

# 太阳能电池、光电器件

(量子物理模块知识拓展)

# 1. 问题引入

- 1887年，赫兹首先发现了光电效应现象。

在赫兹证明电磁波存在的实验当中，赫兹发现当有光照射在金属接收器上时，**电火花出现的容易一些**，这个现象则是最初版本的光电效应。



海因里希·鲁道夫·赫兹  
(1857-1894)

## 请扫码回答问题

问题：你知道有哪些诺贝尔物理学奖获得者的科学贡献与光电效应相关？

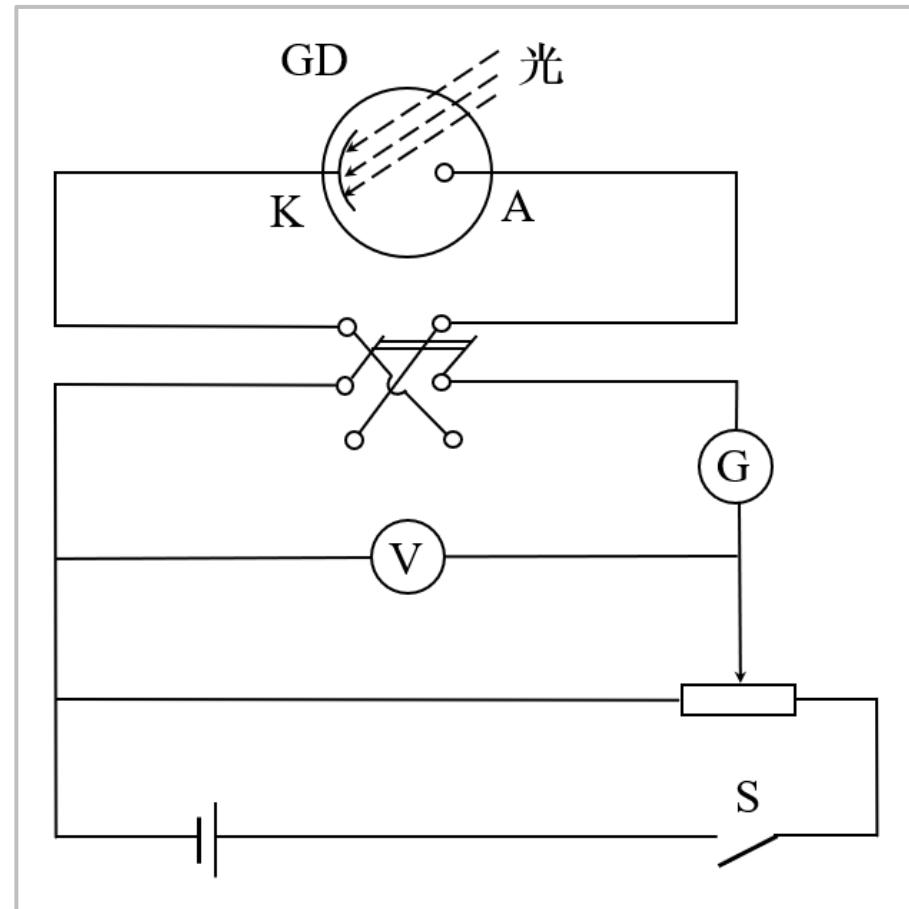


- 菲利普·莱纳德 (1905) —— **用实验发现了光电效应的重要规律**；
- 爱因斯坦 (1921) —— 提出**光量子假设**，成功解释光电效应；
- 密里根 (1922) —— 测定**电子电荷**、**光电效应实验等**。

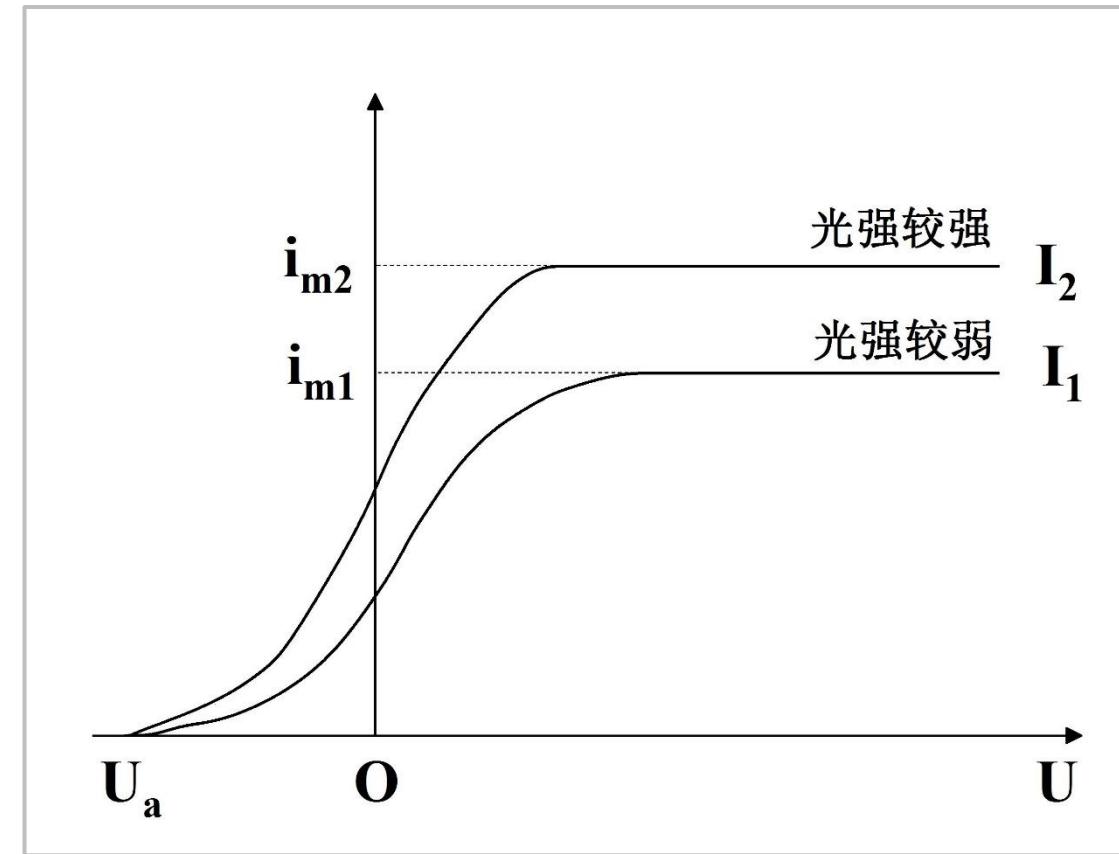
# 1. 问题引入



## • 1.1 光电效应实验装置简图



饱和电流与入射光强成正比  
(经典电磁理论可以解释)





## • 1.2 经典电磁理论不能解释的三个实验规律

### 截止频率 $\nu_0$

当且仅当  $\nu > \nu_0$  才发生光电效应。

$\nu_0$  与材料无关，与光强无关。

### 弛豫时间

入射光无论如何弱，均有光电效应。

瞬时发生，弛豫时间在  $10^{-9}$  秒量级。

### 遏止电压

光电子的初动能与入射频率相关；

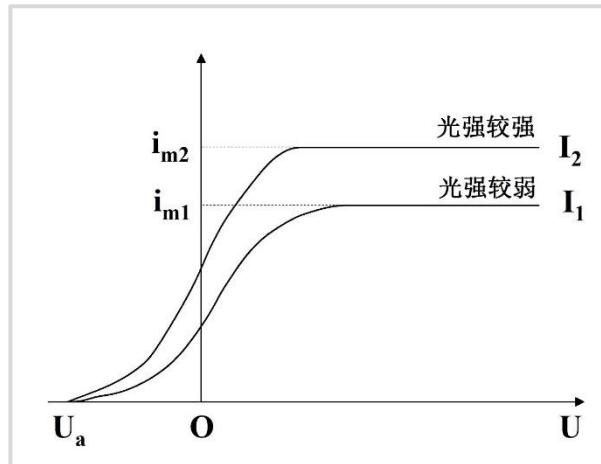
电压为0时也有光电流，存在反向遏止电压  $U_a$ 。



## • 1.3 经典电磁理论的缺陷

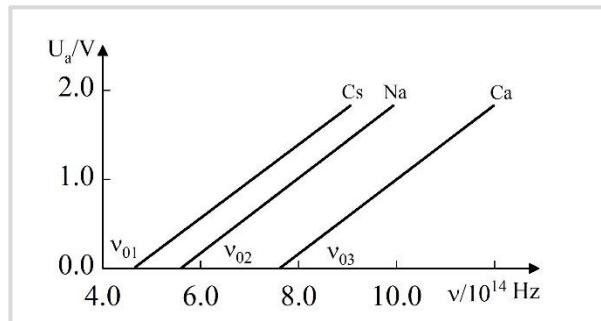
### 截止频率问题

**电磁视角：**无论何种频率的入射光，只要其强度足够大，就能够使得电子具有足够的能量逸出金属，与实验结果不相符。



### 弛豫时间问题

**电磁视角：**电子逸出金属所需要的能量需要有一定的时间积累，一直积累到足以使电子逸出金属表面为止，与实验结果不相符。



# 1. 问题引入

## • 1.3 经典电磁理论的缺陷

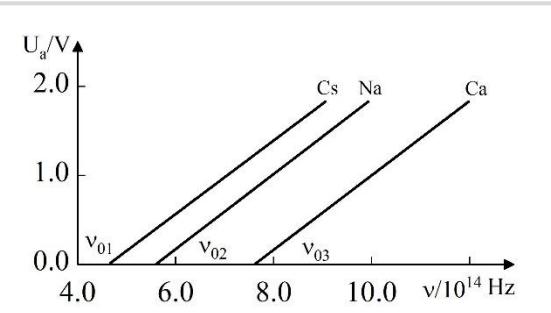
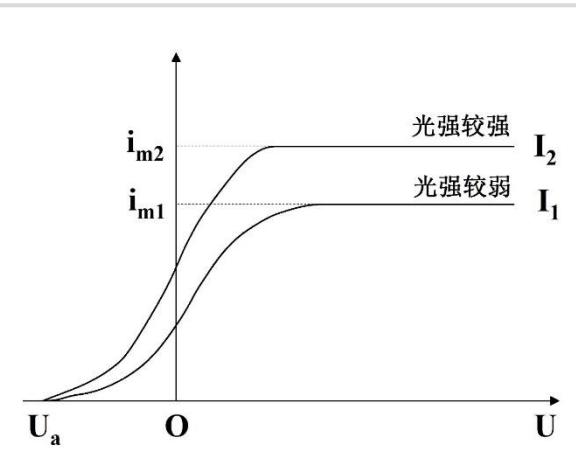
- 如何解决这 **三个问题** ?
- 光电效应 **本质** 是什么 ?

### 遏止电压问题

**能量视角:** 电子从金属表面逸出需要克服表面原子的吸引力，即外界必须作功。其最小的功称之为**逸出功**，由金属性质决定。

**电磁视角:** 电子逸出的初动能应该决定于光振动的振幅，也就是光的**强度**。

**实验结果:** 光电子的最大初动能随着频率线性上升，与强度无关，**与实验结果不相符**。





### • 2.1 光量子假设

**科学思想：**电子吸收能量为 $h\nu$ 的光量子后，如果扣除逸出功后还有多余的能量，则有光电子逸出。

- 光是由光量子（light quanta）组成的，每个光量子的能量： $E = h\nu$ 。
- 一个光量子只能整个地被电子吸收或者放出，光量子具有”整体性”。
- 电子在离开金属面时具有一定动能，该动能与入射光频率和材料有关。



爱因斯坦  
(1879-1955)

## 2. 物理学原理

### • 2.2 光电效应方程

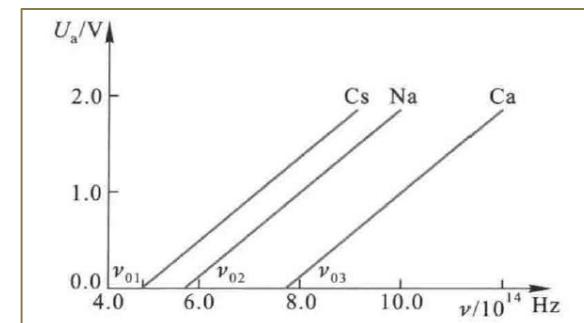
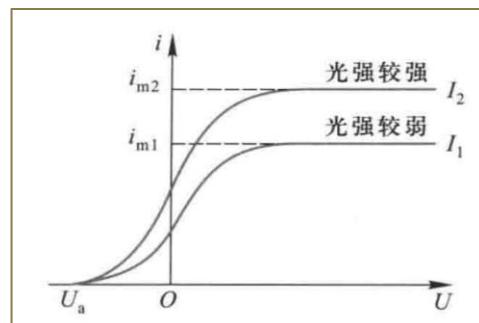
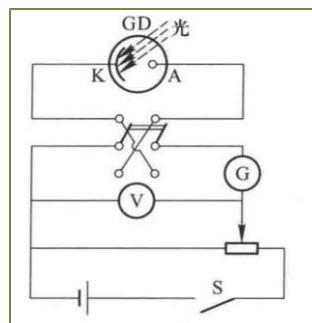
科学思想：电子吸收能量为 $h\nu$ 的光量子后，如果扣除逸出功后还有多余的能量，则有光电子逸出。

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$$

逸出功：电子脱离金属表面所需要的最少能量，与材料有关

$\frac{1}{2}mv^2$  电子从金属表面逸出后所具备的最大初动能

### • 能否解释前述三个问题？



## 2. 物理学原理

### • 2.3 光量子理论对光电效应的解释



$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$$

#### 截止频率

电子离开金属表面的动能至少为0



$$h\nu_0 = A$$

( $\nu_0$ 与材料有关)

#### 弛豫时间

光照射到金属上时能量为  $h\nu$  的光子一次性被一个电子吸收。



(无需时间积累)

#### 遏止电压

$$eU_a = \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - A$$

遏制电压随频率线性增加，系数为  $h/e$



(与实验相符)

### 3. 相关知识拓展

#### • 3.1：光量子理论的实验验证

密里根曾极力反对爱因斯坦的光量子假说，于是他克服重重困难，设计了高精度实验，用了十年时间测量光电效应。得到了遏止电压和光子频率的严格曲线，验证了光量子假说的合理性。

普朗克根据黑体辐射实验测得

$$h = 6.358 \times 10^{-34} (\text{J}\cdot\text{s})$$

密里根基于光电效应实验测得

$$h = 6.57 \times 10^{-34} (\text{J}\cdot\text{s})$$

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + A$$



密里根  
(1868-1953)

### 3. 相关知识拓展

#### • 3.2: 理解光的“波粒二象性”



波动性

频率  $\nu$

$h$

波长  $\lambda$

粒子性

能量  $\varepsilon$

动量  $p$

普朗克常数架起了光的波动性  
与粒子性之间的桥梁。

1969年，威利斯·兰姆等用经典光波的概念分析了光电效应，从另外一个角度阐释了光的“波粒二象性”。M Sargent III, M O Scully, W E Lamb, Laser Physics, Addison- Wesley Press, 1974

$$\varepsilon = h\nu$$

(光量子理论)

$$\lambda = h / p$$

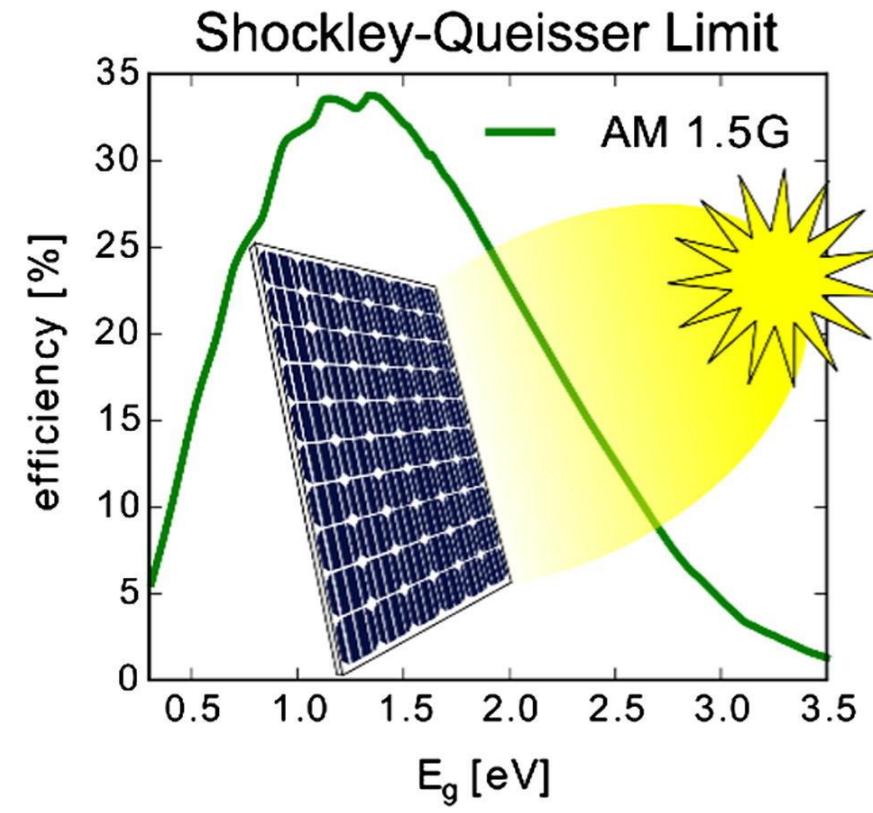
(德布罗意关系)

$$m_0 = 0$$

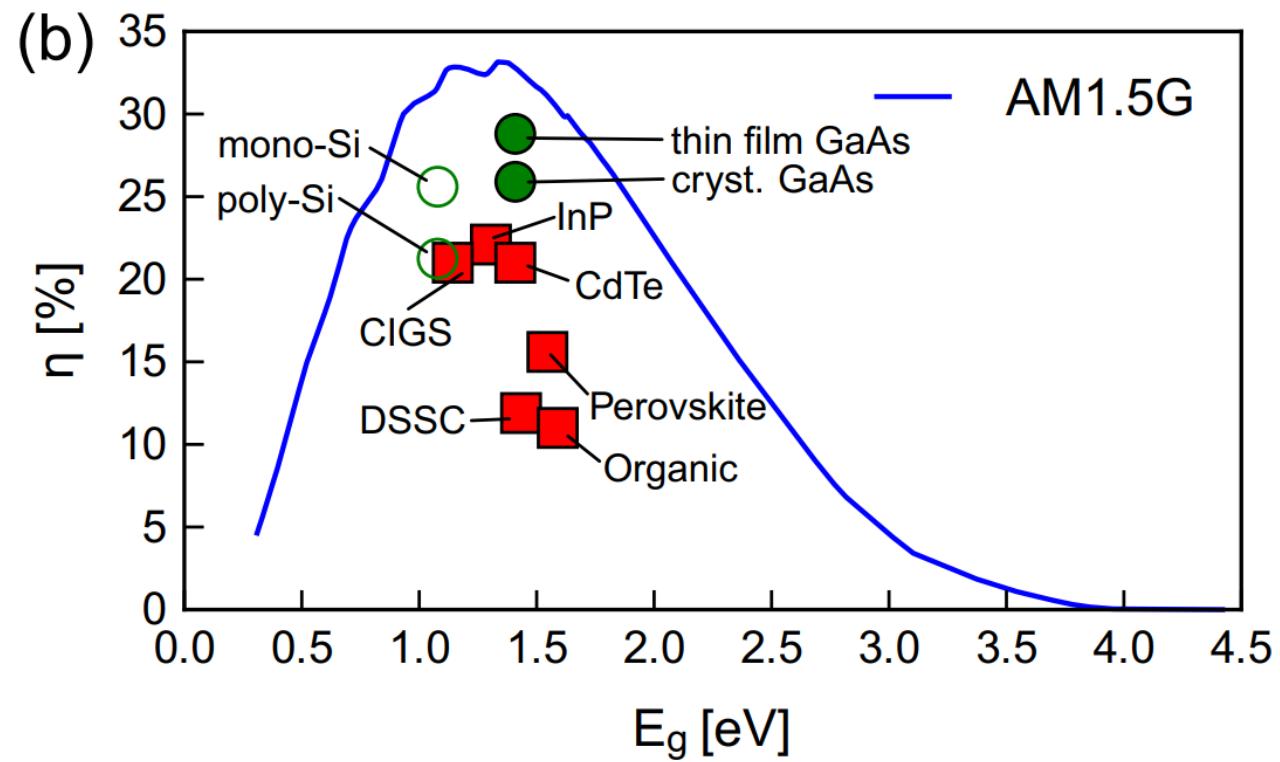
(光子的静止质量)

### 3. 相关知识拓展

#### • 3.3: 单结太阳电池的极限效率



(内光电效应)



### 3. 相关知识拓展

#### • 3.3：单结太阳电池的极限效率



中国空间站的“T”字构型



#### 柔性太阳电池翼：

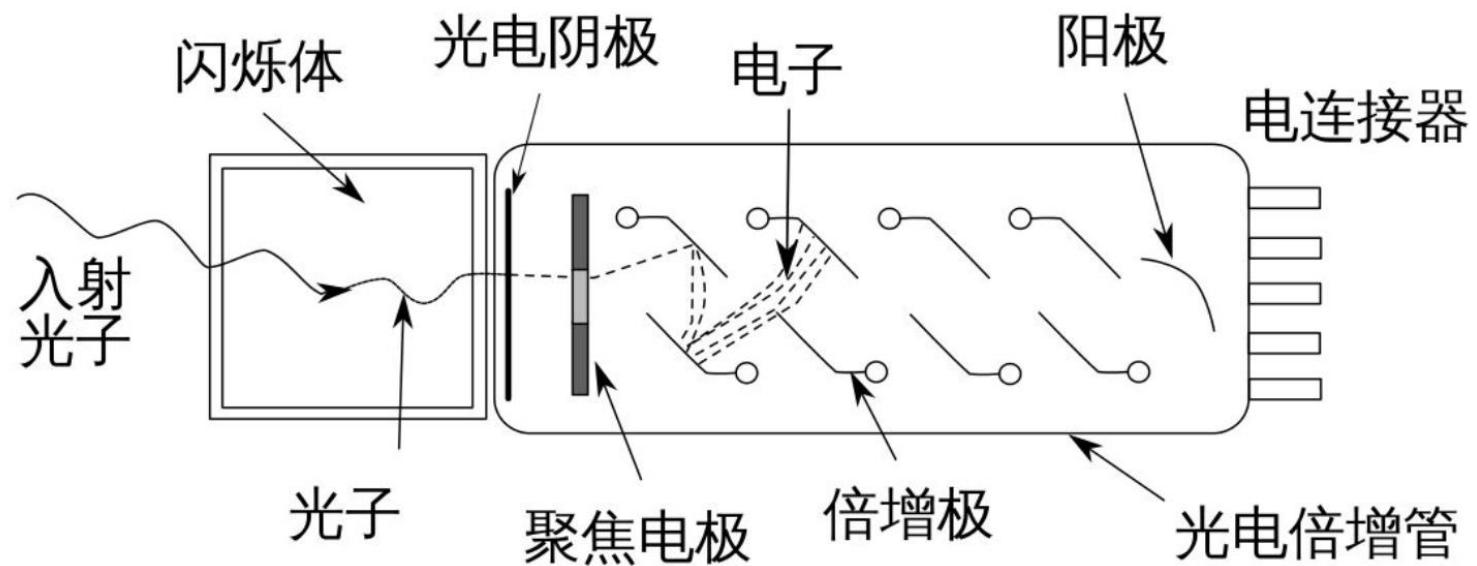
- 由十几万片柔性GaAs太阳电池组成。
- 光电转换效率 $>30\%$ 。
- 发射过程中宛如合拢的手风琴。
- 在恶劣环境中寿命15年以上。



#### • 3.4: 光电倍增管

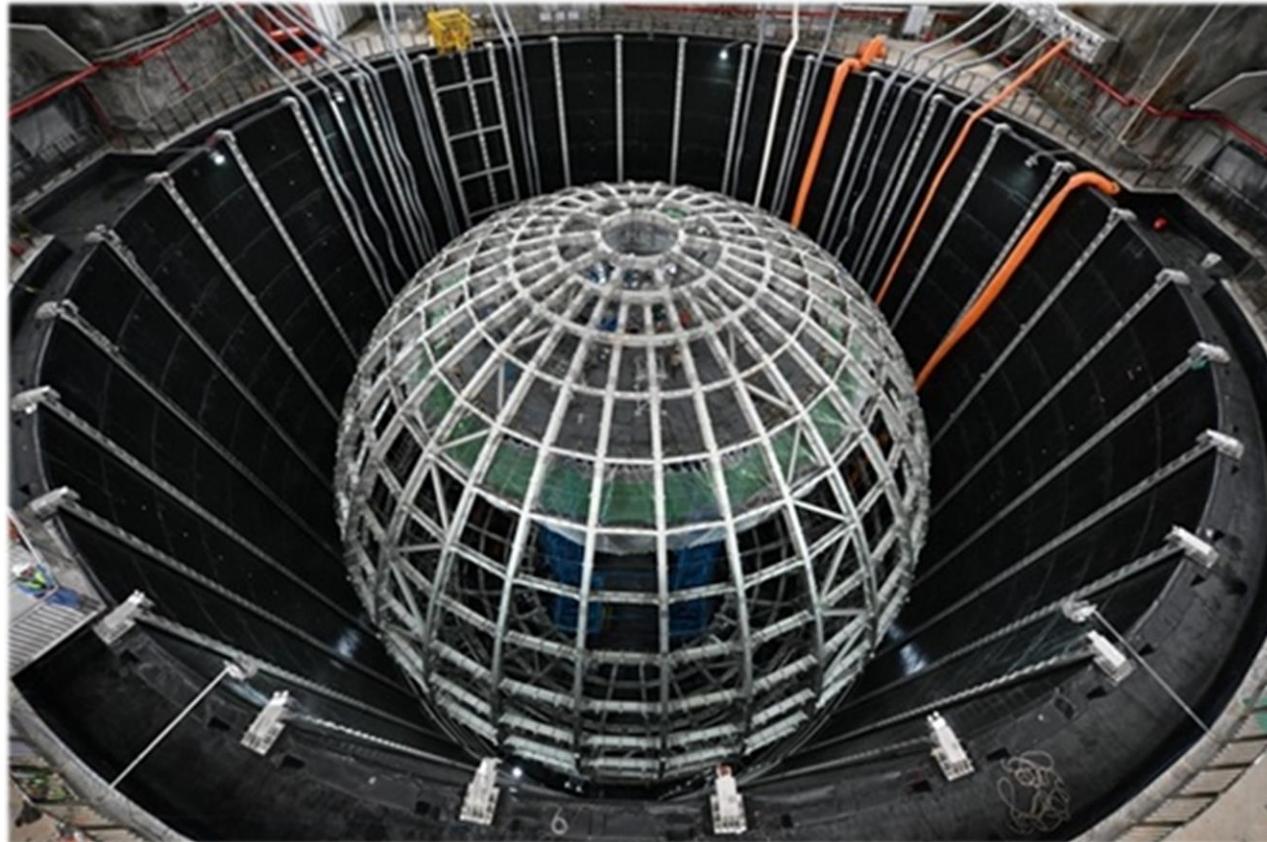
(外光电效应)

光电倍增管是一种真空管器件，它能使进入的微弱光信号转变成电信号并增强至原本的 $10^6$ - $10^8$ 倍，使光信号能被测量。



### 3. 相关知识拓展

#### • 3.4: 光电倍增管



江门地下中微子实验站（在建）



核心部件：直径41米的液体闪烁体探测器

- 2万只20英寸 **PMT**
- 2.5万只3英寸**PMT**

该大科学项目预计2023年建成运行，将使我国在中微子研究领域的领先地位得到进一步巩固，并成为国际中微子研究的中心之一。

## 4. 参考文献



- 段开敏,郭光灿.百年光子——纪念爱因斯坦“光量子论”诞生110周年[J].物理,2015,44(08):489-496.
- 金尚年.量子物理学各发展阶段大事纪要[J].物理,1987(01):58-64.
- 李树春.爱因斯坦对光辐射理论的重大贡献[J].物理,1990(12):747-751+760.
- 咸奎成,王治易,张雷等.空间站核心舱柔性太阳翼设计与验证[J].上海航天(中英文), 2022, 39(S2):32-36.
- 雷肇棣.光电探测器原理及应用[J].物理,1994(04):220-226.
- 朱印康.光子计数用的光电倍增管[J].物理,1986(10):618-621.
- 张永鹏,杨长根.从大亚湾到江门中微子实验[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2021,51(09):6-17.
- W Shockley, H J Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. *J. Appl. Phys.* 32, 510 (1961).
- S Ruhle. Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy* 130, 139–147 (2016) .
- M Sargent III, M O Scully, W E Lamb, *Laser Physics*, Addison- Wesley Press, 1974.

谢 谢