

NO.13-5

第十五章 量子物理学

- 量子理论的诞生
- 黑体辐射 → 量子
- 光电效应 → 光子

2016-12-16

量子理论的诞生

- 19世纪中叶，经典物理学建立并取得伟大成就；
 - 牛顿力学 —— 成功预言了海王星的存在
 - 经典电磁学 —— 成功预言了电磁波的存在
 - 热力学和统计物理 —— 揭示了系统演化的方向性
- ✓ 1878, Von Jolly 劝告18岁的Plank: “年轻人，不值得去当一个物理学家，物理学实际上已经完成了，所有的微分方程都已写出，剩下的只在于考虑各种初值、边界条件下的特殊问题”
- ✓ 1894, Michelson: “……物理学的未来真理要在第6位小数上找”
- 19世纪末——20世纪初，物理学有许多新发现，同时面临许多新问题；

量子理论的诞生

- 19世纪末的三大实验发现：X射线、电子、放射性

年代	人物	事件
1895	伦琴	发现X射线
1896	贝克勒耳	发现放射性
1896	塞曼 和 洛伦兹	发现并解释塞曼效应
1897	J.J.Thomson	发现电子
1898	卢瑟福	发现 α 、 β 射线
1898	居里夫妇	发现放射性元素钋、镭
1900	Plank	提出量子假设
1901	考夫曼	发现电子质量随质量增加
1902	勒纳德	发现光电效应的基本规律
1903	卢瑟福、索迪	发现放射性元素的蜕变规律
1905	Einstein	创立狭义相对论、布朗运动和光电效应理论

量子理论的诞生

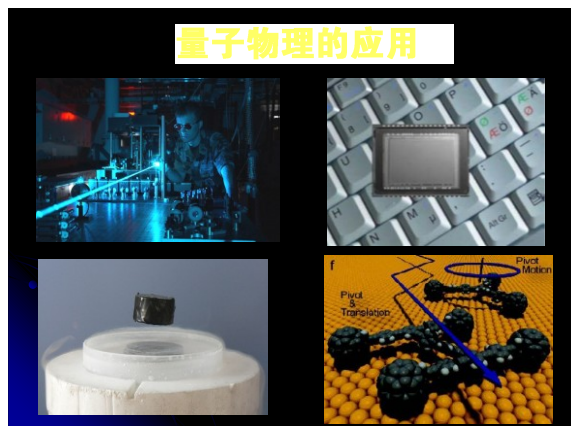
- 19世纪末——20世纪初，物理学有许多新发现，同时面临许多新问题；
- 开尔文：“经典物理学万里晴空中升起两朵乌云”
 - 以太漂移假说与迈克尔孙-莫雷实验“零结果”；
 - 能量均分定理与黑体热辐射能谱分布的实验结果不符；
- 新理论诞生
 - 高速领域的规律
—— Special Theory of Relativity
 - 微观世界的规律
—— Quantum Theory

群星灿烂——量子物理的贡献者



Fifth Solvay Conference, Brussels (1927)

量子物理的应用



本章可分为三部分

- 一、量子概念的引入——能量量子化（能量子、光子）、（角）动量量子化、轨道量子化
- 二、微观粒子的波粒二象性——物质波、波函数、薛定谔方程
- 三、用量子概念解释电子在原子中的运动规律

一、黑体辐射

1. 热辐射

- 由于物体中的分子、原子受到**热激发**而**发射电磁波**的现象。
- 在任何温度下，物体辐射出**各种频率**的电磁波；
- 辐射能量按频率的**分布与温度有关**。
- 物体在任何时候都存在**发射和吸收**电磁辐射的过程。

实验表明：辐射能力越强的物体，其吸收能力也越强。

平衡热辐射：

同一时间内从物体表面**辐射**的电磁波的能量和它**吸收**的电磁波的能量**相等**。

一、黑体辐射

2. 描述热辐射的物理量

(1) 单色辐出度（单色辐射出射度）

单位时间内，热力学**温度**为 T 的物体单位面积发出的波长在 λ 附近单位**波长**区间（或频率在 ν 附近单位频率区间）的电磁波的能量。

$M_\nu(T)$ 单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ $M_\lambda(T)$ 单位: W/m^3

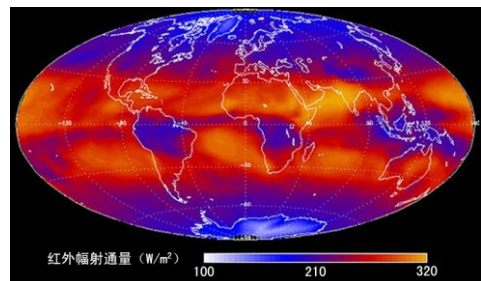
$$M_\nu(T) = M_\lambda(T) \frac{\lambda^2}{c} \quad M_\lambda(T) = M_\nu(T) \frac{\nu^2}{c}$$

(2) 辐出度

单位时间内，热力学温度为 T 的物体单位面积上辐射的各种波长（频率）的电磁波能量之和。

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda = \int_0^\infty M_\nu(T) d\nu$$

2000年3月测得地球红外辐射图



一、黑体辐射

3. 黑体辐射

(1) 黑体：

能完全吸收照射到它上面的各种频率的电磁辐射的物体。

一、黑体辐射

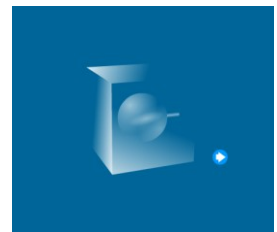
3. 黑体辐射

(1) 黑体：

能完全吸收照射到它上面的各种频率的电磁辐射的物体。

黑体模型：

开有小孔的空腔



一、黑体辐射

3. 黑体辐射

(2) 黑体辐射

■ 在一定温度下，黑体也要向外辐射电磁波。

● 黑体腔壁的原子由于振动向腔内**发射**电磁波，也**吸收**其他原子发射的电磁波，在一定温度下达到发射和吸收的**平衡**。

● 腔内由于电磁波的传播和反射，形成一组稳定的电磁驻波。

● 电磁驻波由小孔逸出，就成为这个黑体的热辐射。

一、黑体辐射

3. 黑体辐射

(2) 黑体辐射

■ 辐射含有各种频率成分，且不同频率的电磁波强度也不同，其分布因温度而异。

黑体辐射与温度的关系 →

一、黑体辐射

4. 黑体辐射的两个实验定律

(1) 斯特藩—玻尔兹曼 (Stefan — Boltzman) 定律

$$M(T) = \sigma T^4$$

斯特藩—玻尔兹曼常量

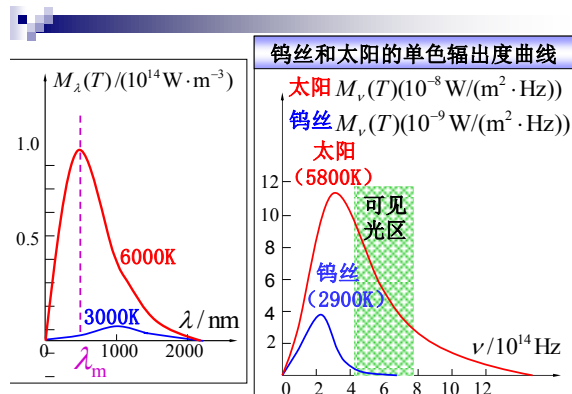
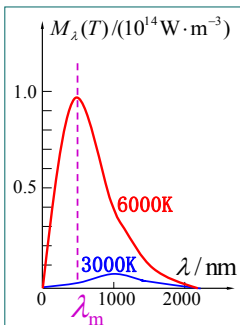
$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

(2) 维恩 (Wien) 位移定律

$$\lambda_m T = b$$

峰值波长

维恩常数 $b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$



例 1 (1) 温度为室温 (20°C) 的黑体，其单色辐出度的峰值所对应的波长为多少？

(2) 从太阳光谱的实验观测中，测知单色辐出度的峰值所对应的波长约为 483 nm 。试由此估算太阳表面的温度。

(3) 以上两物体的辐出度的比值为多少？

$$(1) \lambda_m = \frac{b}{T_1} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{293} \text{ m} = 9891 \text{ nm}$$

$$(2) T_2 = \frac{b}{\lambda_m} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{483 \times 10^{-9}} = 6000 \text{ K}$$

$$(3) \frac{M(T_2)}{M(T_1)} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 1.76 \times 10^5$$

地面温度约为 300K ，算得 $\lambda_m \approx 10 \mu\text{m}$ ，说明地面热辐射主要处在红外波段，而大气对这一波段的电磁波吸收极少，故可以红外遥感技术进行地质探查。



高空飞机自然彩色照片



高空飞机彩色红外照片

可在黑夜利用红外热成像仪侦查目标，
但被侦察方可在目标表面涂上降温迷彩材料进行反侦察。



可见光照片



近红外照片

驾驶室为普通涂料，车厢为降温迷彩涂料

一、黑体辐射

6. 普朗克量子假设 普朗克黑体辐射公式

黑体空腔壁中原子的振动可视为**一维谐振子**，它吸收或者发射电磁辐射能量**不是连续地取值**，

而是以与振子的频率成正比的**能量子** $\varepsilon = h\nu$ 为单元来吸收或发射能量。

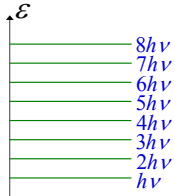
$$\varepsilon = nh\nu, n = 1, 2, \dots$$

普朗克常量

$$h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

普朗克黑体辐射公式 (1900.12.14)

$$M_\nu(T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

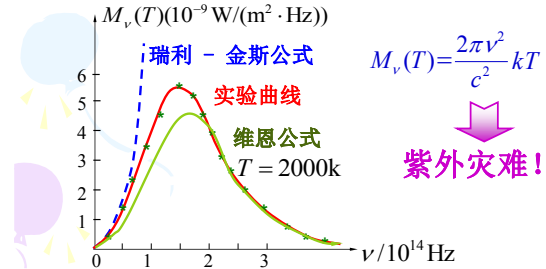


一、黑体辐射

5. 黑体辐射两个实验定律的经典理论解释

(1) 1896年，维恩公式 $M_\nu(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T}$

(2) 1900.6. 瑞利——金斯公式



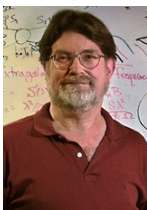
量子之父



The Nobel Prize in Physics 2006



John C. Mather
NASA Goddard
Space Flight Center
Greenbelt, MD,
USA
b. 1946



George F. Smoot
University of California
Berkeley, CA, USA
b. 1945

“ for their discovery of the **blackbody** form and **anisotropy** of the **cosmic microwave background radiation** ”

The Laureates' Work

Register the perfect blackbody spectrum of the background radiation.

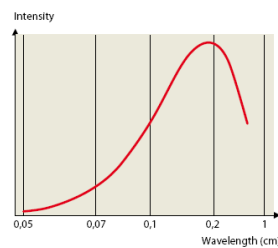


Figure. The wavelength distribution of the cosmic microwave background radiation, measured by COBE (Cosmic Background Explorer), corresponds to a perfect blackbody spectrum. The shape of such a spectrum depends only on the temperature of the emitting body. The wavelengths of the microwave background are found in the millimetre range, and this particular spectrum corresponds to a temperature of 2.7 degrees above absolute zero.

例2 设一音叉尖端质量为 0.050 kg ，将其频率调到 $\nu = 480 \text{ Hz}$ ，振幅 $A = 1.0 \text{ mm}$ 。

求：(1) 尖端振动的量子数；

(2) 当量子数由 n 增加到 $n+1$ 时，振幅的变化是多少？

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m (2\pi\nu)^2 A^2 = 0.227 \text{ J} \quad n = \frac{E}{h\nu} = 7.13 \times 10^{29}$$

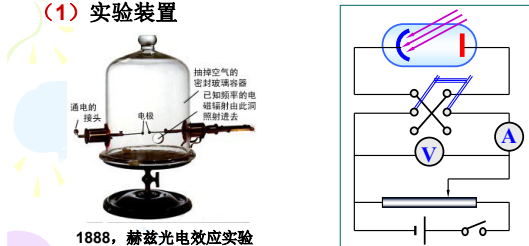
$$\Delta A = \frac{\Delta n}{n} \frac{A}{2} \quad \Delta n = 1 \quad \Delta A = 7.01 \times 10^{-34} \text{ m}$$

说明：在宏观范围内，能量量子化的效应是极不明显的，即宏观物体的能量完全可视作是连续的。

二、光电效应 光的波粒二象性

1. 光电效应

(1) 实验装置



光照射至金属表面，电子从金属表面逸出。逸出的电子称为**光电子**，形成**光电流**。

二、光电效应 光的波粒二象性

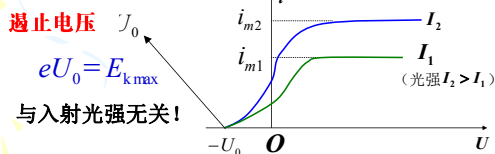
1. 光电效应

(2) 实验规律

A. 截止频率（红限） ν_0

仅当 $\nu > \nu_0$ 才发生光电效应，截止频率与**材料有关**，与**光强无关**。

B. 饱和电流强度与入射光强成正比



二、光电效应 光的波粒二象性

1. 光电效应

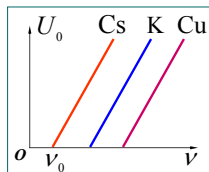
(2) 实验规律

C. 当 $\nu > \nu_0$ ，遏止电势差与入射光频率成线性关系。

$$U_0 = K\nu - U_1$$

D. 瞬时性

当光照射到金属表面上时，几乎立即就有光电子逸出。



二、光电效应 光的波粒二象性

1. 光电效应

(3) 经典理论解释光电效应所遇到的困难

◆ 红限问题

按经典理论，无论何种频率的入射光，只要其强度足够大，就能使电子具有足够的能量逸出金属。

$$I = S = EH$$

◆ 瞬时性问题

按经典理论，电子逸出金属所需的能量，需要有一定的时间来积累，一直积累到足以使电子逸出金属表面为止。

二、光电效应 光的波粒二象性

2. Einstein 光子（“光子”）假说

(1) “光子”假设 光子的能量为 $\epsilon = h\nu$

(2) 解释实验 $h\nu = \frac{1}{2} m v^2 + W$ —— 爱因斯坦方程

◆ 逸出功与截止频率 $W = h\nu_0$

◆ 对同一种金属， W 一定， $E_k \propto \nu$ ， $U_0 \propto \nu$ ；

◆ 光子射至金属表面，一个光子携带的能量 $h\nu$ 将一次性被一个电子吸收，若 $\nu > \nu_0$ ，电子立即逸出，无需时间积累（**瞬时性**）。

◆ 光强越大，光子数目越多，即单位时间内产生光电子数目越多，光电流越大。（ $\nu > \nu_0$ 时） $I = nh\nu c$

二、光电效应 光的波粒二象性

3. 光的波粒二象性

(1) 波动性：光的干涉、衍射和偏振

(2) 粒子性： $E = h\nu$ (光电效应等)

◆ 质能关系 $E = mc^2$ $m = \frac{h\nu}{c^2}$

◆ 相对论能量和动量关系 $E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$

◆ 光子 $E_0 = 0$, $E = pc$ $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$

描述光的
粒子性

$$\left\{ \begin{array}{l} E = h\nu \\ p = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right.$$

描述光的
波动性

二、光电效应 光的波粒二象性

3. 光的波粒二象性

关于光子的口诀

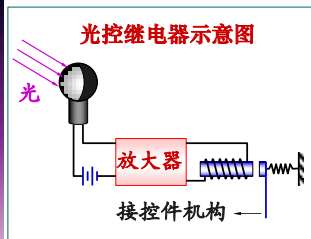
光是一束光子流
能量等于 $h\nu$
短波光子能量大
强光里面光子稠

二、光电效应 光的波粒二象性

4. 光电效应在近代技术中的应用



光电倍增管



用于：自动控制、自动计数、
自动报警、自动跟踪等。

例 3 波长为450nm的单色光射到纯钠的表面上。

求 (1) 这种光的光子能量和动量；

(2) 光电子逸出钠表面时的动能；

(3) 若光子的能量为2.40eV，其波长为多少？

(1) $E = h\frac{c}{\lambda} = 4.42 \times 10^{-19} \text{ J}$ $p = \frac{E}{c} = 1.43 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

(2) $E_k = E - W = 4.84 \times 10^{-20} \text{ J}$

(3) $\lambda = \frac{hc}{E} = 517.97 \text{ nm}$

几种金属逸出功的近似值 (eV)

钠	铝	锌	铜	银	铂
2.46	4.08	4.31	4.70	4.73	6.35

例4 设有一半径为 1.0×10^{-3} 的薄圆片，距离光源1.0m。此光源的功率为1W，发射波长为589nm的单色光。假定光源向各个方向发射的能量是相同的，试计算在单位时间内落到薄圆片上的光子数。

$$N = 7.4 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$$

今日作业

15 - 9, 10, 11, 12

