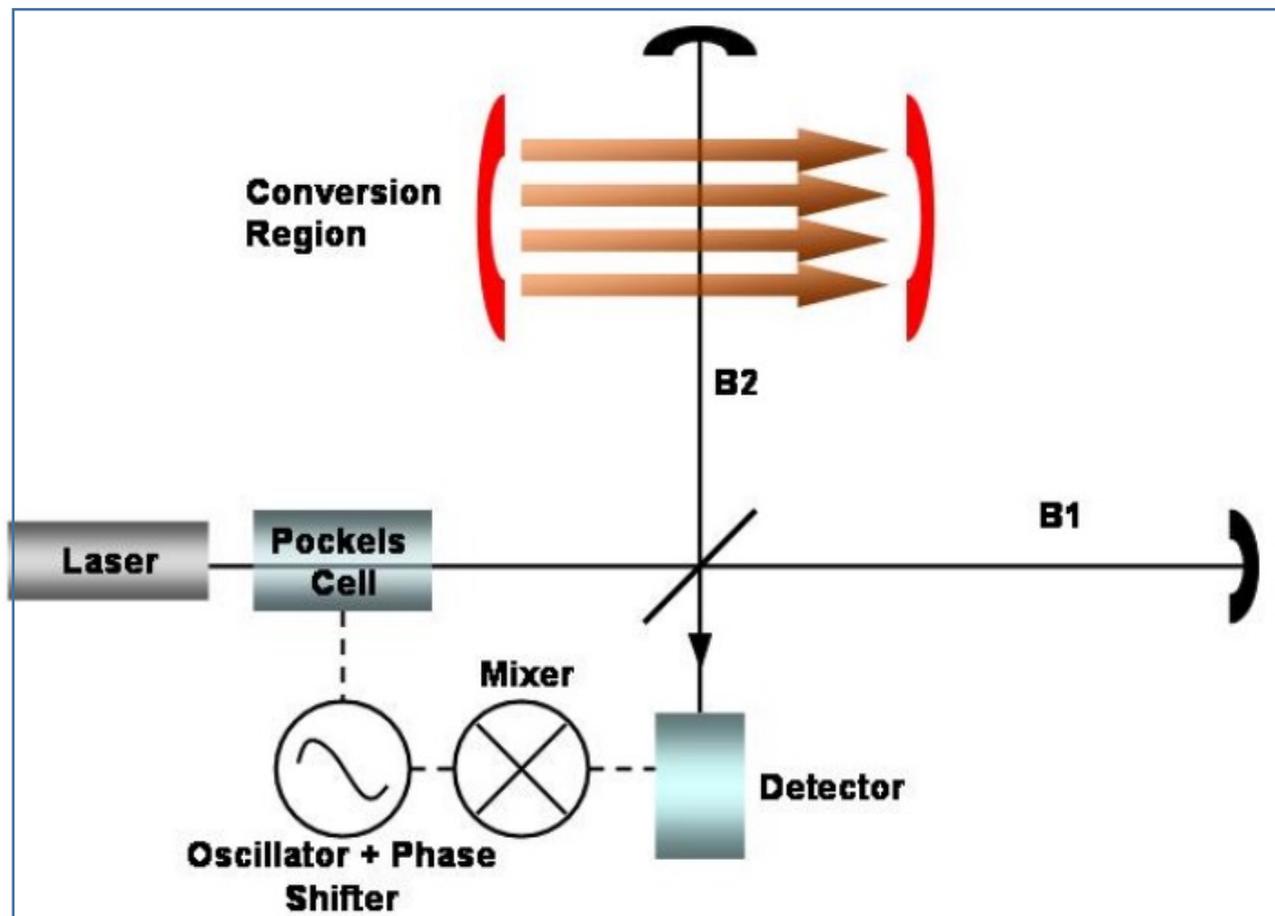
同时，光子不仅会转换成轴子，还会产生引力子、类轴子粒子（ALPs）等。

但在本实验给定的条件下，它们的数量相比轴子很少



实验设计

1. 激光束经过普克尔盒的调制射出
2. 激光束被分光镜分成两束强度相等、相互垂直的光束B1和B2
3. 调整B1和B2的光程，使得在没有磁场时，二者相位相差 π
4. B2光束经过磁场时产生Primakoff效应，少量光子会转换成轴子
5. 光束B1与发生了Primakoff效应的B2在探测器处汇合并产生干涉
6. 将探测到的信号与驱动普克尔盒的电信号放到一起分析



普克尔盒特性

- 3种波长范围可供选择：
 - 425 - 700 nm
 - 700 - 1000 nm
 - 1064 nm
- 纵向普克尔盒
- 楔形窗片可偏移 0° 入射光并降低背向反射

Thorlabs的普克尔盒通过调节电压快速精密地控制输出光的偏振方向。它们相当于电压控制的波片。铌酸二氢钾(KD*P)晶体，并在纵向施加电场。纵向驱动电压与孔径大小无关，因此能够使用比横向普克尔盒的响应要远快于标准声光或液晶器件，所以非常适合用于Q开关激光器。我们的普克尔盒使移 0° 入射光入并减小背向反射。窗片镀有用于425到700 nm、700到1000 nm或1064 nm的增透膜。

普克尔盒是一种电光器件，和电光调制器非常相似，包含一个透光的电光晶体。通过在电光晶体上施加电压。这可以使用普克尔效应来解释：在晶体上施加恒定或变化的电压(电场)能够使晶体双折射发生。这可以解释为普克尔效应，不过后者与 E^2 成正比。施加恒定电压的普克尔盒相当于一个电压控制的波片，普克尔盒能够改变晶体的相位延迟量。普克尔盒是各种光学器件的基本组件，比如激光器Q开关。

我们建议驱动电压不要超过6 kV，因为电压过大会损伤晶体。这些K*DP晶体普克尔盒建议的最大调制频率不要超过5 kHz，除非您的应用能接受这种振荡影响。对于一般用途，建议使用最高5 kHz调制。这些普克尔盒有两个用于1 mm引脚的电插口，以此实现电连接。请注意，Thorlabs目前不提供普克尔盒的驱动电路。



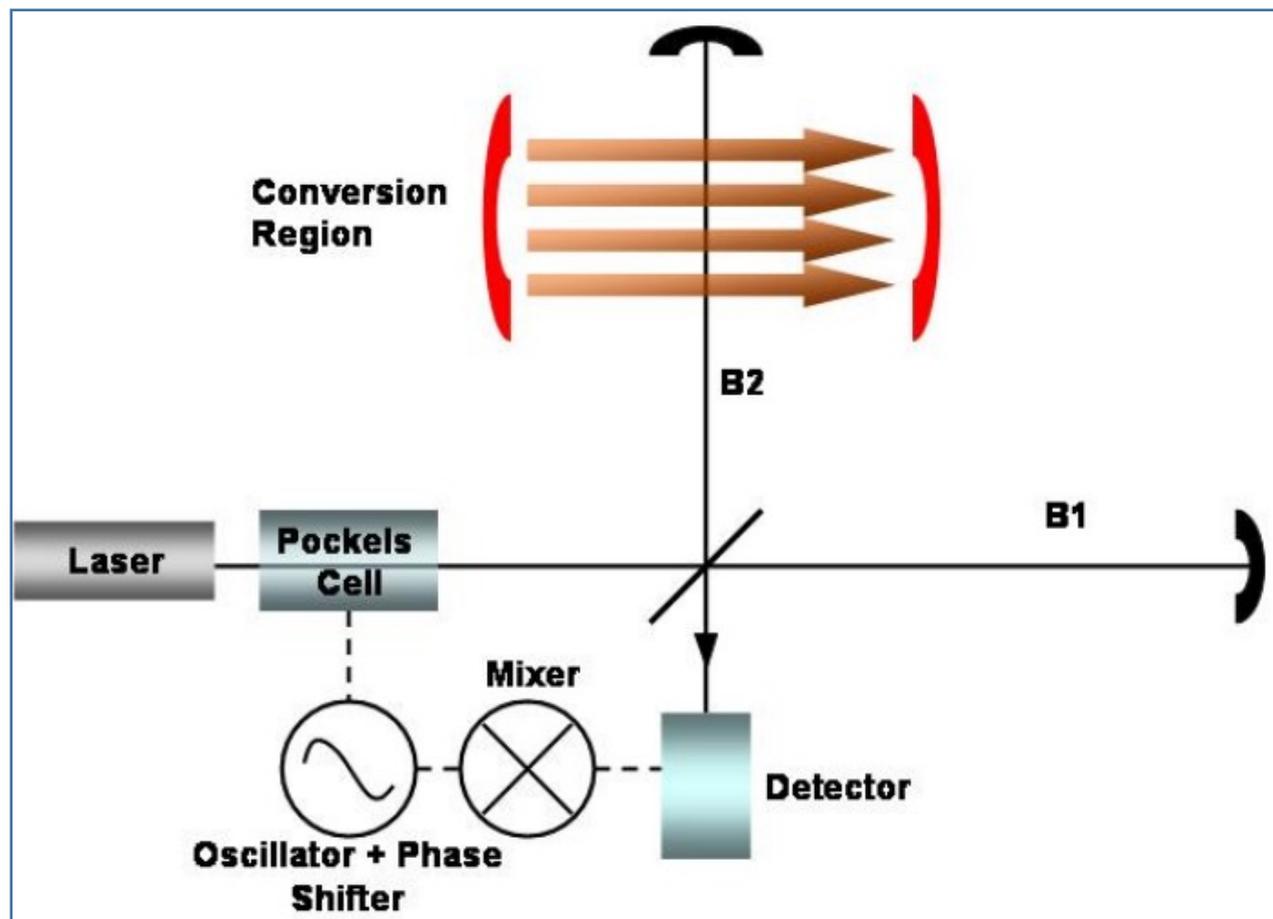
操作注意事项:

Thorlabs的普克尔盒在任何情况下都不应该拆卸。这些器件的唯一认可的清洁方法是使用干燥的氮气吹掉外部灰尘。如果您觉得盒已损坏或污染，请联系[技术支持](#)。

经普克尔盒调制后的光波：
$$\vec{E}_{in} = \vec{E}_0(1 + \beta \sin \omega_m t)e^{i\omega t}$$

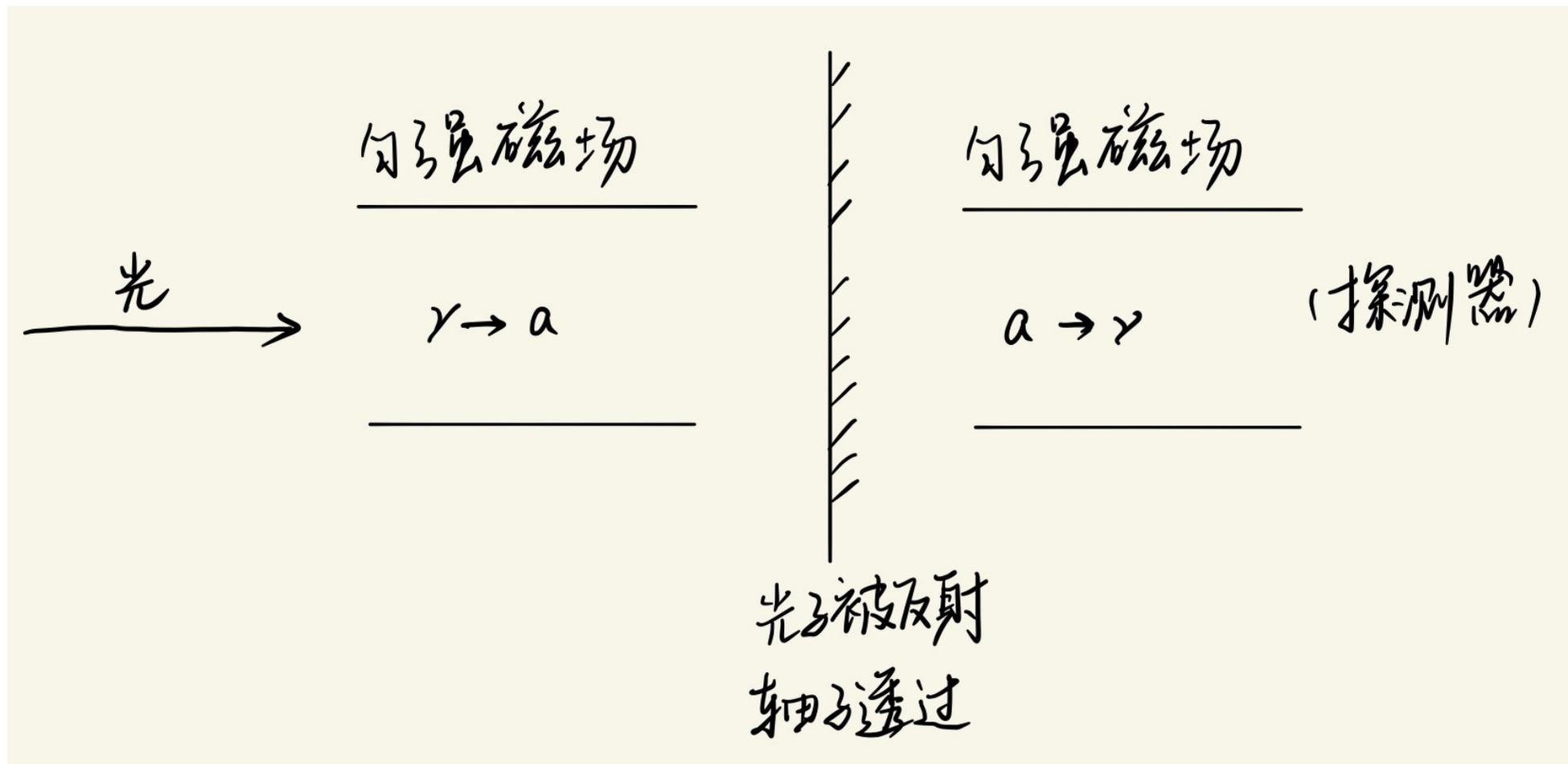
实验设计

1. 激光束经过普克尔盒的调制射出
2. 激光束被分光镜分成两束强度相等、相互垂直的光束B1和B2
3. 调整B1和B2的光程，使得在没有磁场时，二者相位相差 π
4. B2光束经过磁场时产生Primakoff效应，少量光子会转换成轴子
5. 光束B1与发生了Primakoff效应的B2在探测器处汇合并产生干涉
6. 将探测到的信号与驱动普克尔盒的电信号放到一起分析



实验设计

Light shining through a wall





谢谢!

