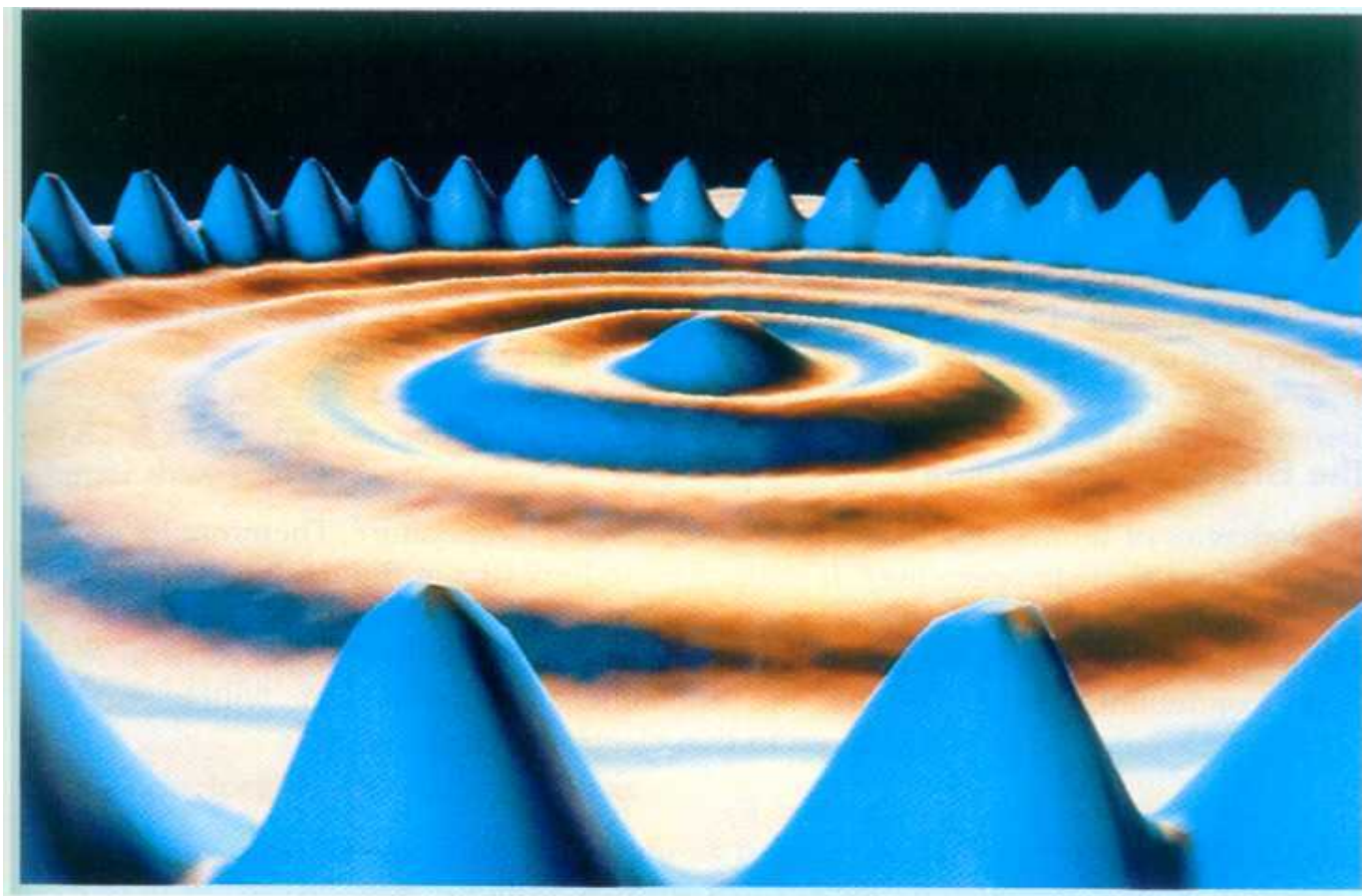


量子物理



量子物理基础

Quantum Physics

目 录

第1章 波粒二象性

第2章 薛定谔方程

第3章 量子力学的应用

量子力学是研究原子、分子和凝聚态物质的结构和性质的理论基础，在化学、生物、信息、激光、能源和新材料等方面的科学研究和技术开发中，发挥越来越重要的作用。

1900年，普朗克（M. Planck）提出能量子，即能量量子化的概念，这对经典物理理论是一个极大的冲击，因为能量的连续性在经典物理中是“天经地义”的事情。在物理学上，能量子概念的提出具有划时代的意义，它标志着量子力学的诞生。



1905年，为解释光电效应，爱因斯坦提出光子（光子）的概念，指出光具有波粒二象性。1923年，德布罗意（P. L. de Broglie）提出实物粒子也具有波动性的假设。波粒二象性的假设，为物质世界建立了一个统一的模型。物质具有波粒二象性是建立量子力学的一个基本出发点。

1927年，戴维孙（C. J. Davisson）和革末（L. H. Germer）通过镍单晶体表面对电子束的散射，观测到与X光衍射类似的电子衍射现象；同年，G. P. 汤姆孙（G. P. Thomson）用电子束通过多晶薄膜，证实了电子的波动性。





W.Heisenberg

1925年，海森伯 (W.Heisenberg) 放弃电子轨道等经典概念，用实验上可观测到的光谱线的频率和强度描述原子过程，奠定了量子力学的一种形式——矩阵力学的基础。

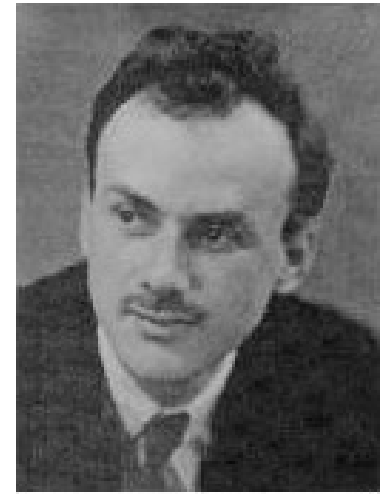
1926年，薛定谔 (E.Schrodinger) 提出了非相对论粒子（能量远小于静能）的运动方程——薛定谔方程，由此方程出发的量子力学称为波动力学。



E.Schrodinger



同年，狄拉克（P. A. M. Dirac）提出了电子的相对论性运动方程——狄拉克方程，把狭义相对论引入薛定谔方程，统一了量子论和相对论，为研究粒子物理的量子场论奠定了基础。



P.A.M. Dirac

矩阵力学和波动力学是等价的，前者偏重于物质的粒子性，后者偏重于物质的波动性，它们是量子力学的两种不同描述方式。薛定谔方程是微分方程，数学工具人们比较熟悉，我们只简要介绍波动力学。



量子物理的理论基础独立于经典力学，同我们的日常感受格格不入。对于生活在宏观世界又比较熟悉经典力学的人们来说，学习量子物理确有一定难度。初学者往往试图用经典的概念去理解量子物理，这将使学习陷入困境。

物理学是基于实验事实的信仰，对于量子物理来说尤其是这样。合理的假定总是有些道理可讲的，但它不能由更基本的假定或理论推导出来，其正确性只能用实验来检验。相信这些基本假定，并自觉应用它们去分析和解决问题，是学习和理解量子物理的第一步。



第19章 波粒二象性

Wave-particle duality

§ 1 黑体辐射

§ 2 光电效应

§ 3 氢原子光谱

§ 4 实物粒子的波粒二象性

§ 5 量子物理基本原理

§ 6 不确定关系

§ 1 黑体辐射



一 热辐射的基本概念

1、热辐射

物体由大量原子组成，热运动引起原子碰撞使原子激发而辐射电磁波。原子的动能越大，通过碰撞引起原子激发的能量就越高，从而辐射电磁波的波长就越短。

热运动是混乱的，原子的动能与温度有关，因而辐射电磁波的能量也与温度有关。

例如：加热铁块， 温度 \uparrow ，铁块颜色由看
不出发光 \rightarrow 暗红 \rightarrow 橙色 \rightarrow 黄白色 \rightarrow 蓝白色

这种与温度有关的电磁辐射，称为**热辐射**。



并不是所有发光现象都是热辐射，例如：

激光、日光灯发光就不是热辐射。

任何物体在任何温度下都有热辐射，波长自远红外区**连续**延伸到紫外区（**连续谱**）。

温度 \uparrow \rightarrow 辐射中短波长的电磁波的比例 \uparrow

几种温度下辐射最强的电磁波颜色



800K



1000K

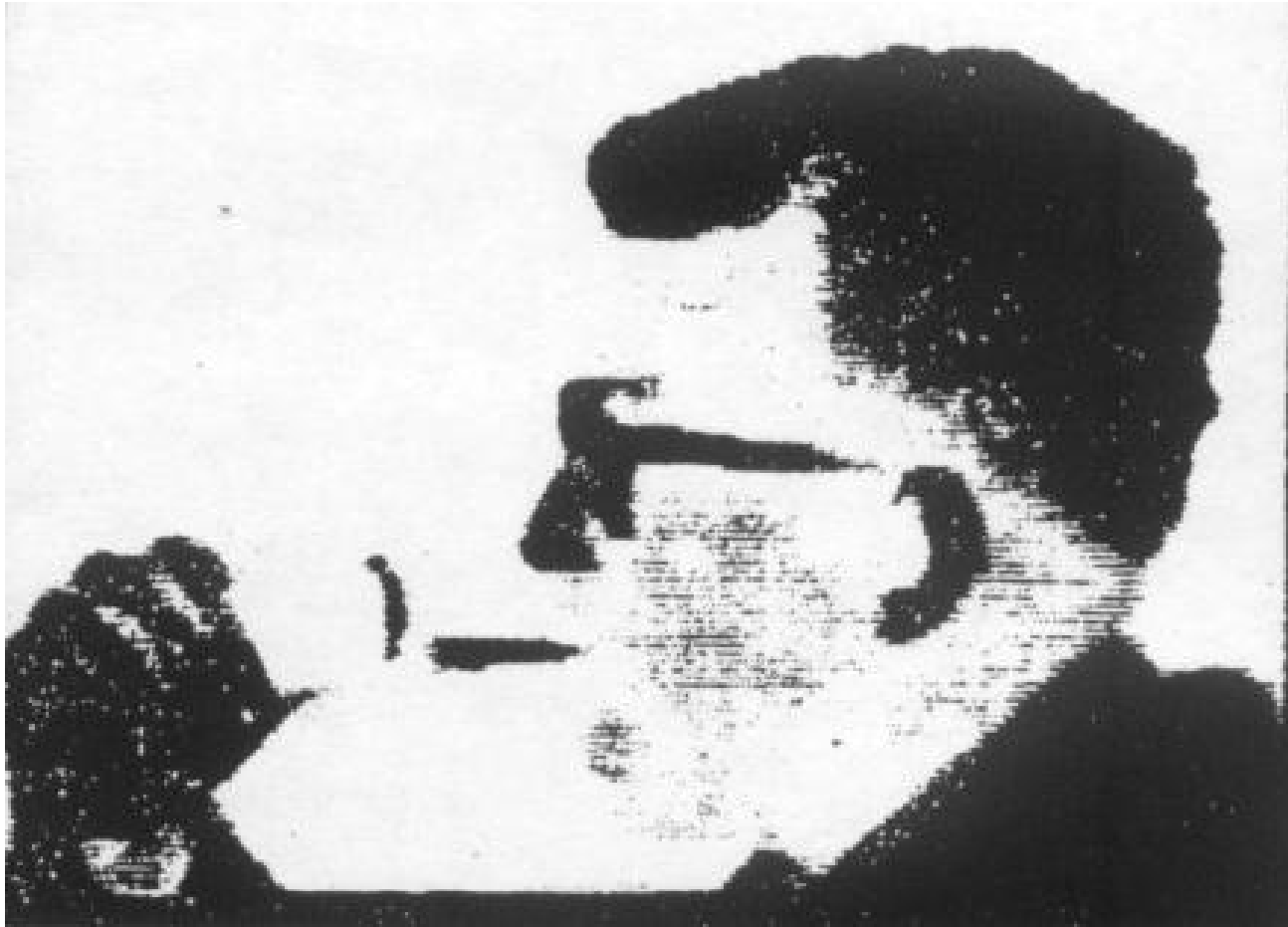


1200K

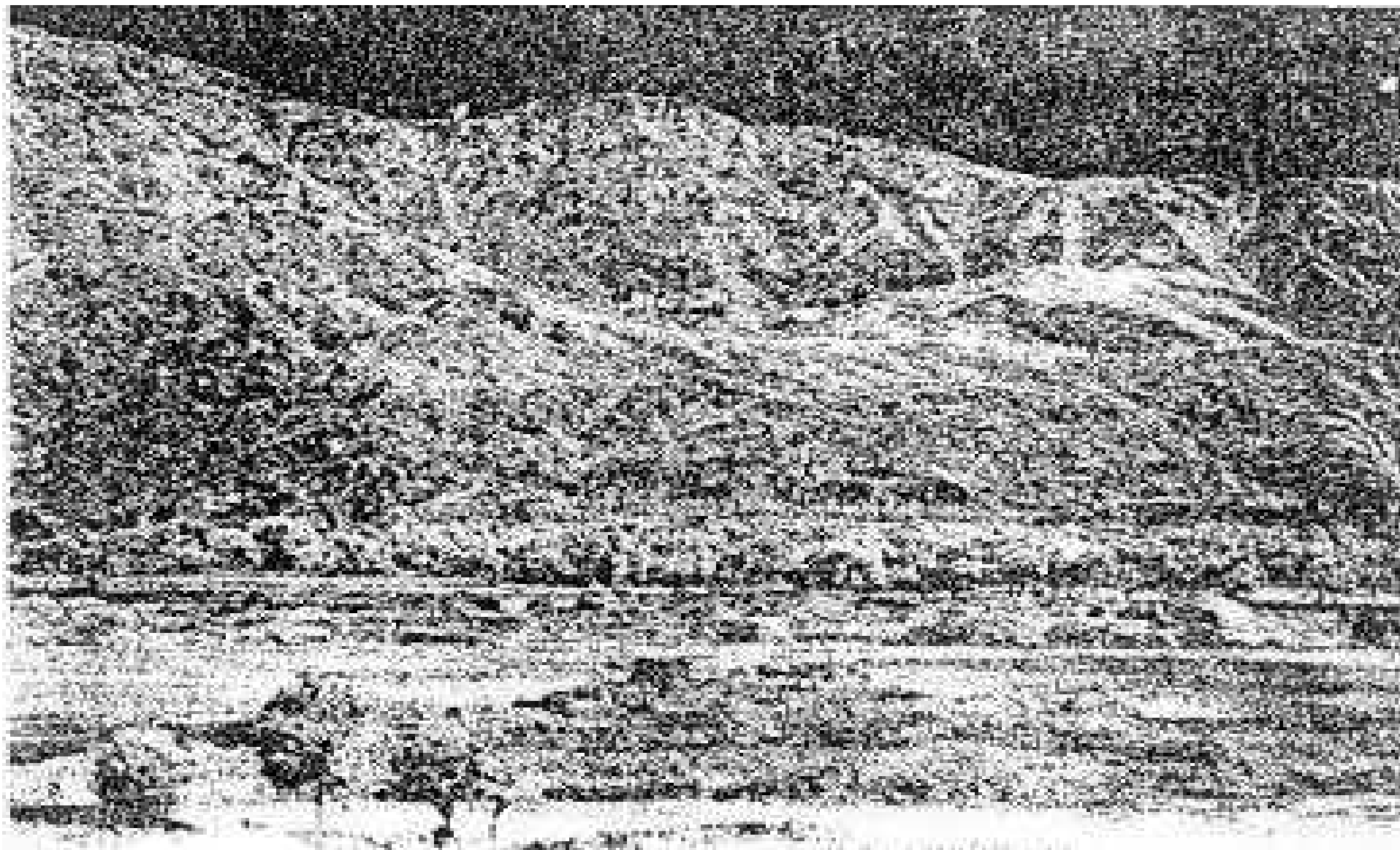


1400K

低温物体（例如人体）也有热辐射，但辐射较弱，并且主要成分是波长较长的红外线。

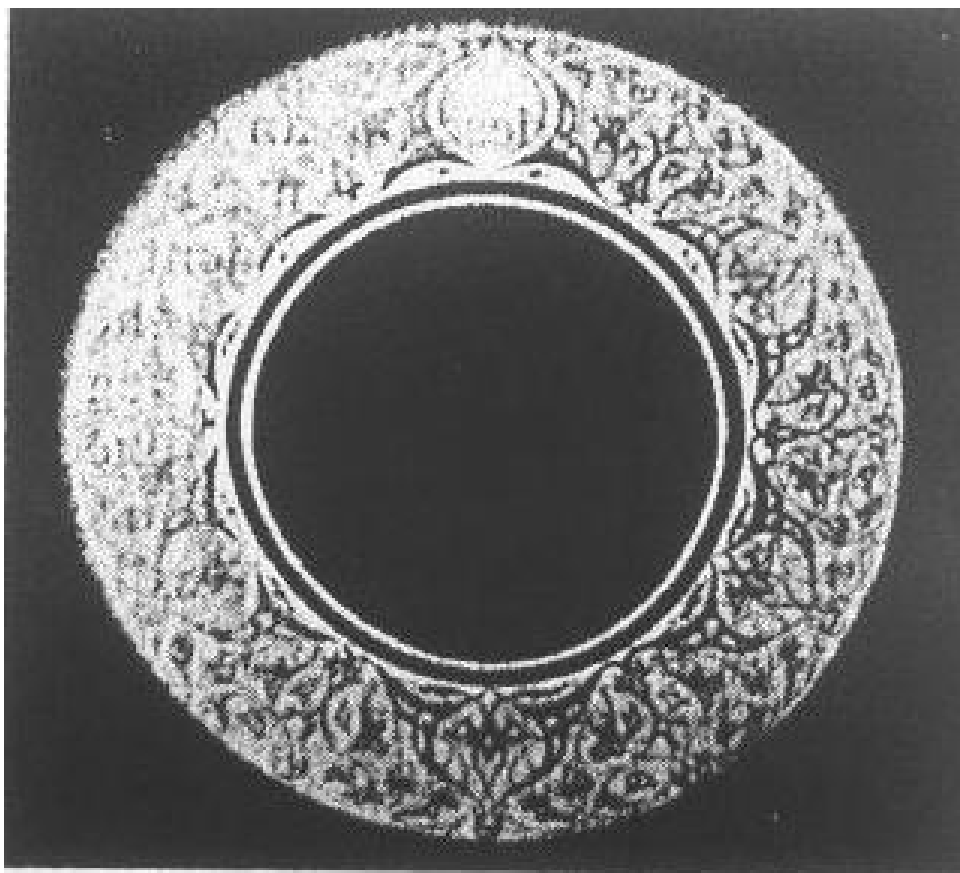


头部的红外照片（热的地方显白色，冷的显黑色）

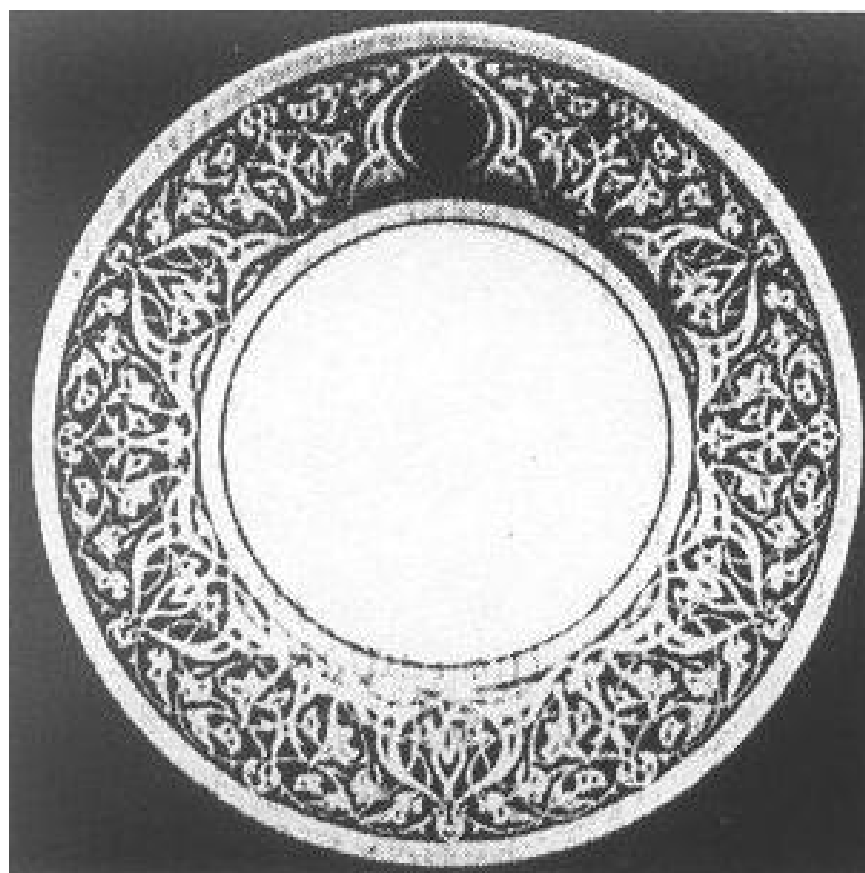


中国第一张红外照片（熊大缜于1935年在清华大学气象台顶上拍摄的北京西山夜景）





1100K, 自身辐射光



室温, 反射光

一个黑白花盘子的两张照片



鸟的羽毛的颜色
是不是热辐射？

不是，
是反射



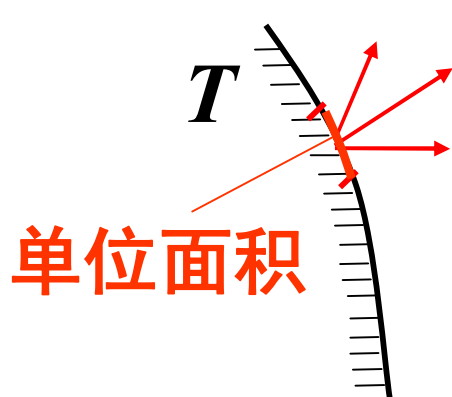
2、平衡热辐射



加热一物体，若物体所吸收的能量等于在同一时间内辐射的能量，则物体的温度恒定。
这种温度不变的热辐射称为平衡热辐射。

3、光谱辐出度（单色辐出度） M_ν

M_ν —单位时间内，从物体单位表面发出的频率在 ν 附近单位频率间隔内的电磁波的能量。



$dE_\nu (\nu \rightarrow \nu + d\nu)$ (单位时间内)

$$M_\nu = \frac{dE_\nu(T)}{d\nu}$$

M_ν 取决于 T 、 ν 和材料种类和表面情况

二 黑体辐射



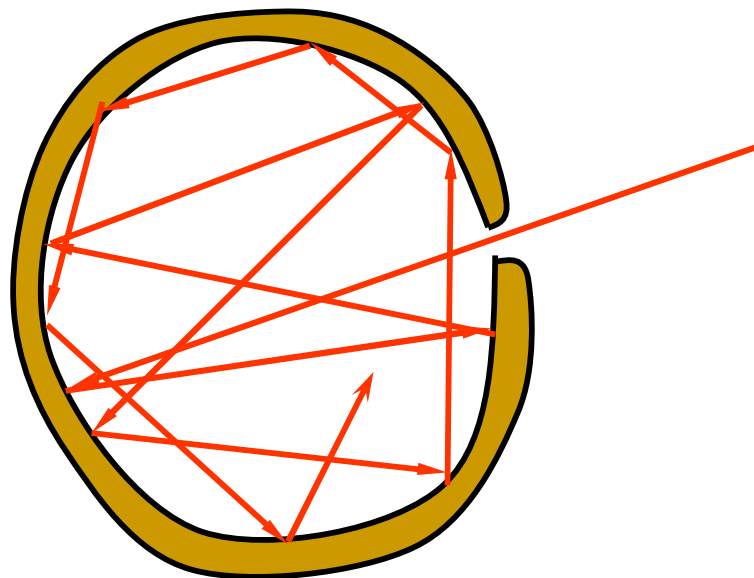
1、**黑体**：能完全吸收各种波长电磁波而无反射的物体。

注意：是没有反射，不是没有辐射。

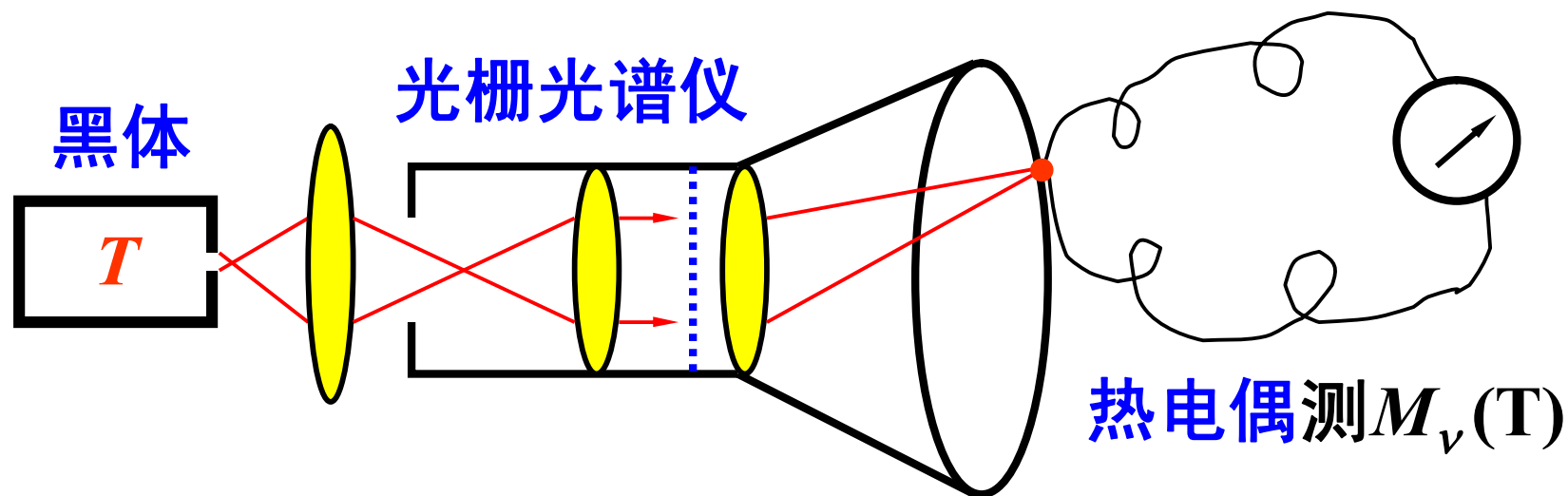
黑体是理想化模型，即使是煤黑，对太阳光的吸收也小于 99%。

维恩设计的黑体：

不透明介质空腔开一小孔，电磁波射入小孔后，很难再从小孔中射出。小孔表面是黑体。



2、黑体辐射谱 ($M_\nu \sim \nu$ 关系)



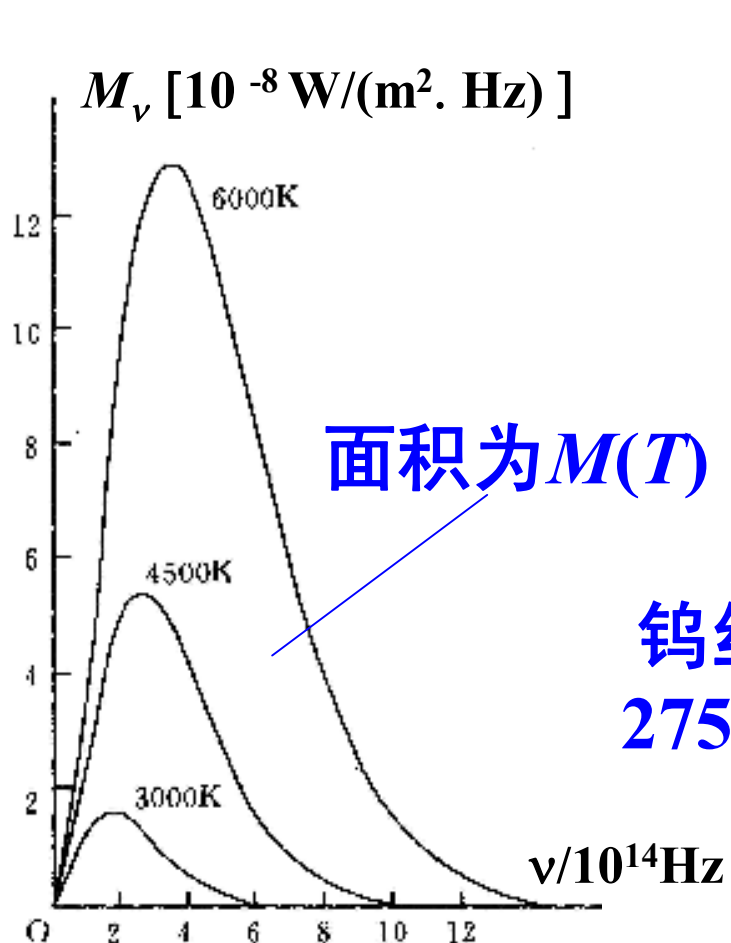
测量黑体辐射谱的实验装置

对黑体加热，放出热辐射。

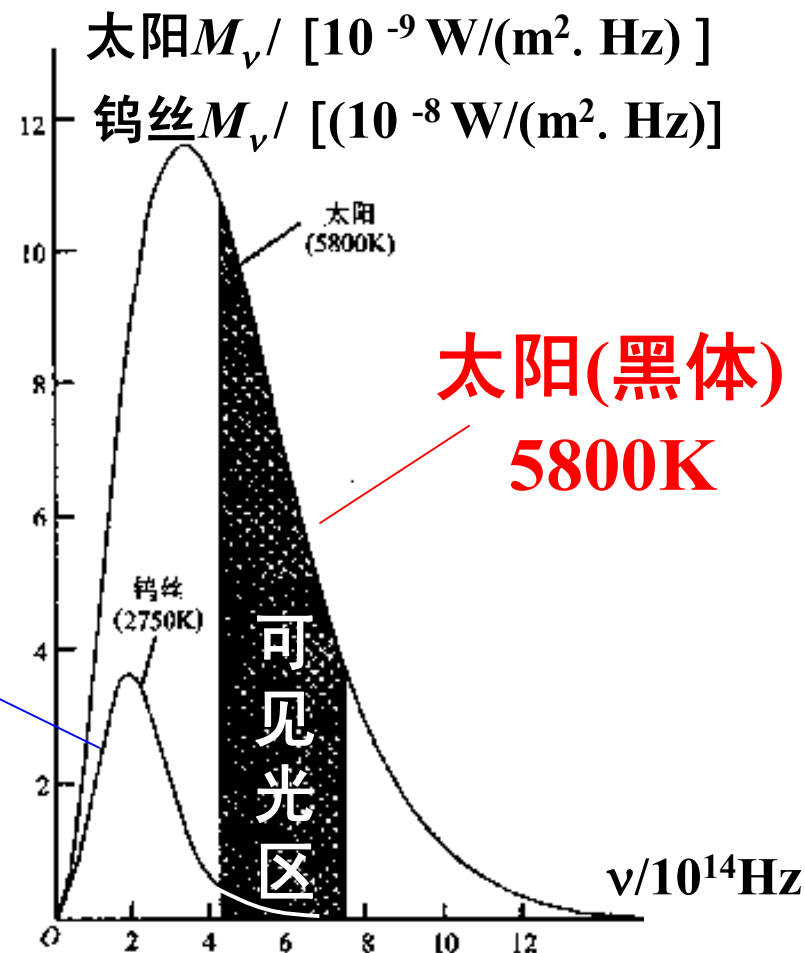
用光栅分光把辐射按频段分开。

用热电偶测各频段辐射强度，得 $M_\nu(T)$ 。

黑体辐射和热辐射实验曲线:



不同温度下的黑体辐射曲线



钨丝和太阳的热辐射曲线

3、黑体辐射定律：

(1) 维恩位移定律

1893年由理论推导而得

辐射最强频率或波长

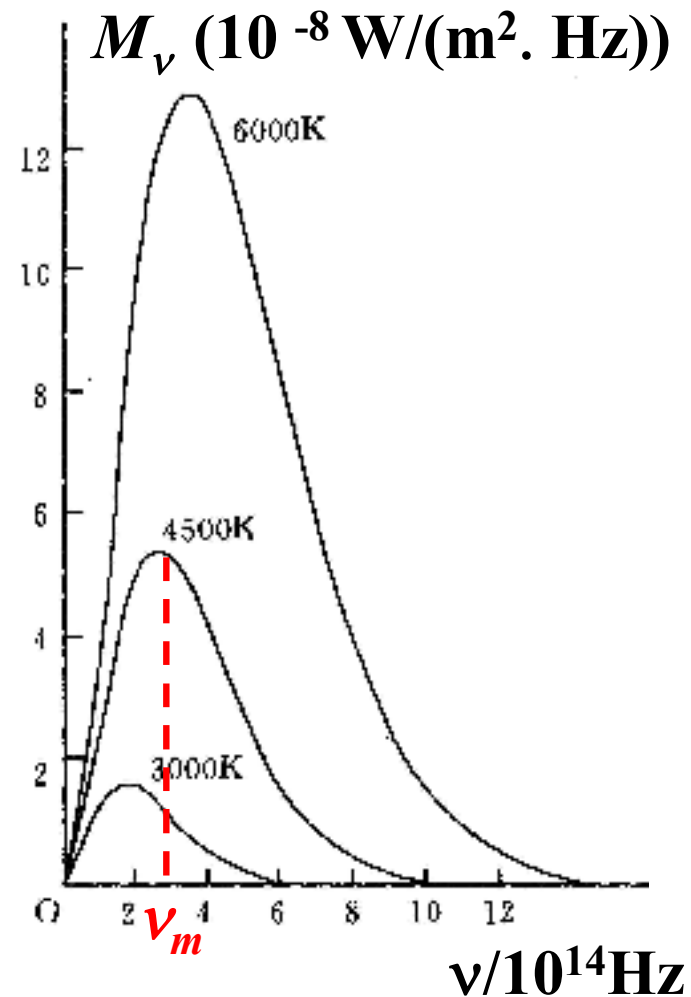
$$\nu_m = C_\nu T$$

$$C_\nu = 5.880 \times 10^{10} \text{ Hz/K}$$

或
$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

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

设太阳为黑体,测 $\lambda_m=510\text{nm}$, 得 $T_{\text{表面}} = 5700\text{K}$





(2) 斯特藩— 玻耳兹曼定律

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

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

—— 斯特藩 — 玻耳兹曼常量

1879年斯特藩从实验上总结而得

1884年玻耳兹曼从理论上证明

斯特藩 — 玻耳兹曼定律和维恩位移定律是
测量高温、遥感和红外追踪等的物理基础。

(3) 维恩公式



1896年，

维恩从经典热力学和麦克斯韦分布出发，
找到了一个关于黑体辐射的公式



$$M_{\nu}(T) = \alpha \nu^2 \exp\left(-\frac{\beta}{T}\right)$$

在高频范围内与实验符合，
但在低频范围内与实验结果
有明显的偏差。

德国物理学家（1864-1928）

1911年诺贝尔物理学奖获得者

(4) 瑞利(Rayleigh) — 金斯(Jeans)公式



1900年6月，瑞利按经典的能量均分定理，把空腔中简谐振子平均能量取与温度成正比的连续值，得到一个黑体辐射公式

$$M_\nu(T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

低频段与实验符合很好，高频段明显偏离实验曲线。

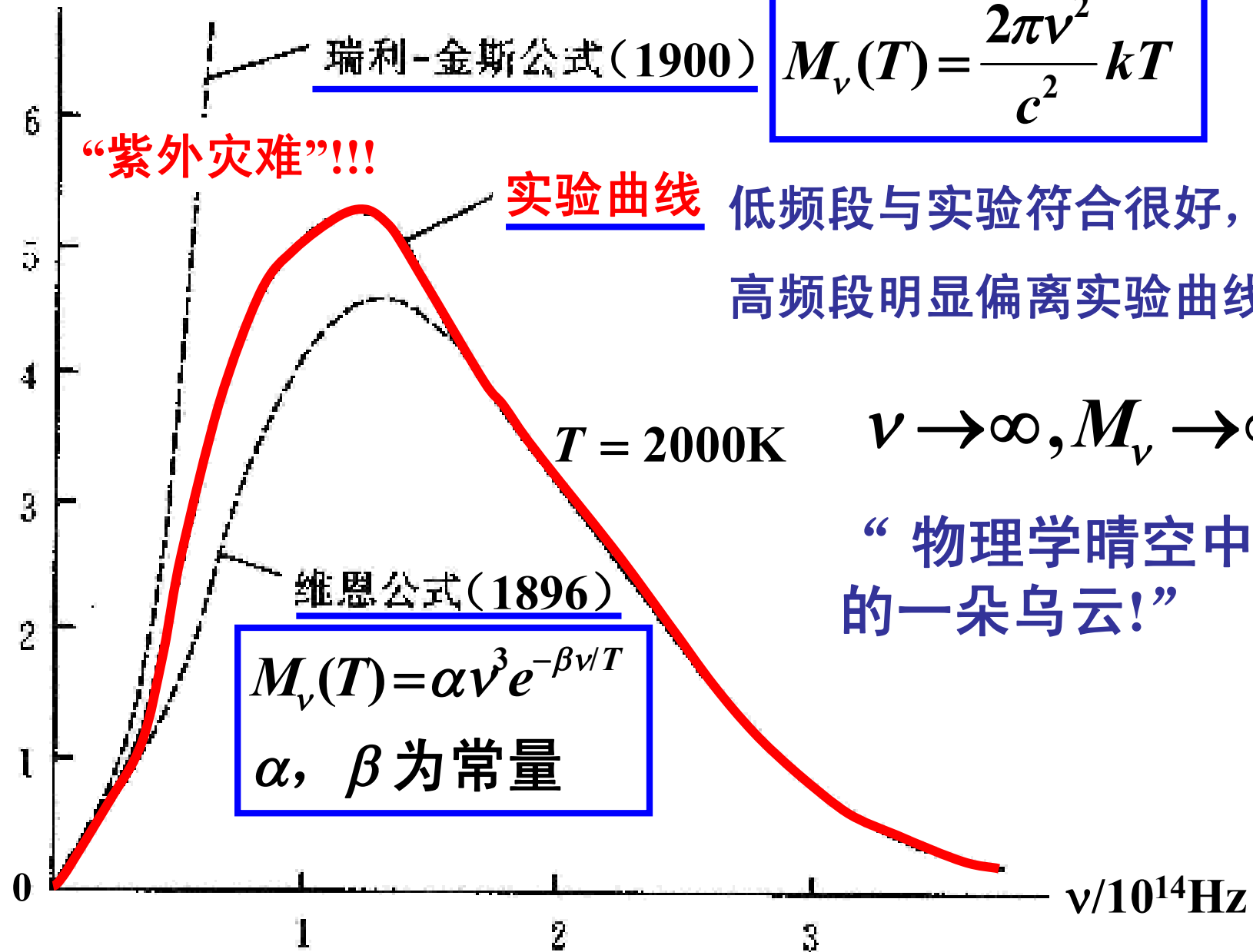
$$\nu \rightarrow \infty, M_\nu \rightarrow \infty$$

“紫外灾难”！



L. Rayleigh(1842-1919)

M_ν (10^{-9} W/(m²·Hz))



$$M_\nu(T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

$$M_\nu(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T}$$

α, β 为常量

三 普朗克的能量量子假说和黑体辐射公式



1900年10月，普朗克利用数学上的内插法，把适用于高频的维恩公式和适用于低频的瑞利-金斯公式衔接起来，得到一个半经验公式，

普朗克黑体辐射公式：

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

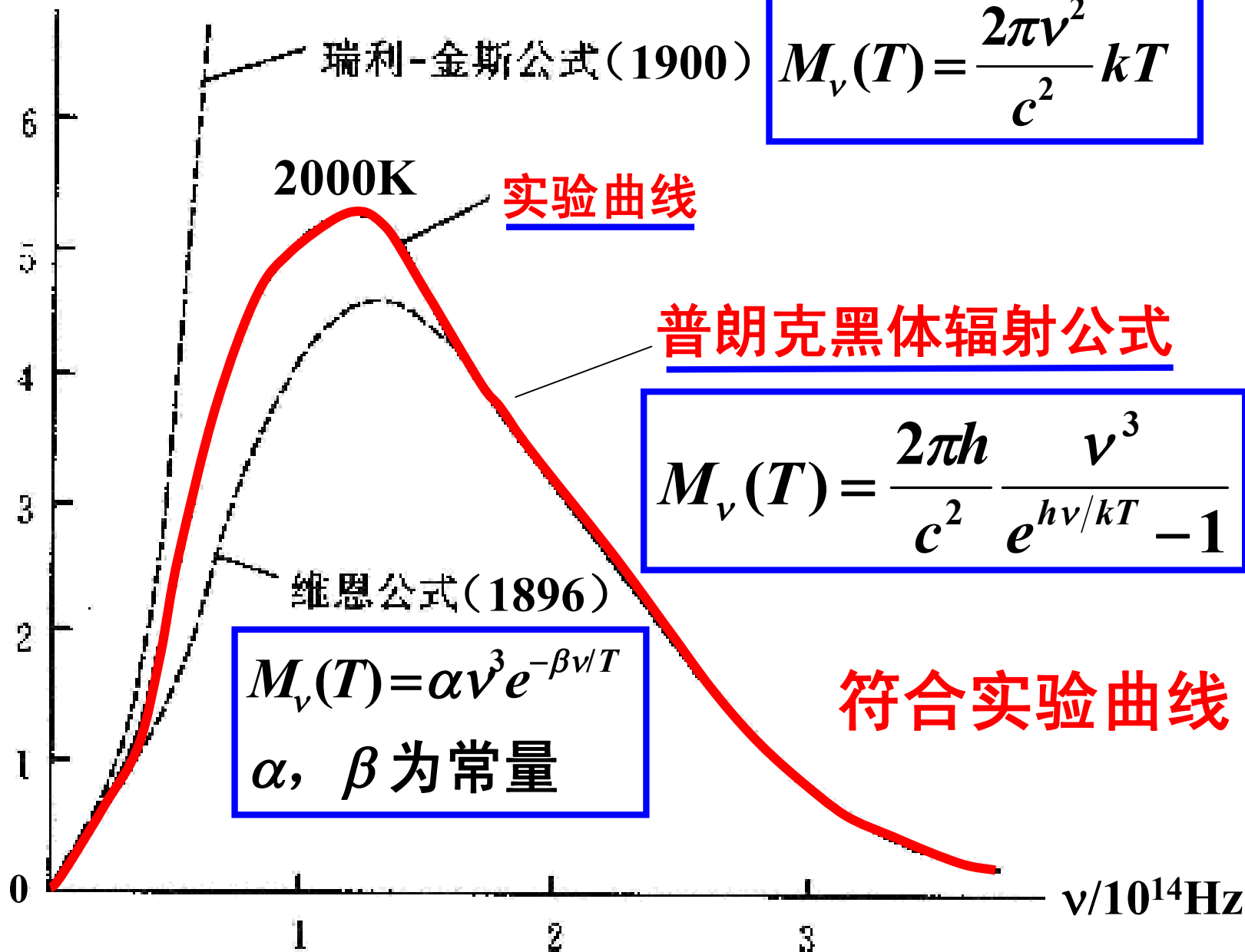
普朗克常量： $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

在全波段与实验曲线惊人地符合！



M_ν (10^{-9} W/(m² · Hz))



由普朗克公式可导出其他所有热辐射公式:



$$M_\nu(T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \Rightarrow \begin{cases} \text{积分} \rightarrow M = \sigma T^4 \\ \text{求导} \rightarrow \nu_m = C_\nu T \\ \text{低频} \rightarrow M_\nu(T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \\ \text{高频} \rightarrow M_\nu(T) = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T} \end{cases}$$

1921 年叶企孙, W.Duane, H.H.Palmer 测得:

$$h = (6.556 \pm 0.009) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

1986年推荐值: $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

1998年推荐值: $h = 6.62606876 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

一般取: $h \approx 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$



叶企孙
(1898—1977)

中国科学院学部委员

清华大学首任物理系
主任（1926）、首任
理学院院长（1929）

用X射线方法测定普
朗克常量，在国际上
沿用了16年。



普朗克不满足“侥幸猜到”的半经验公式，要“不惜任何代价”地去揭示真正的物理意义。

普朗克认为：空腔内壁的分子、原子的振动可以看成是许多带电的简谐振子，这些简谐振子可以辐射和吸收能量，并与空腔内的辐射达到平衡。从空腔小孔辐射出的电磁波，就是由这些空腔内壁的简谐振子辐射出的。

普朗克大胆地假设：频率为 ν 的简谐振子的能量值，只能取 $\varepsilon = h\nu$ 的整数倍。即，简谐振子的能量是量子化的（quantization），只能取下面的一系列特定的分立值

$$\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots$$



在这一假设基础上，再运用经典的统计物理方法就可推出普朗克黑体辐射公式。

能量 $\varepsilon = h\nu$ 称为能量子(quantum of energy)，空腔内的辐射就是由各种频率的能量子组成。上述假设称为普朗克能量子假设。

能量子概念的提出标志了量子力学的诞生，普朗克为此获得1918年诺贝尔物理学奖。





能量子的假设对于经典物理来说是离经叛道的，就连普朗克本人当时都觉得难以置信。为回到经典的理论体系，在一段时间内他总想用能量的连续性来解决黑体辐射问题，但都没有成功。

直到1911年，他才真正认识到：
量子化的全新的、基础性的意义，
它是根本不能由经典物理导出的。



**在1918年4月普朗克六十岁生日庆祝会上，
爱因斯坦说：**

在科学的殿堂里有各种各样的人：有人爱科学是为了满足智力上的快感；有的人是为了纯粹功利的目的。而普朗克热爱科学是为了得到现实世界那些普遍的基本规律，这是他无穷的毅力和耐心的源泉。... ..他成了一个以伟大的创造性观念造福于世界的人。



在吸收、辐射时
光是量子化的。

普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck)

1858—1947 (1918年诺贝尔物理学奖)