



# 量子力学与统计物理

Quantum mechanics and  
statistical physics

光电科学与工程学院 王智勇

# 课程简介

- 考核方式

笔试

- 成绩构成

平时考核20%，中期考核20%，期末考核60%

- 学习目的

掌握理工科生必备的科学基础知识；为学习固体物理、半导体理论、激光物理、量子信息与量子计算等课程作准备；为从事科学研究和技术研发奠定必要的基础；培养学生的科学理念和创新精神。

# 学习量子力学的方法

- 逐渐摆脱经典物理思维方式的束缚，避免先入之见
- 有些地方暂时不好理解时，不要产生抵触情绪，先熟悉内容和接受那些结论，在随后深入学习的过程逐渐去体会、去理解它们
- 习题训练有利于加强理解和掌握，也有利于培养利用量子力学解决实际问题的能力

# 学习量子力学的方法

1. 对物理理论——物理概念、物理假设（公设、定律）、物理模型、试着解决如下问题：

——提出时的历史背景是什么？

——如何表述？为什么要这么表述？

——它解决了什么问题？

2. 懂了你就接受它，没懂你就暂时记住它！

“我脑中懂量子力学，但心中却不懂。”

——爱因斯坦

# 学好量子力学要打破经典物理的传统理念

量子力学告诉我们：自然界从物理本质上就是随机的，存在内在的随机性。

这种随机性与丢硬币时正反面朝上时遇到的随机性，或者与经典统计力学中气体分子运动的随机性，都有着本质的不同，经典力学中的随机性是因为对物理细节的信息了解不够造成的，或者是因为数学求解困难造成的，而在原则上仍然属于确定论的。

# 学好量子力学要打破经典物理的传统理念

量子力学告诉我们：**主客体不可分**

过去人们认为一个东西是什么，不依赖于我们如何观测它。但是量子力学将会告诉我们：在对一个东西实行观测之前，我们谈论它是什么，是没有意义的；而且它到底是什么，取决于我们如何观测它。针对同一个对象进行不同的观测，可以得到相互矛盾的结果，但它们都对。量子力学让我们深入到更本质的层面上看问题。

测量仪器与被观测对象形成纠缠——量子测量理论。

## 问题思考： 自然界存在“颜色” 这个东西吗？

我们很容易习以为常地认为，颜色是大自然里客观存在的一种东西。

但实际上，并不存在与颜色对应的物质，大自然本身并不存在诸如红色、绿色这种东西，颜色只是大脑对可见光不同频率的一种主观反应，而且这种反应对于其他生物不一定有，即使有也不一定相同。

蝙蝠是通过超声波来看见东西的，它对声音的感知类似于我们对光波的感知。

人无法感知红外线和紫外线，而蛇感知的是红外线。我们无法预知外星智慧生命是如何感知这个世界，它们对这个世界可以形成完全不同的画面。

**量子力学与经典物理也不是完全割裂开来的，而是存在密切联系**

- 量子力学是经典物理的进一步深入和准确化、精确化，是对大自然更为本质化描述的理论体系
- 经典物理是量子力学的宏观平均和近似



# 目 录

第一章	绪论(量子力学的诞生) (4课时)
第二章	波函数和薛定谔方程 (8课时)
第三章	量子力学中的力学量(8课时)
第四章	态和力学量的表象 (6 课时)
第五章	求解定态薛定谔方程实例 (8课时)
第六章	微扰理论 (8课时)
第七章	自旋与全同粒子 (6课时)
第八章	统计力学原理 (6课时)
第九章	波耳兹曼统计(4课时)
第十章	玻色统计与费米统计 (6课时)

# 教学主要内容和初步时间安排（考虑节假日）

周次	教学内容
1	绪论 (量子力学的诞生)
2	波函数和薛定谔方程
3	波函数和薛定谔方程
4	量子力学中的力学量
5	量子力学中的力学量
6	量子力学中的力学量
7	态和力学量的表象
8	态和力学量的表象
9	求解定态薛定谔方程实例
10	求解定态薛定谔方程实例
11	微扰理论
12	微扰理论
13	微扰理论
14	自旋与全同粒子
15	统计力学原理
16	玻尔兹曼统计
17	玻色统计和费米统计

# 建议教材及参考资料

## 教材

杨亚培，张晓霞，吴志明，《光电物理基础》（量子力学与统计物理部分），电子科技大学出版社，2009年。

## 参考资料

- 1、周世勋，《量子力学简明教程》，人民教育出版社，2006年
- 2、张永德，《量子力学》，科学出版社，2008年
- 3、曾谨言，《量子力学》卷I（第五版），科学出版社，2017年
- 4、钱伯初，曾谨言，《量子力学习题精选与剖析》（第三版），科学出版社，2006年
- 5、汪志诚，《热力学与统计物理》（第四版），高等教育出版社，2008年

# 第一章 量子力学的诞生

- § 1 经典物理学的困难
- § 2 量子论的诞生
- § 3 实物粒子的波粒二象性

# 量子力学的诞生

## 第一讲：普朗克公式

# 1. 经典物理学的巨大成就

## 经典物理学三大支柱

- 17世纪建立的力学体系
- 19世纪建立的电动力学
- 19世纪建立的热力学和统计物理学



## 主要成就：

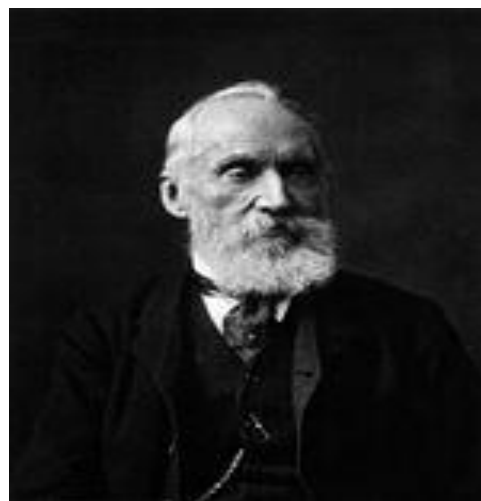
1. 牛顿力学——确定了宏观经典粒子的运动规律；
2. 电动力学——确定了电磁相互作用和电磁波的运动规律；
3. 统计力学——揭示含大量粒子运动的统计规律性。

牛顿力学一般化和系统化，引入广义坐标、广义速度、广义动量等概念，发展成为变成理论力学或分析力学，两种等价描述：拉格朗日力学，哈密顿力学。现代产生非线性力学分支，研究分形分维，混沌自相似，孤立子等

世纪之交的科学随想



上世纪之交的1900年4月27号



开尔文勋爵

物理大厦已经落成，所剩只是  
一些修饰工作而已 (There is nothing  
new to be discovered in physics now. All that  
remains is more and more precise  
measurements)

但它美丽而晴朗的天空却正被两朵小小的乌云笼罩着。

(two small, puzzling clouds remained on the horizon)

——开尔文勋爵 《在热和光动力理论上空的十九世纪乌云》

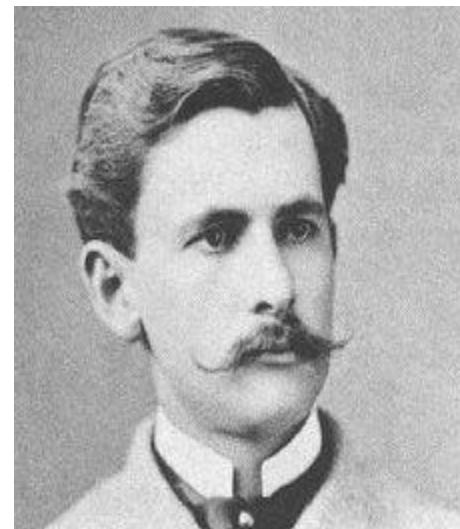
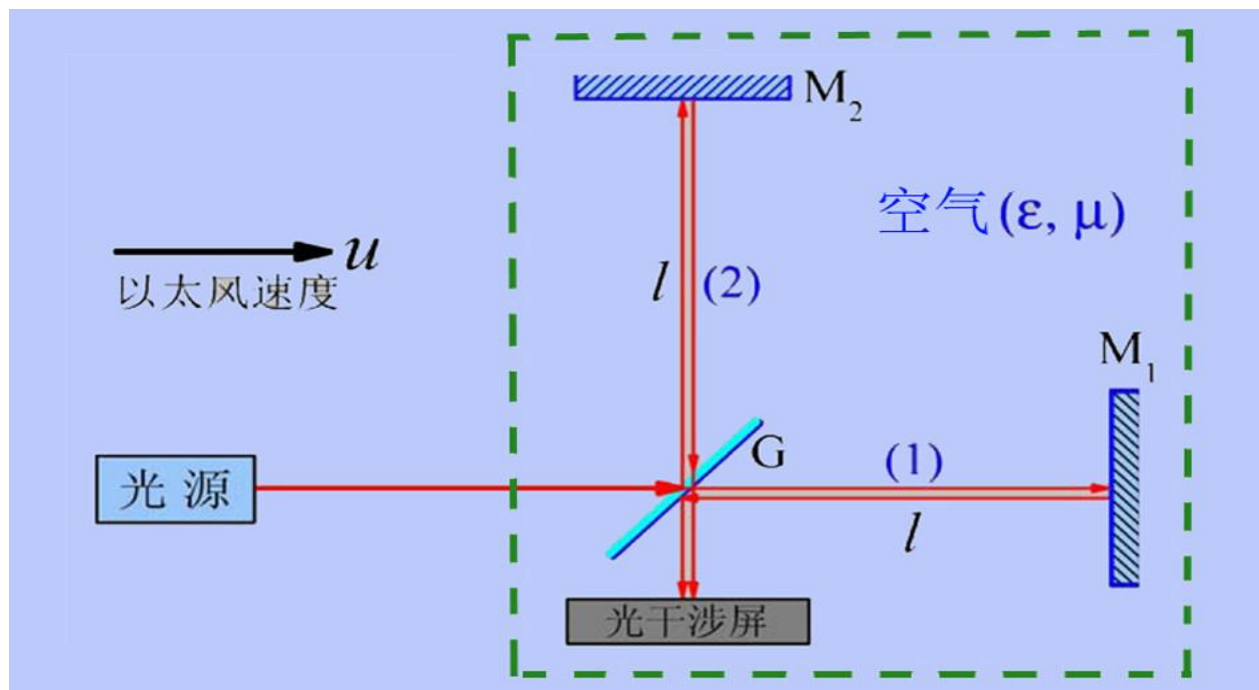
## 2. 两朵乌云与现代科学的产生





# 乌云1：迈克尔逊-莫雷实验

1907年诺贝尔物理学奖



迈克尔逊

**理论：** 地球的运动能带动以太，光速应是相对“以太”的；两光路互换应引起0.4条干涉条纹的移动！

**实验：** 所有实验表明干涉条纹不动，说明：要么以太是绝对静止的！要么光速不随光源的运动而变化。

1905年，爱因斯坦抛弃以太、认为电磁波**光速不变**，并结合相对性原理，建立狭义**相对论**。

光速不变 $\Rightarrow$ 运动的时钟变慢，运动物体在运动方向上缩短，运动质量不恒定 $\Rightarrow$   
“质量-能量”转换 $\Rightarrow E = mc^2$

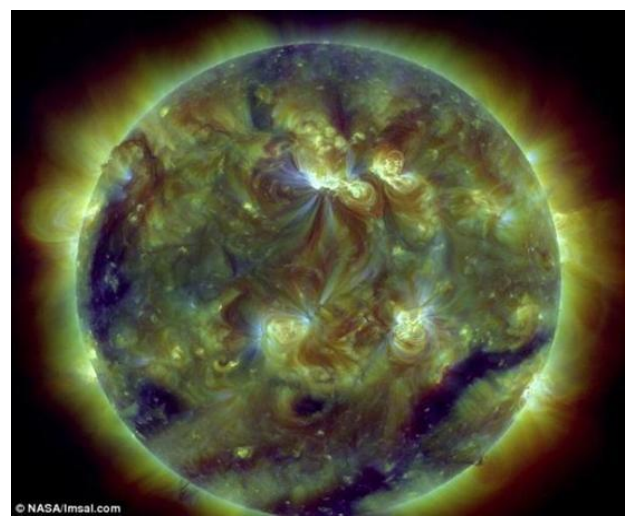
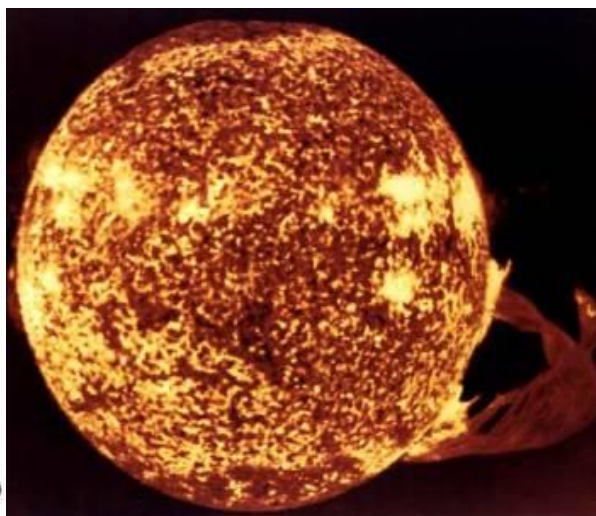
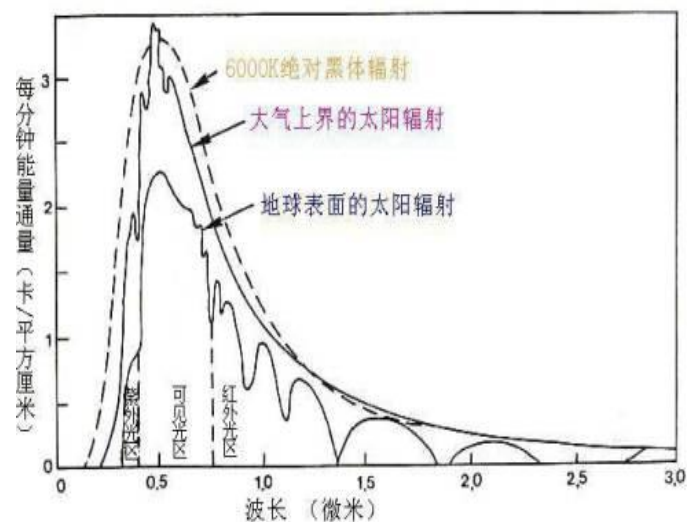
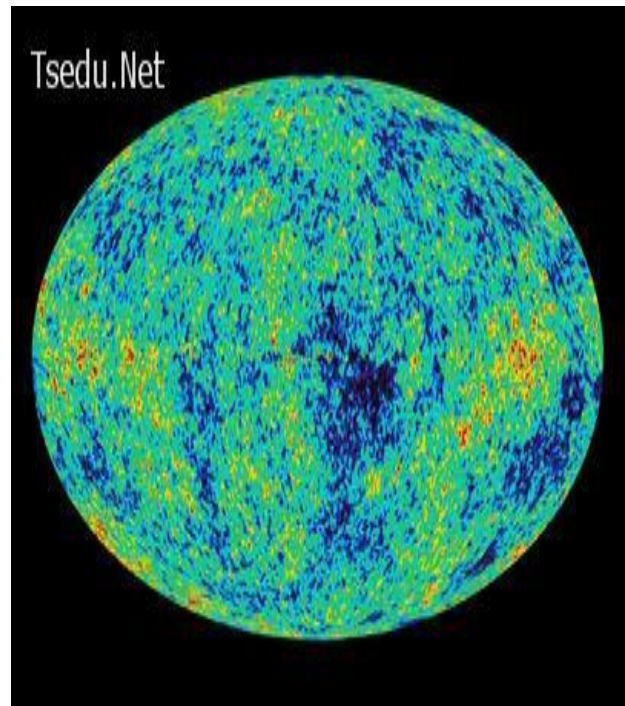
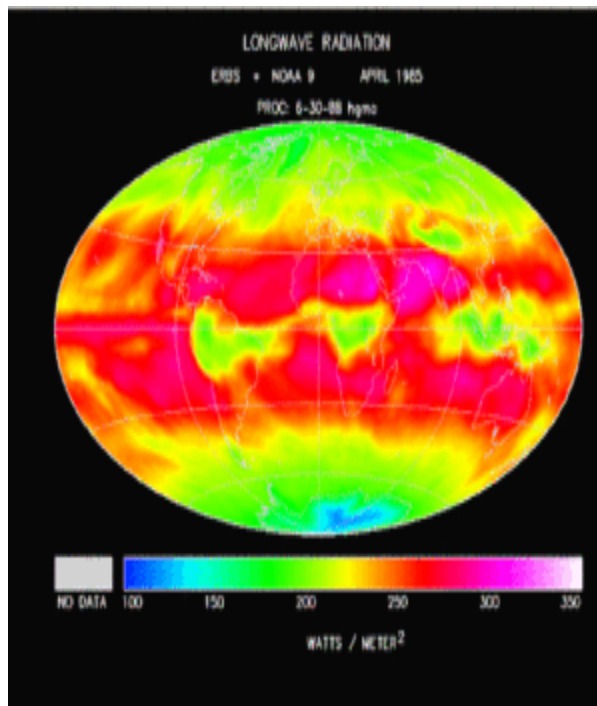
我只是解决了一个问题，但是

**提出一个问题远比解决一个问题重要！**

解决一个问题也许仅仅是一个数学或实验上的技能而已，而提出新的问题，却需要创造性的想象力，它标志着科学的真正进步。

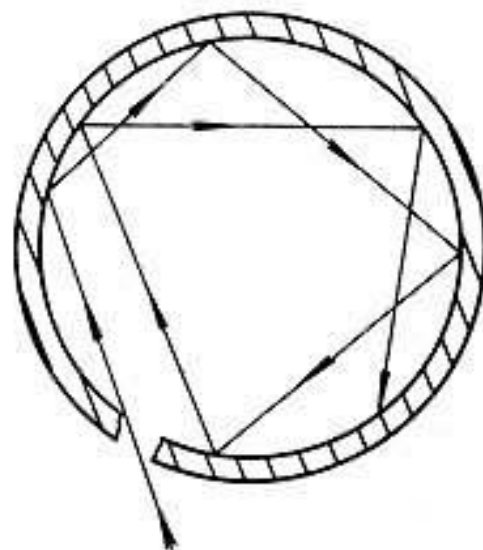
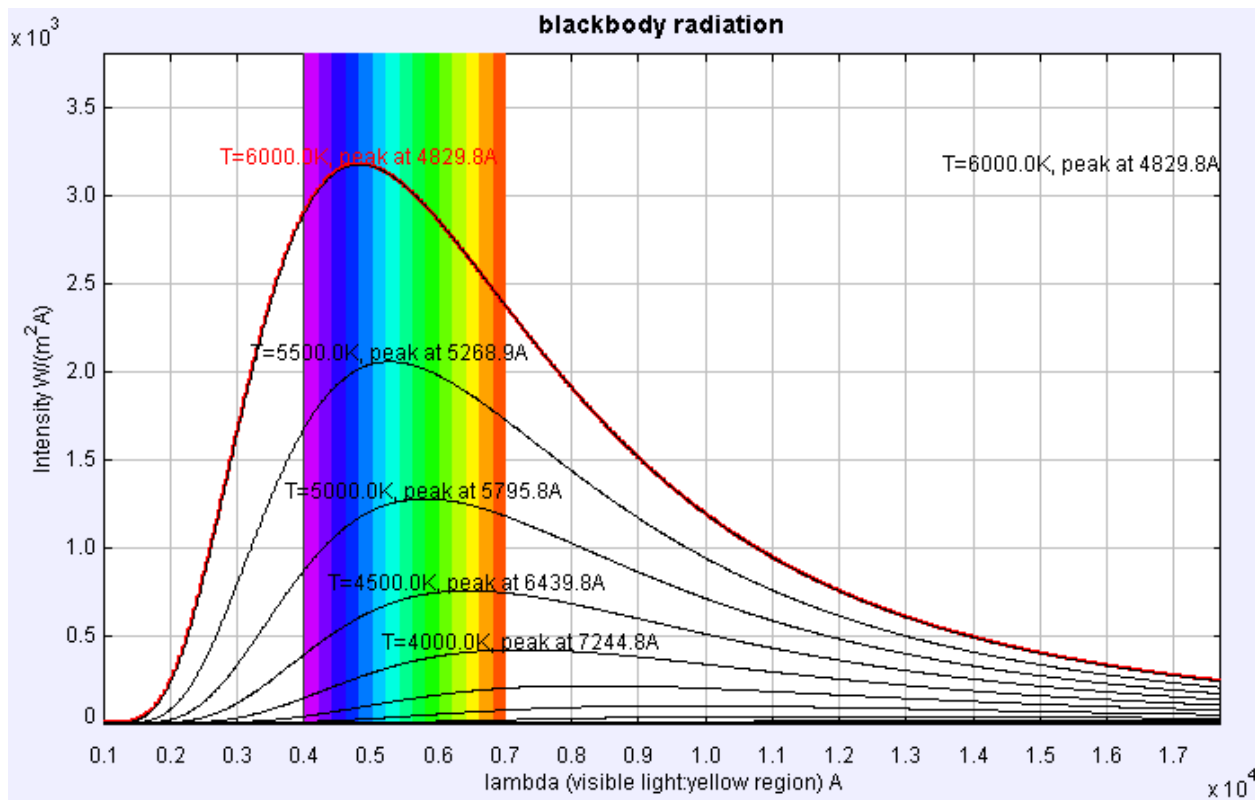
——爱因斯坦

# 乌云2：热辐射问题



# 黑体实验：

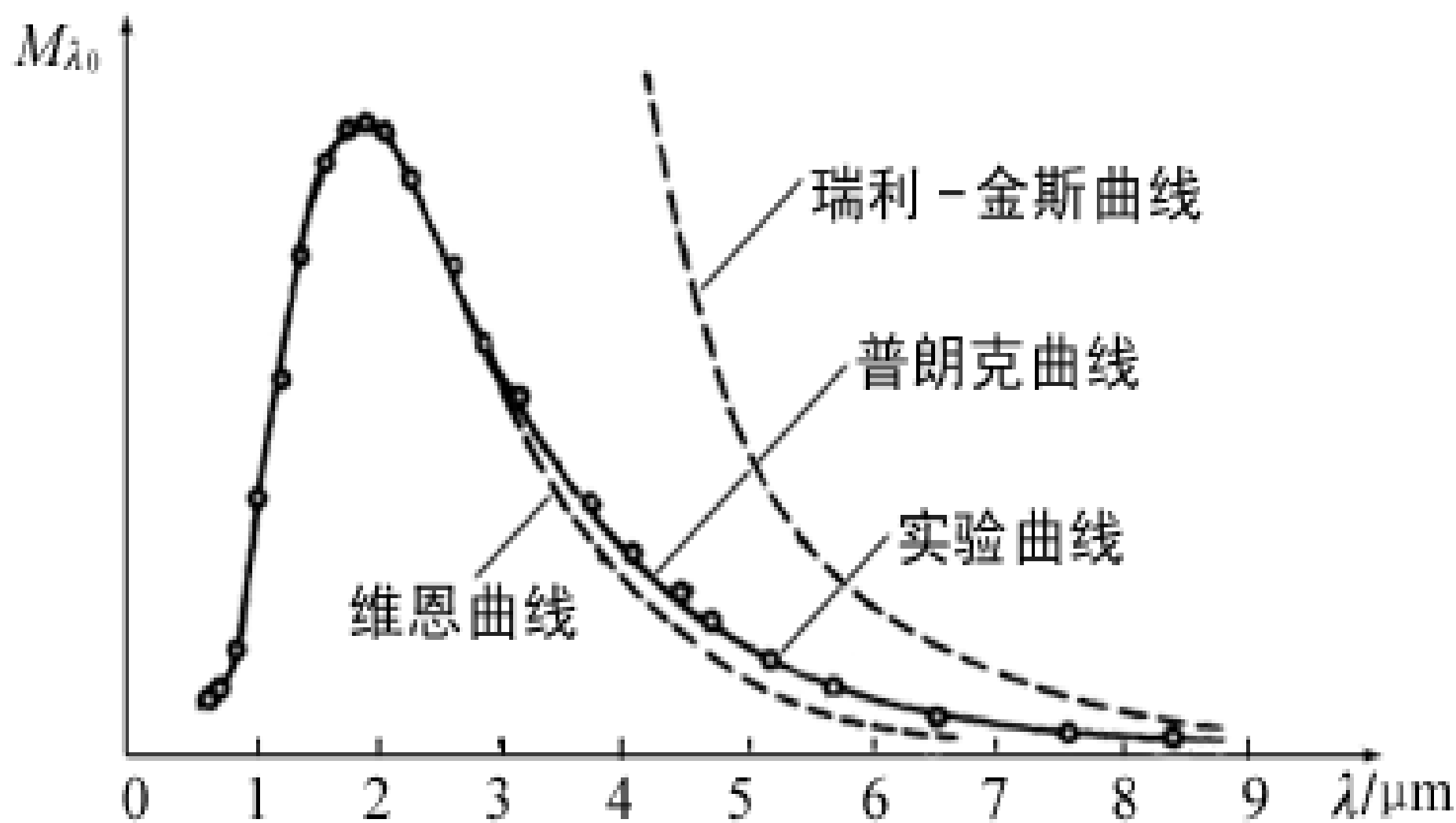
黑体：能吸收射全部辐射的物体称为绝对黑体，简称黑体。



用空腔上的小孔近似地代替黑体

- 有温度的物体都会向周围发出辐射，与材料无关
- 温度越高能量越强，且光谱的最大值对应的波长向短波方向移动

# 理论解释:





# (1) 维恩 (Wein—德国物理学家, 1864-1928) 的解释

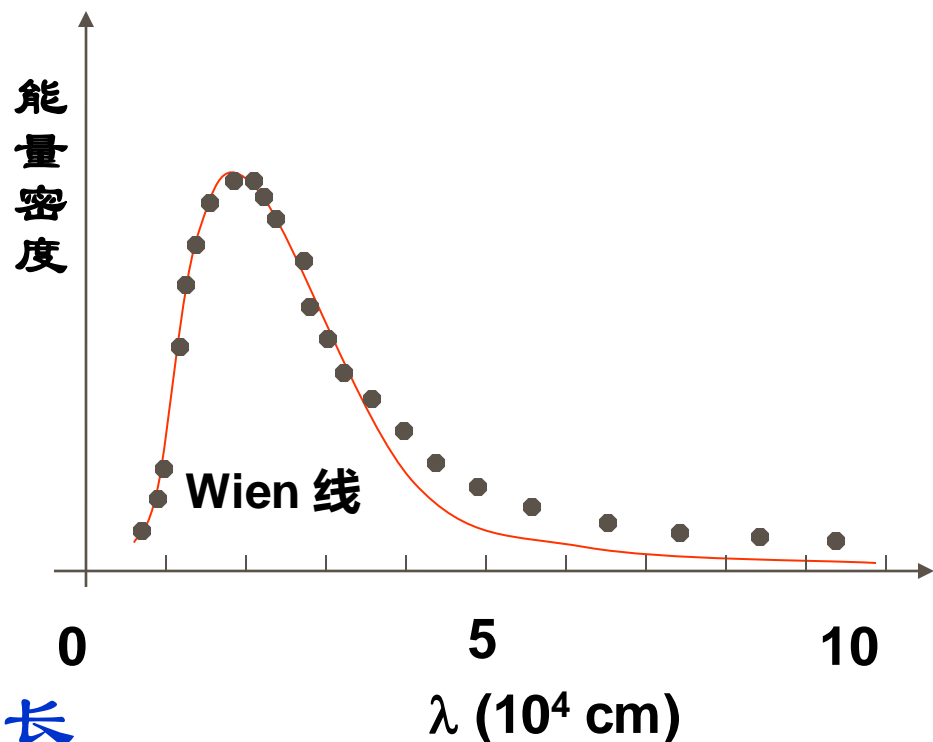
● 1893年, 维恩根据经典热力学得出:

$$\rho(\lambda, T) = \frac{a_1 c^3}{\lambda^3} \exp(-a_2 c / \lambda T)$$

$$\rho(\nu, T) = a_1 \nu^3 \exp(-a_2 \nu / T)$$

**特点:** 短波符合得比较好, 长波 (低频) 部分与实验发现明显不一致

获1911年诺贝尔物理学奖



## (2) 瑞利—金斯 (Raileigh-Jeans 英国物理学家) 的解释

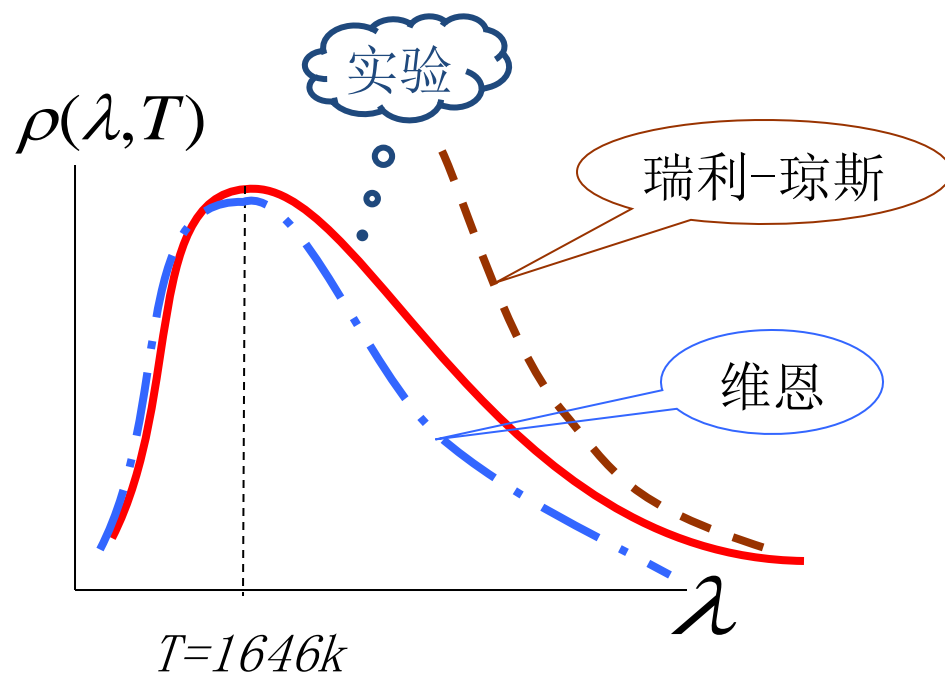
● 1900年，瑞利和金斯用能量均分定理和电磁理论得出：

$$\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{c\lambda^2} \propto \lambda^{-2}$$

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT$$

**特点：**在长波（低频）部分与实验符合，短波部分明显不符。

存在“紫外光的灾难”



$$\int_0^{\infty} \rho(\nu) d\nu = \int_0^{\infty} \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT d\nu \rightarrow \infty$$

### (3) 普朗克的能量量子假说

1900年12月14日，在德国物理学会的一次会议上，普朗克宣读了他的论文《正常光谱的能量分布理论》

1) 黑体可看作一组连续振动的谐振子，这些谐振子的能量应取分立值，这些分立值都是最小能量 $\varepsilon$ 的整数倍。

$$E = n\varepsilon \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

2) 黑体吸收或发射电磁辐射时，能量是不连续的，只一份一份地进行，每一份称为一个能量子，“能量子”的能量由振动频率决定：

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega \quad (\hbar = h/2\pi)$$



Planck-德国物理学家  
(1858-1947)



## 能量子假说解释黑体辐射：

根据玻尔兹曼分布，**能量连续时**

在能量 $E$ - $dE$ 间的分布概率为：
$$p(E) = \frac{\exp(-E/kT)}{\int_0^{+\infty} \exp(-E'/kT)dE'}$$

辐射的平均能量：

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \int_0^{+\infty} E p(E) dE = \frac{\int_0^{+\infty} E \exp(-E/kT) dE}{\int_0^{+\infty} \exp(-E'/kT) dE'} \\ &= -kT \frac{\left[ E \exp(-E/kT) \right]_0^{\infty} - \int_0^{+\infty} \exp(-E/kT) dE}{\int_0^{+\infty} \exp(-E'/kT) dE'} = kT\end{aligned}$$

## 若能量不连续 (量子化)

在  $E$ - $dE$  间的分布概率：

$$\frac{e^{-E/kT}}{\int_0^{\infty} e^{-E/kT} dE} \xrightarrow{E=nh\nu} \frac{e^{-nh\nu/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/kT}}$$

此时，辐射的平均能量：

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu \exp(-nh\nu / kT)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-nh\nu / kT)} = -h\nu \frac{d}{dx} \ln \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-nx) \\ &= h\nu \frac{d}{dx} \ln(1 - e^{-x}) = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (x = h\nu / kT)\end{aligned}$$

$$kT \Rightarrow \frac{h\nu}{\exp(nh\nu/kT) - 1}$$

把

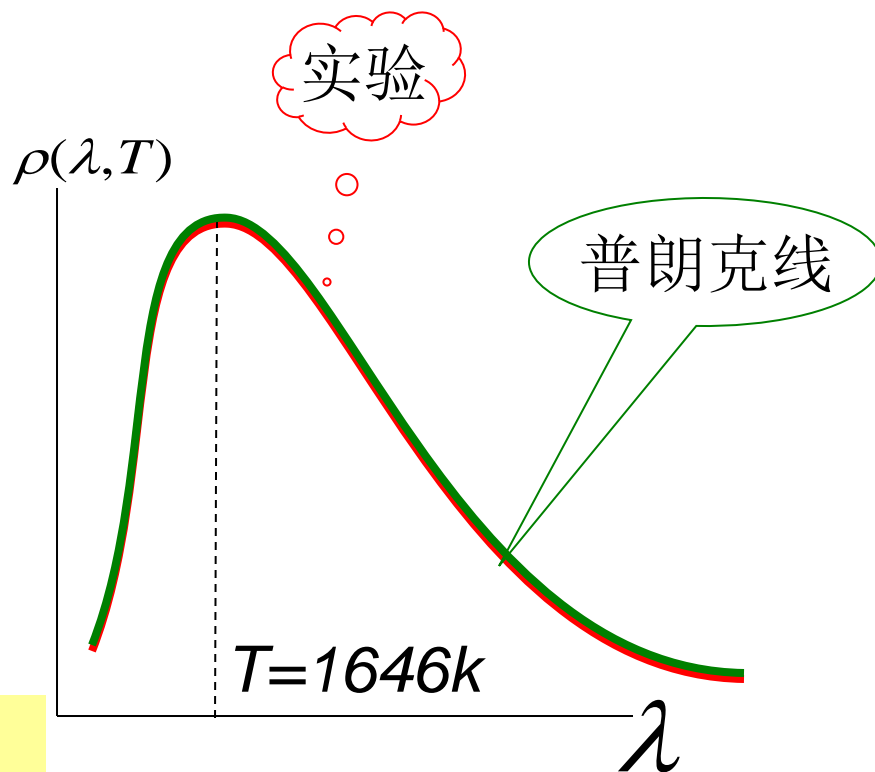
$$kT \Rightarrow \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

代入瑞利—金斯：

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT d\nu$$

得Planck公式：

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu$$



其中  $h = 6.62559 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  (称为Planck常数)

## 分析：普朗克的创新点

(1) 电磁辐射的能量是**不连续的**

$$E = n\varepsilon, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

(2) 电磁辐射的最低能量与**频率**有定量关系

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

(3) 普朗克公式与实验发现**全波段**相符

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu$$

• 可见，Planck理论突破了经典物理学的束缚，打开了量子物理学的大门。1900年12月14日被认为是量子力学的诞辰日，Planck也被称为量子力学之父。

## ● 马克斯·普朗克 (1858-1947)

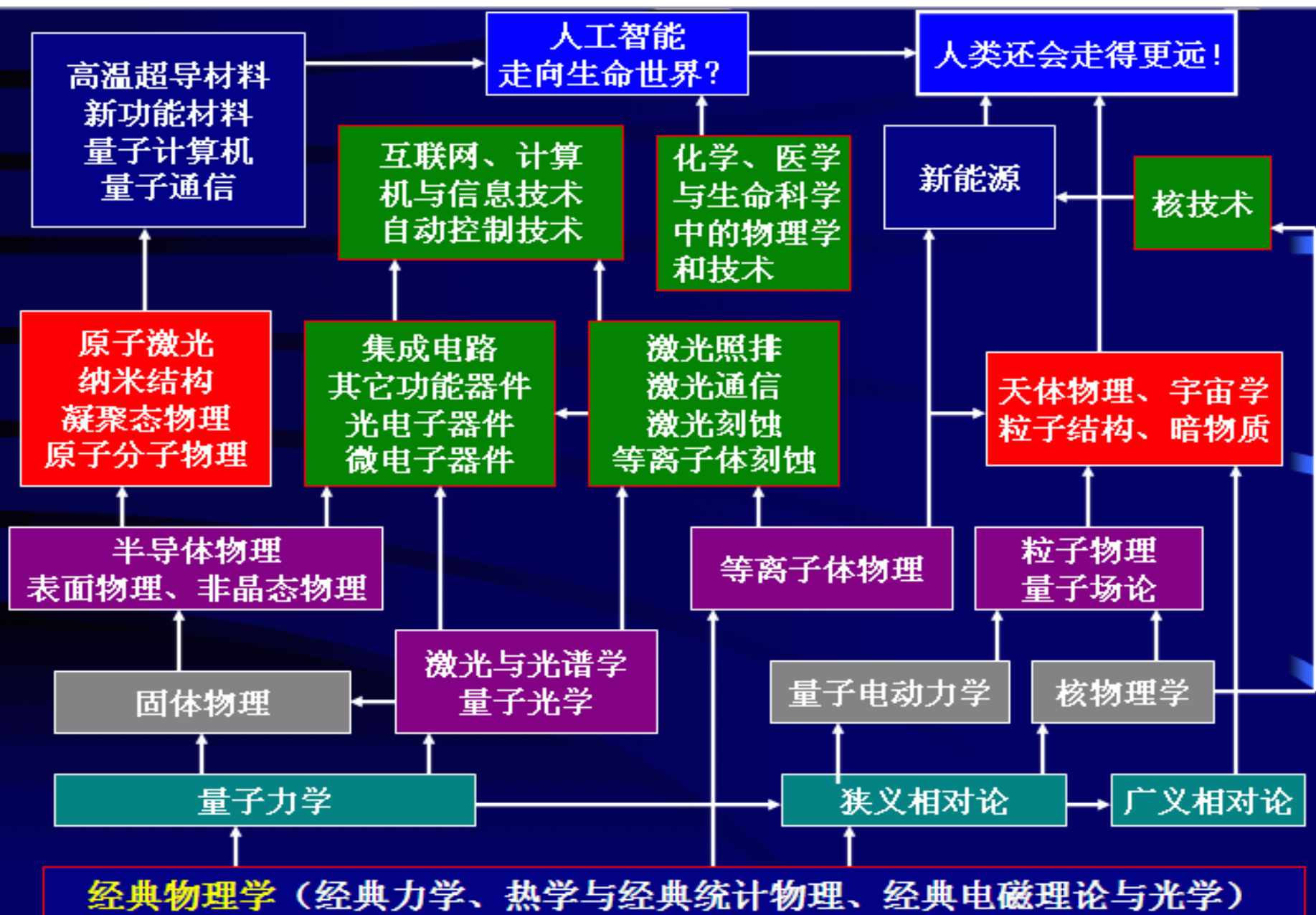
德国理论物理学家。1874年进入慕尼黑大学。最初他主攻数学，随后爱上了物理学。

普朗克的一生在科学上提出了许多创见，但贡献最大的还是1900年提出的能量子假说和普朗克公式。

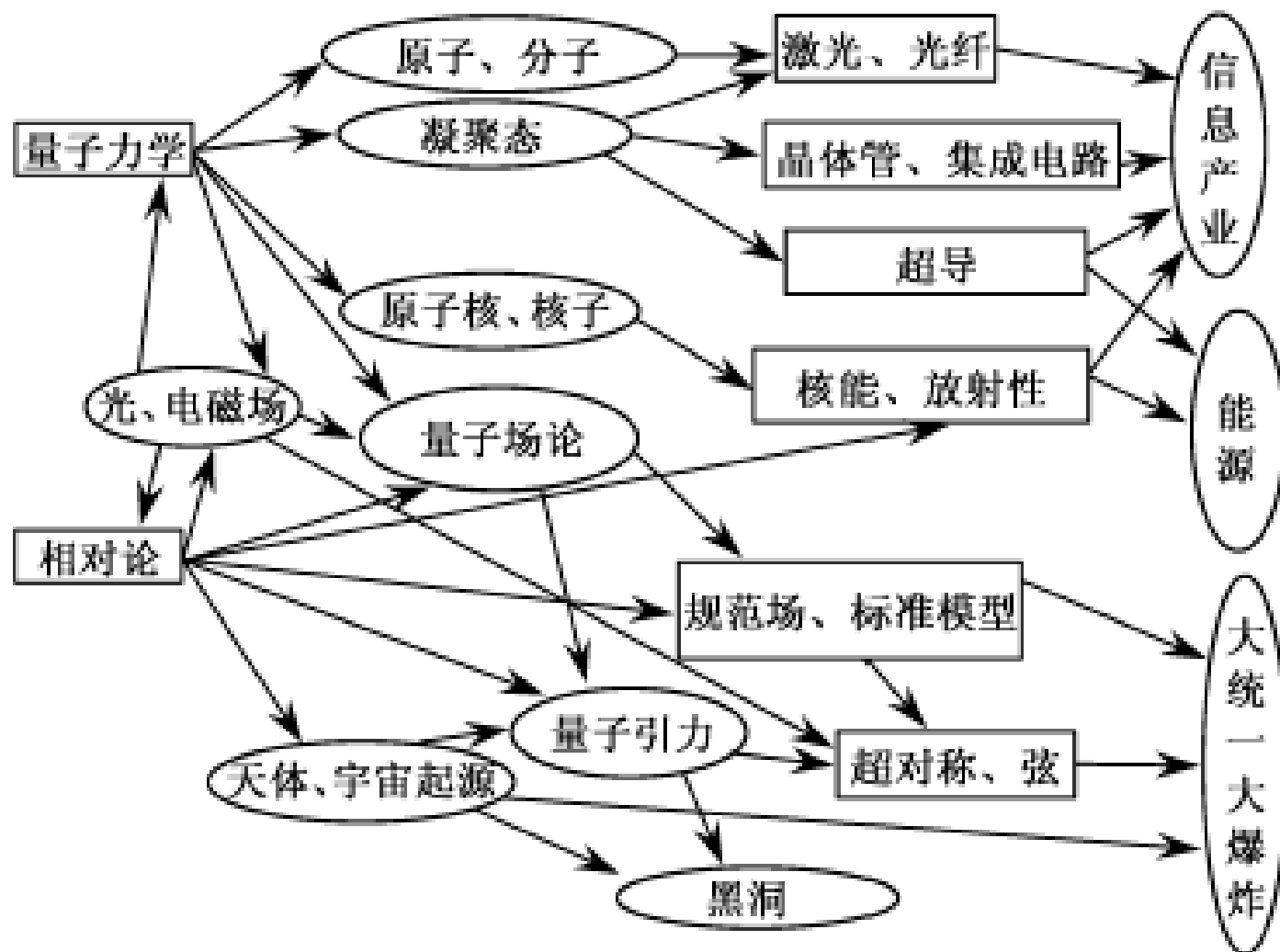
能量子假说的提出对量子论的发展起了决定性的作用。因此，普朗克于1918年荣获诺贝尔物理学奖。他提出能量子假说的日子被认定为**量子力学创建之日**。他本人荣为“**量子力学之父**”。

爱因斯坦在1948年悼念普朗克大会上致悼词时，说道“一个以伟大的**创造性观念**造福于世界的人，不需要后人来赞扬。他的成就本身就已给了他一个更高的报答”。

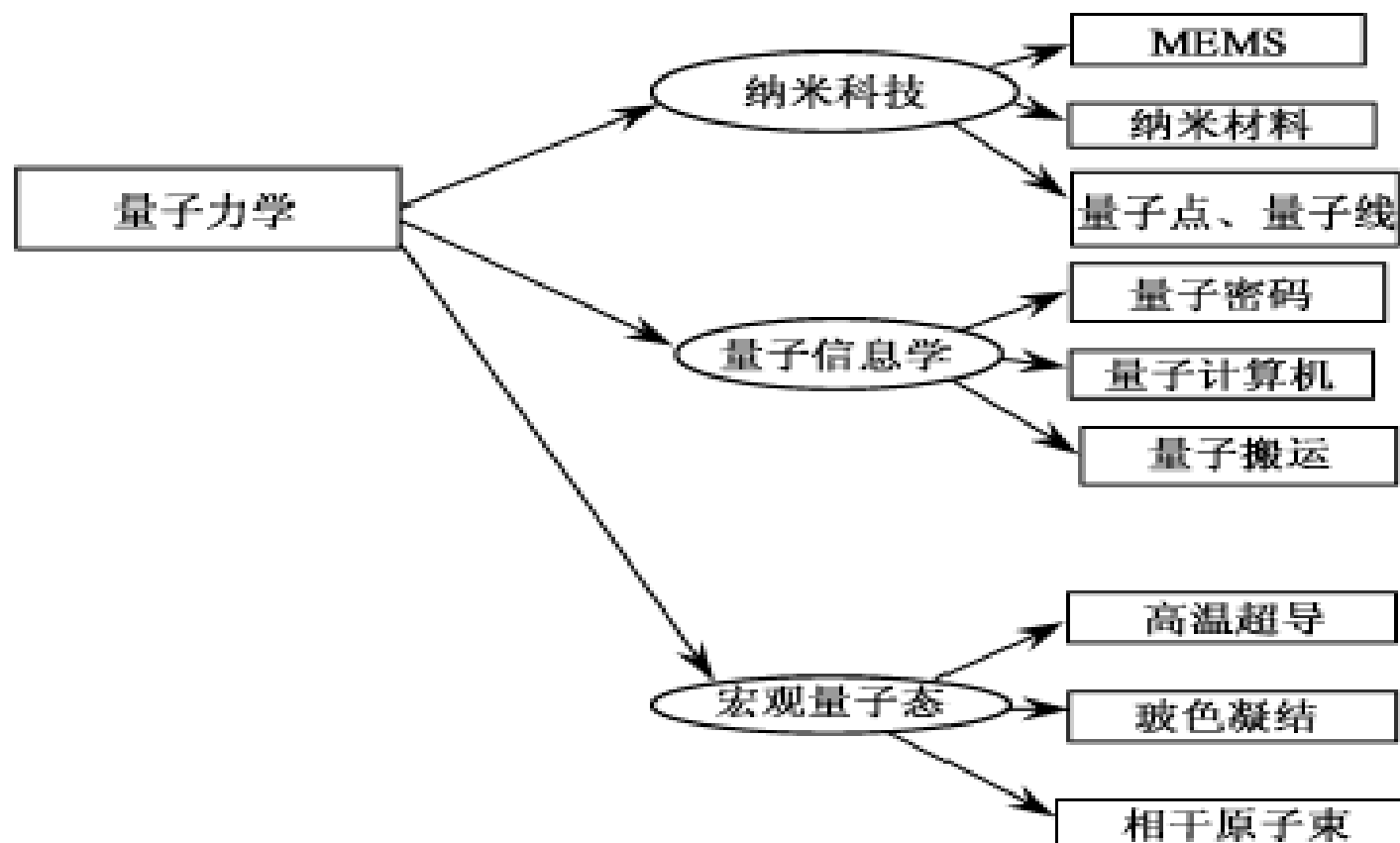
# (1) 量子力学与相对论是现代科技的两大基石



## (2) 量子力学与其它学科之间的关系



### (3)量子力学的近代发展及其应用





## **作业：**

- 1. 什么是普朗克的能量子假说？其提出的目的是什么？为什么说它的提出是一个历史性的突破？**
- 2. 由普朗克公式导出维恩位移定律**
- 3. 由普朗克公式分别导出维恩公式和瑞利—金斯公式**
- 4. 普朗克常数是多少？说说你对普朗克常数的认识**

**例题：**两个光子在一定条件下可以转化为正负电子对，如果两个光子的能量相等，问要实现这种转化，光子波长最大是多少？

解：转化条件为  $h\nu \geq \mu_e c^2$ ，其中  $\mu_e$  为电子的静止质量，

而  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ，所以  $\lambda \leq \frac{h}{\mu_e c}$ ，即有

$$\lambda_{\max} = \frac{h}{\mu_e c} = \lambda_c = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^8} \approx 0.024 \text{ \AA}。$$

# 集中于量子力学诞生的科学史

## ■ (一) 经典物理学的成功

■ 19世纪末，物理学理论在当时看来已经发展到相当完善的阶段。主要表现在以下两个方面：

- (1) 应用牛顿方程成功的讨论了从天体到地上各种尺度的力学客体的运动，将其用于分子运动上，气体分子运动论，取得有益的结果。1897年汤姆森发现了电子，这个发现表明电子的行为类似于一个牛顿粒子。
- (2) 光的波动性在1803年由杨的衍射实验有力揭示出来，麦克斯韦在1864年发现的光和电磁现象之间的联系把光的波动性置于更加坚实的基础之上。

# 集中于量子力学诞生的科学史

## (二) 经典物理学的困难

■ 但是这些信念，在进入20世纪以后，受到了冲击。经典理论在解释一些新的试验结果上遇到了严重的困难。

■ (1) 黑体辐射问题

■ (2) 光电效应

■ (3) 氢原子光谱