



太阳能电池、光电倍增管

(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)

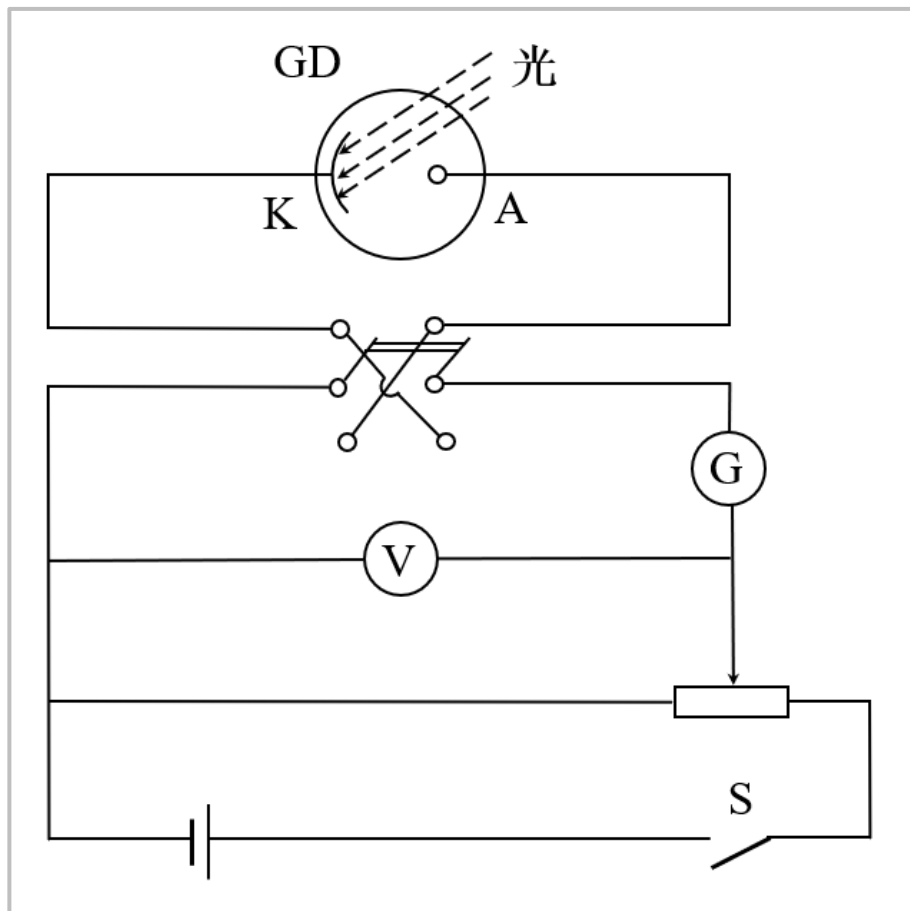
请扫码回答问题

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？

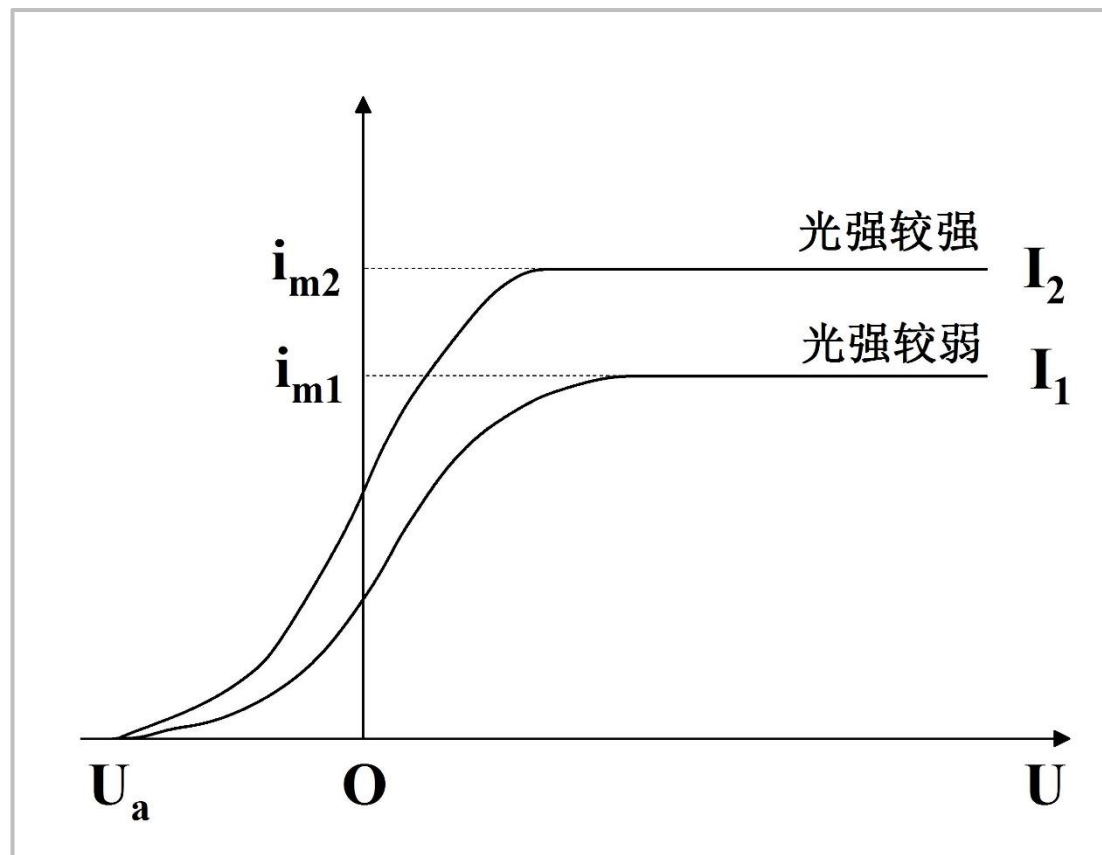


- 菲利普·莱纳德（1905）——**用实验发现了光电效应的重要规律**；
- 爱因斯坦（1921）——**提出光量子假设，成功解释光电效应**；
- 密里根（1922）——**测定电子电荷、光电效应实验等**。

• 1.1 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 ν_0

当且仅当 $\nu > \nu_0$ 才发生光电效应。

ν_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

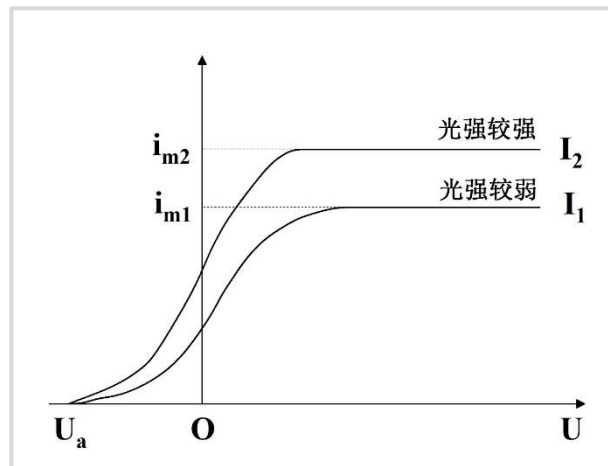
光电子的初动能与入射频率相关；

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

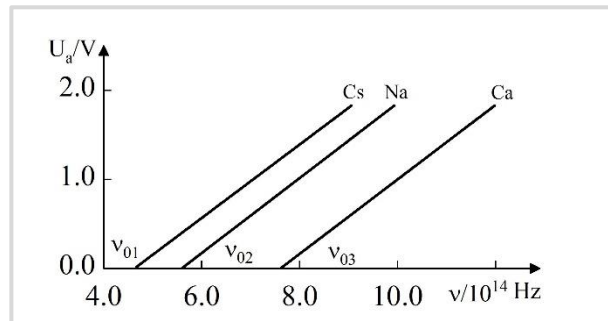
截止频率问题

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。**



• 1.3 经典电磁理论的缺陷

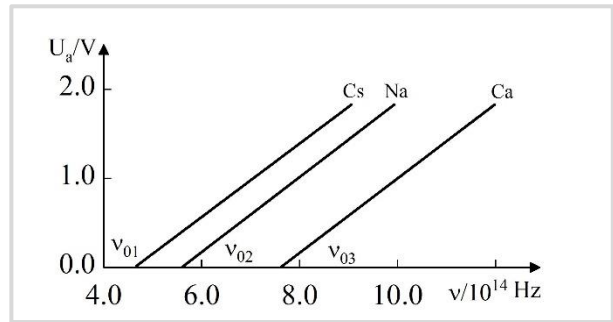
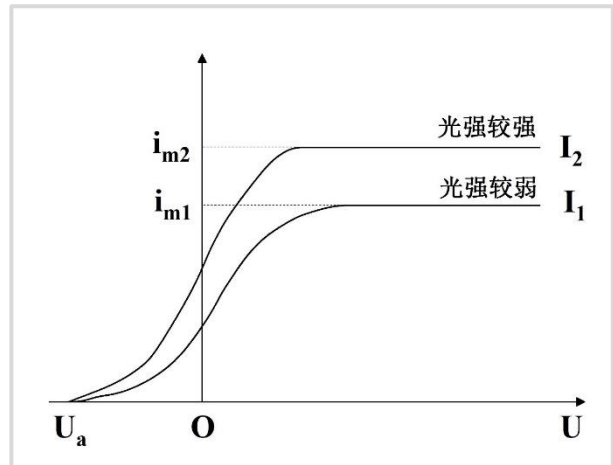
- 如何解决这 **三个问题**？
- 光电效应 **本质** 是什么？

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，即外界必须做功。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)

• 2.2 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。

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

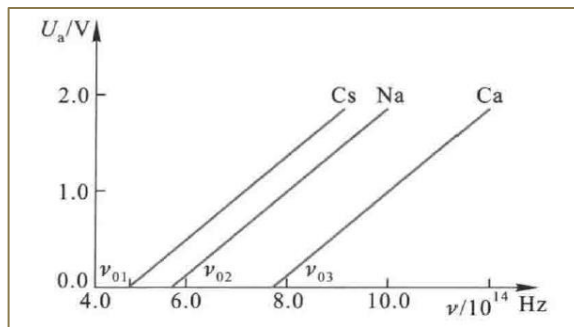
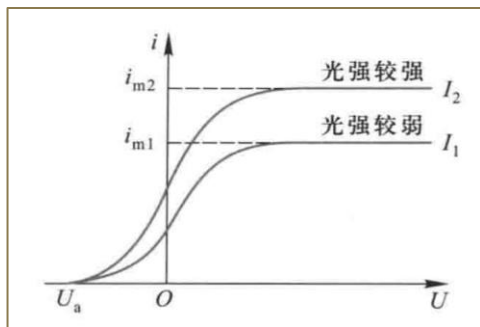
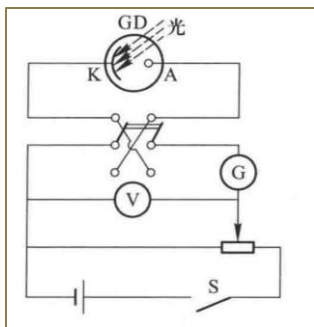
A

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**？



• 2.3 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



$$h\nu_0 = A$$

(ν_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)

• 3.1: 光量子理论实验验证

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

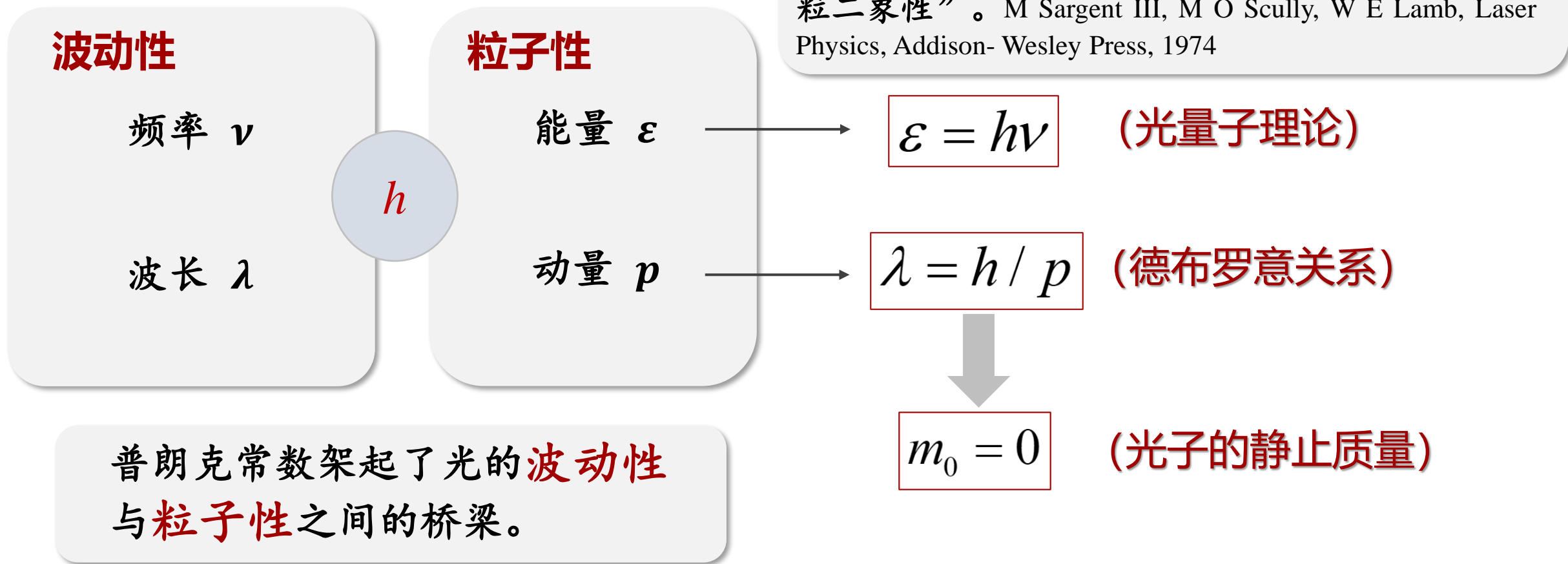
$$h = 6.57 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$$

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



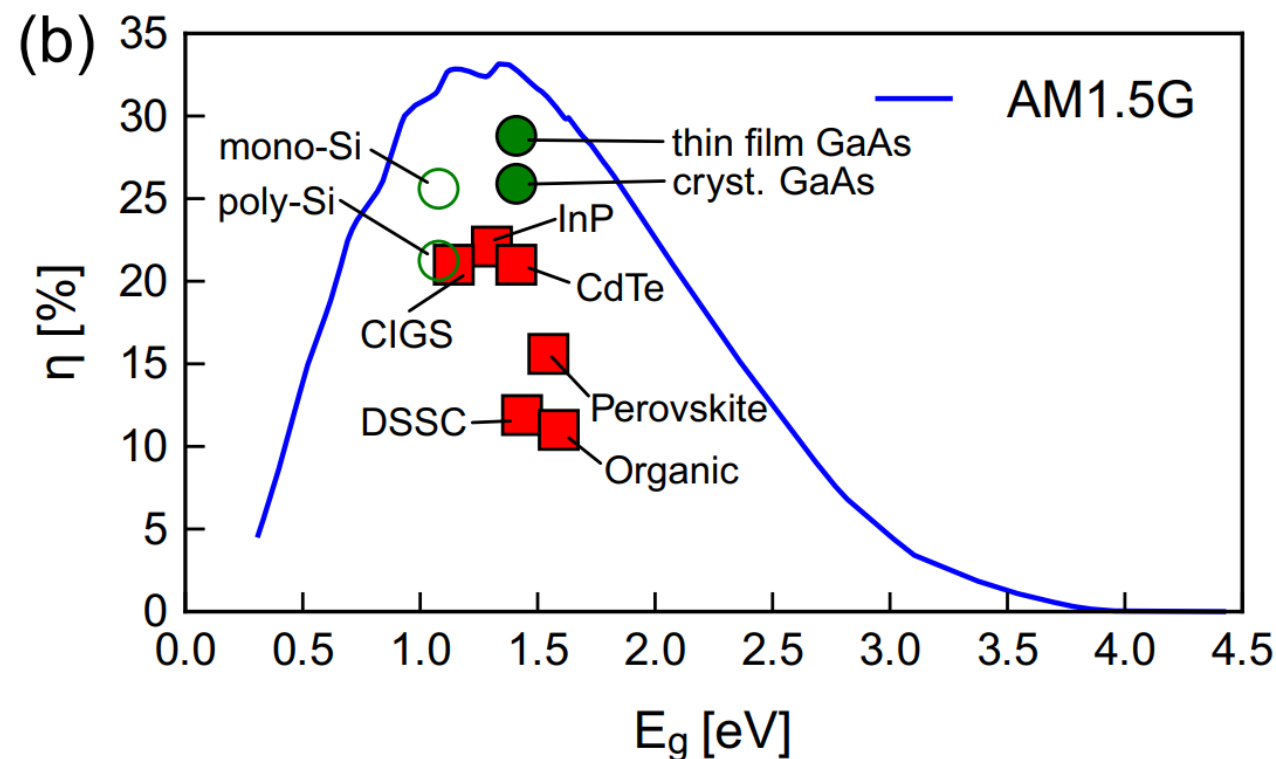
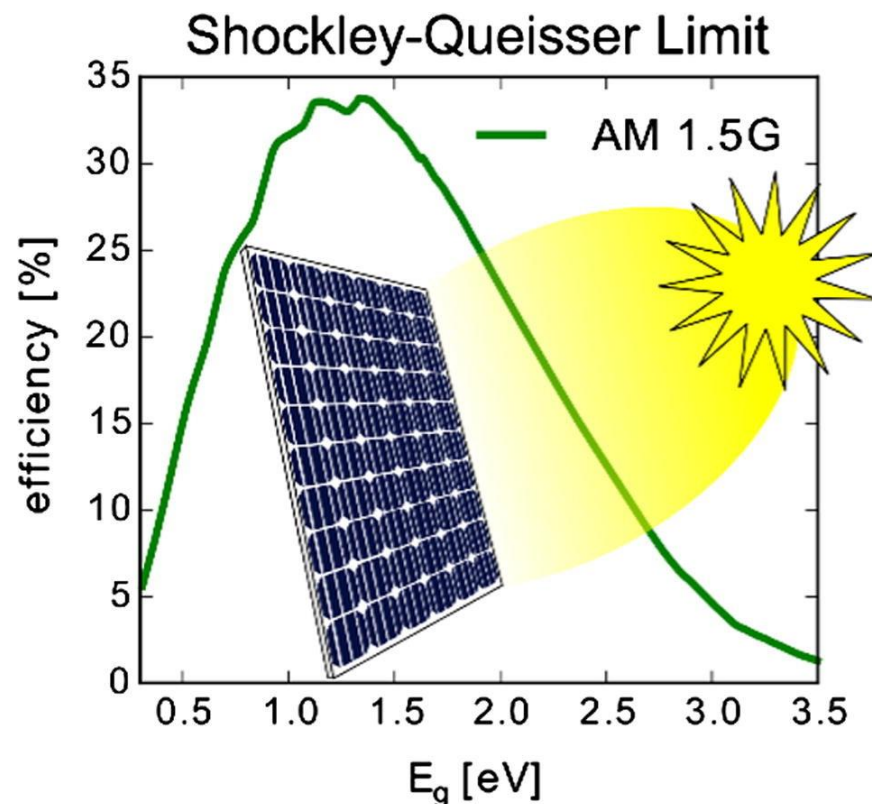
密里根
(1868-1953)

• 3.2: 理解光的“波粒二象性”



• 3.3: 单结太阳能电池的极限效率

(内光电效应)



• 3.3: 单结太阳能电池的极限效率



中国空间站的“T”字构型

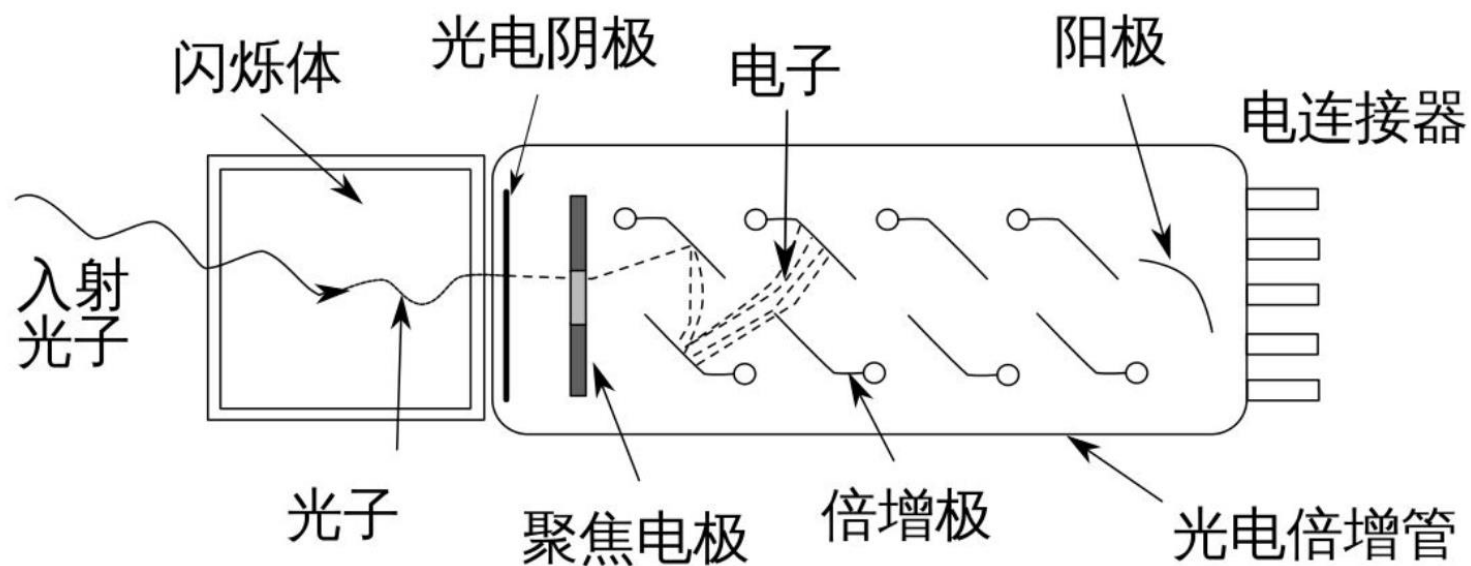
柔性太阳能电池翼：

- 由十几万片柔性GaAs太阳能电池组成。
- 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。

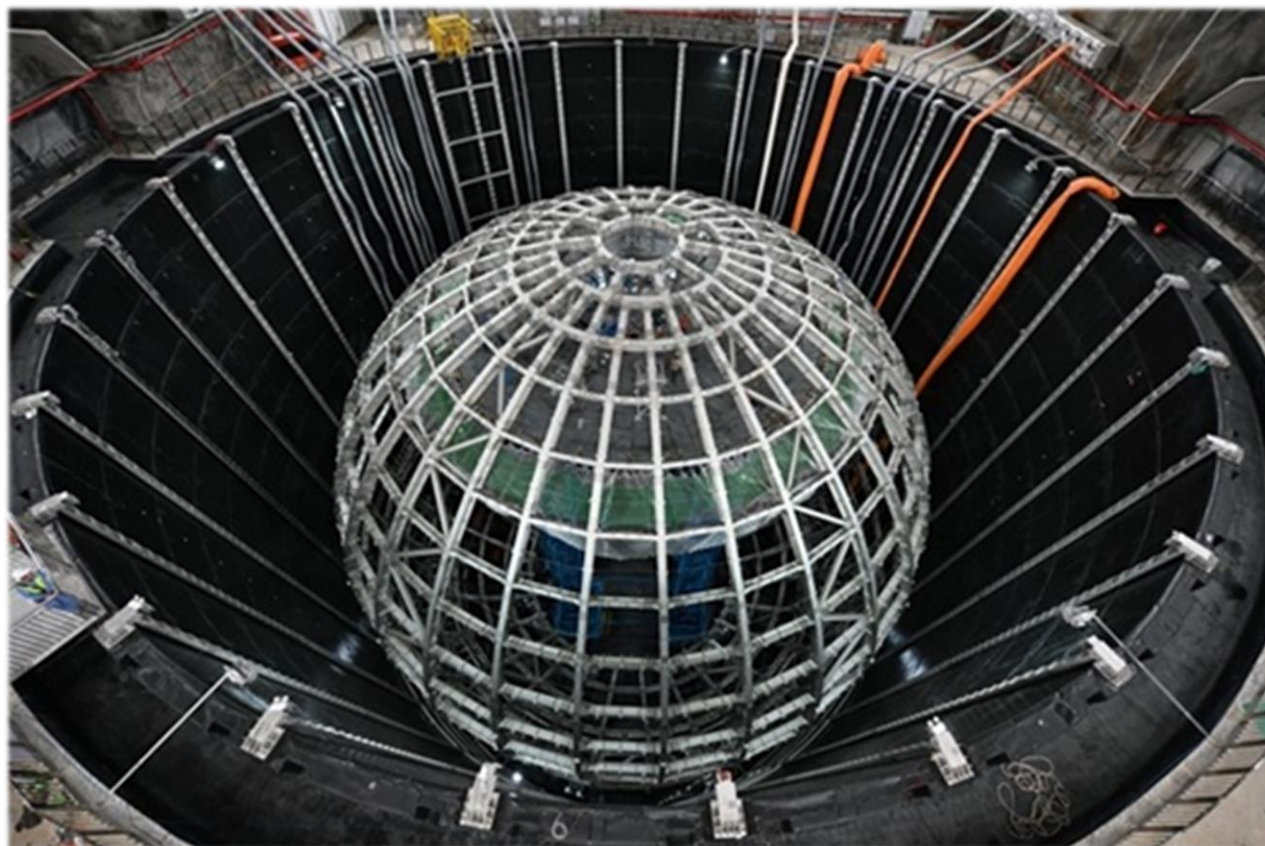
• 3.4: 光电倍增管

(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。



• 3.4: 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。

- 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