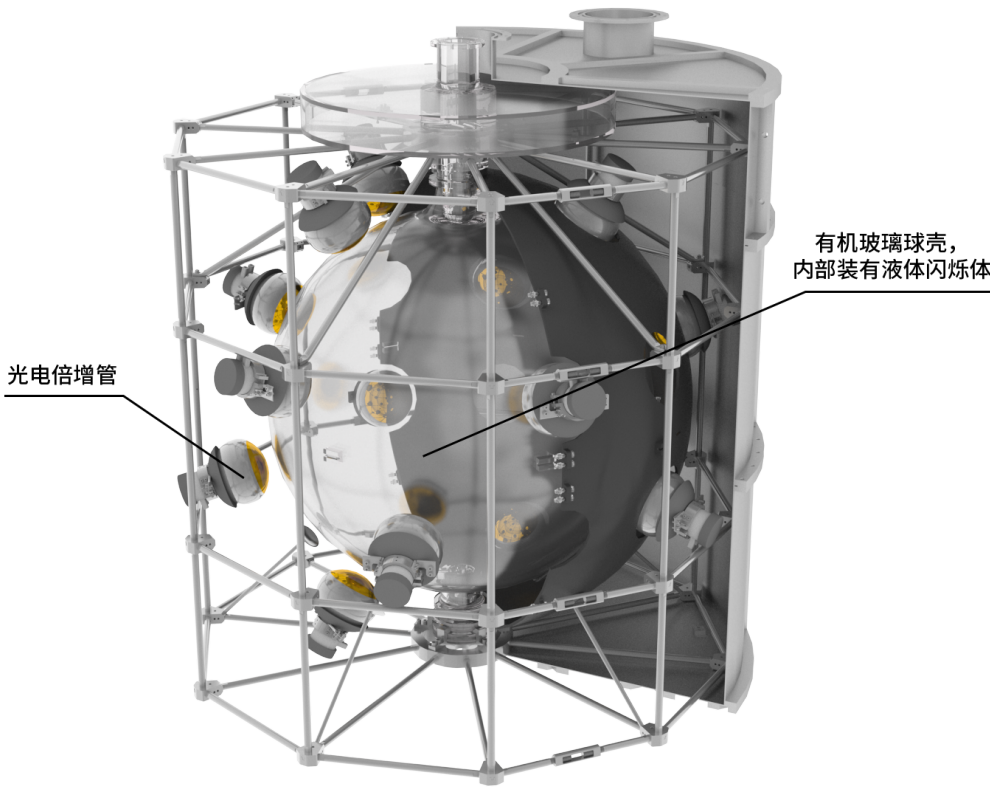


物理背景知识

锦屏中微子实验

中国锦屏地下实验室（China Jinping Underground Laboratory, CJPL）位于四川省雅砻江锦屏山的深处，是中国首个用于开展暗物质探测等国际前沿基础研究课题的极深地下实验室，于2010年12月12日正式投入使用。目前，[CDEX](#)、[PandaX](#)等暗物质实验在这里进行，这些实验的研究水平已达到国际第一阵营。不仅仅是暗物质实验，未来的[锦屏中微子实验](#)也会在中国锦屏地下实验室开展，在太阳中微子、地球中微子、超新星遗迹中微子等学科前沿方面进行研究。

为了研究锦屏中微子实验所用到的液体闪烁体和低本底技术，我们在锦屏地下实验室中建造了一个小型原型机。其核心部件包括1吨液体闪烁体和30个光电倍增管（PMT）。高速运动的微观粒子在液体闪烁体中沉积能量，闪烁体会发出荧光，光电倍增管会将这些光信号转化为电信号输出。通过分析这30个光电倍增管上的电压波形，我们就可以得到原初粒子的能量、位置等信息，进而进行相关的物理分析。



锦屏中微子实验一吨原型机结构示意图

探测器每次运行被称为一个run，每个run中都包含了很多个触发事例（event）。我们记录下来的主要信息就是每个事例的触发时间戳，以及30个PMT（编号从通道0到通道29）上的波形。

电离

闪烁体需要发光，首先要吸收能量，能量主要来源于粒子的电离过程。电离过程是带电粒子损失能量的重要方式，可以用Bethe公式描述

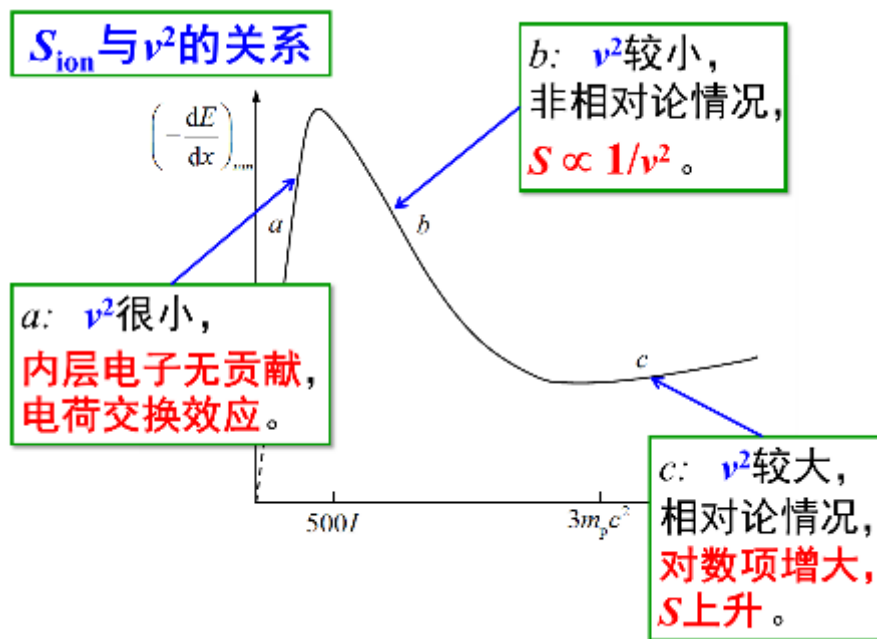
$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi e^4}{m_0} \frac{z^2}{v^2} NB$$

其中, m_0 为电子的静止质量, Z 为入射粒子的电荷数, v 为入射粒子速度, N 是靶物质 (液闪) 单位体积的原子数。

$$B = Z \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

其中, Z 为靶物质的原子的原子序数 (因为液闪含有不同种类原子, 因此需要将不同类原子分开计算, 但是看成一种原子并不会影响最后的分析结果), 为 I 靶物质 (液闪) 的平均激发和电离能。注意当 v 接近相对论速度时, 该项在增加, 所以这一点也是非常重要的。

电离能和能量之间的关系可以用下图[1]表示:



[1]张智.核辐射物理及探测学课件.2018.

在入射粒子为重带电粒子时, 速度相对较小, 因此电离损失较大。

对于电子而言, 电离损失之外还有一项辐射损失 (轫致辐射), 该项和电离损失的比例可以用下式估算:

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{ion}} = \frac{EZ}{800}$$

其中, E 的单位是 MeV , Z 是靶物质的原子序数, 液闪中主要是氢原子和碳原子, 所以当电子能量达到辐射损失在液闪中才可以与电离损失相提并论。但是无论如何, 你应该注意到对于同一能量下的 α 和 β , 电离损失会比 α 小 500 倍以上。

粒子在闪烁体中损失能量后, 受激发的电子跃迁到更高的能级上, 随后会放出光子, 回到之前的能级上。放出光子以指数形式发光, 对应两种过程, 即发光时间有差异, 分别为快成份和慢成分。入射粒子不同, 对应的快慢成分比例不同 (详细介绍见下)。

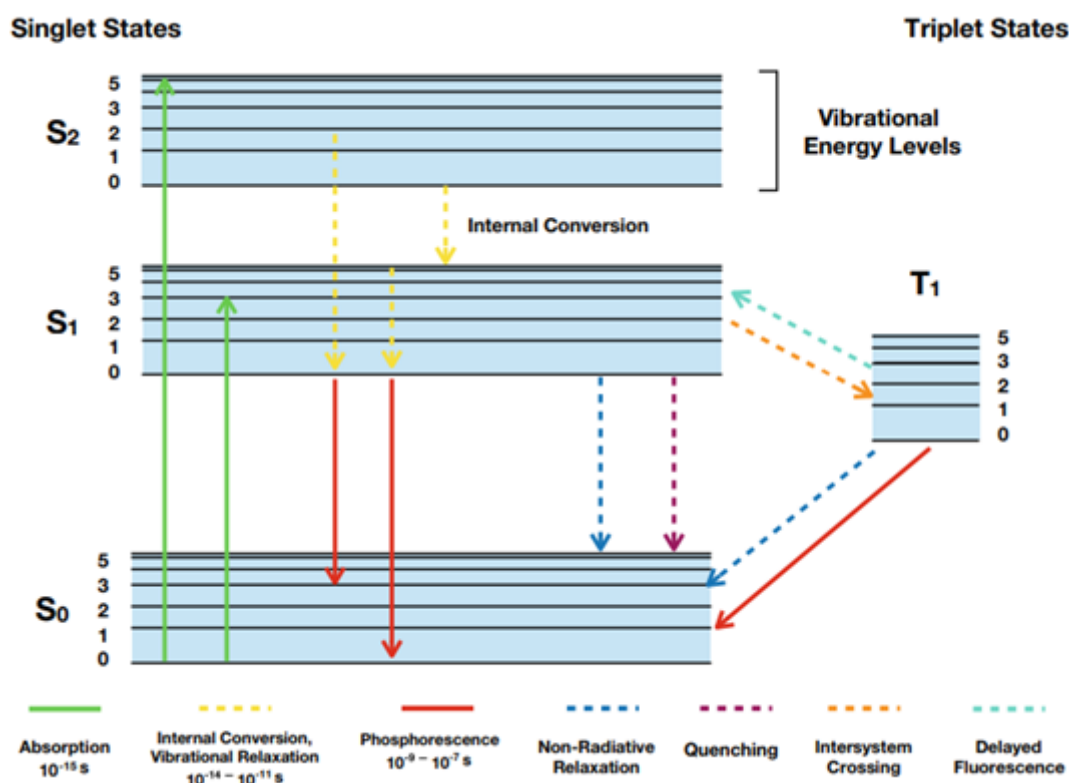
闪烁体

中微子探测器偏爱闪烁体探测器, 中微子反应截面很小, 因此探测器需要非常巨大, 而液体闪烁体恰好符合这个要求。

闪烁体有很多类型，但是发光原理基本上一致。锦屏1吨原型探测器中使用液体闪烁体LAB（PPO），其中的苯环会形成 π 键。对应电子能级也会分成单态与三态[2]

[2]Biller S D. Event Classification in Liquid Scintillator Using PMT Hit Patterns[J]. 2019.

上图需要指出的是单态较三重态更为稳定，因此发光时间常数有差别。那么对于重带电粒子来说，会使得短时间进入单态的数目较多，从而使得进入三重态的数目增加。最后会使得发光时间谱中慢成分比例大大增加，呈现长尾状。



此外重电离区域还会有电离猝灭现象，即电离程度高区域产生的闪烁光会减少。

粒子发光特点

对应的电荷更大，质量大，电离密度更高，因此产生光子密度更大，运动轨迹短并且偏转小。

进入三线态概率更大，导致发光时间常数变长。

α 粒子

质量小，速度近光速，会产生切伦科夫光。

对应的电荷小，质量小，电离密度小，单位距离能损较小，因此产生光子密度小。

** β 粒子 **

虽然单位距离能损较小，但是因为质量较小，因此电子反复散射轨迹曲折，最后行走距离不长。

进入三线态概率小，导致发光时间常数比 α 要短。