

量子力学的基本观念和 历史简介

19世纪末, **经典物理学** (**力学, 电动力学, 热力学和统计物理学**) 对绝大多数的物理现象都给出了满意的描述。例如 :

- 1) **牛顿力学**, 宏观尺度物体及天体的运动
- 2) 电磁现象和光的波动理论, **Maxwell 方程**
- 3) 热现象和气体分子运动论, **Boltzmann 统计理论**

人们普遍认为物理学的基本规律已经被揭示, 剩下的工作只是将这些物理定律用于具体的物理现象中

W. Thomson (Lord Kelvin) 指出经典物理学上空的两朵乌云 (20世纪初):

1. 电动力学中的“以太”(ether, 电磁场传播所依托的一种介质); 狭义相对论 (A. Einstein 1905)
2. 物体的比热容, 观测到物体的比热容总是低于经典统计物理学中能量均分定理给出的值 ($3R$) - 量子论

量子力学是近代物理学的基础
量子力学改变了经典的物理观

量子力学是科学史上能最精确地被实验检验的理论，是科学史上最成功的理论。量子力学是现代物理学的众多分支学科，例如原子和分子物理，原子核物理，激光物理，凝聚态物理，纳米材料科学和介观物理，量子化学，量子生物学，天体物理学，量子信息、量子调控和量子计算等的基础

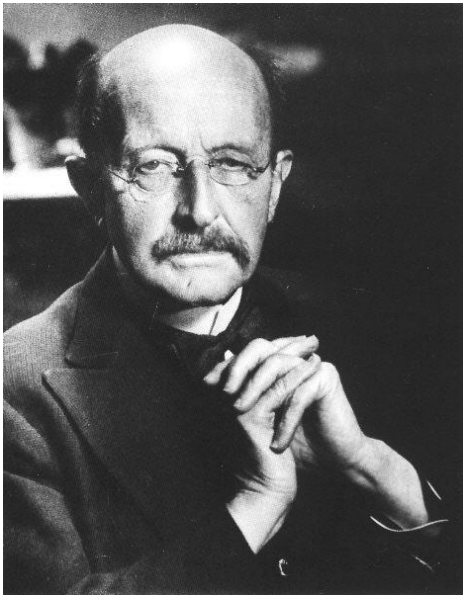
量子力学深深地困扰了它的创立者，直到今天一些物理学家尽管承认它强大的威力，却仍然对它的基础和基本阐释不满意

早期量子理论发展的几个里程碑

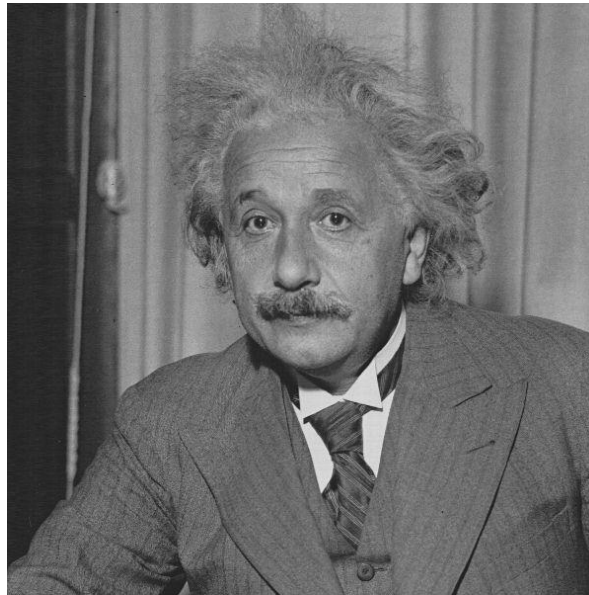
1900, Planck, 电磁场辐射是量子化的

1905, Einstein, 光的量子化, 光电效应

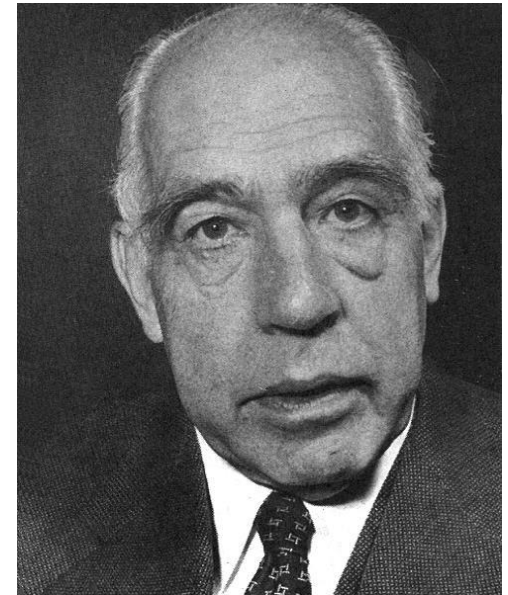
1913, Bohr, 将量子论用于氢原子, 定态, 量子跃迁



M. Planck



A. Einstein



N. Bohr

1923, de Broglie, 电子的波粒二相性

1923, Compton, Compton效应, 直接证明了光量子的存在

1924, N. Bose, 粒子的全同性, Bose-Einstein统计

1925, Pauli, 不相容原理, 元素周期表



Compton



Bose



Pauli

1925, Heisenberg, 矩阵力学

1926, Schrodinger, 薛定谔方程, 波动力学

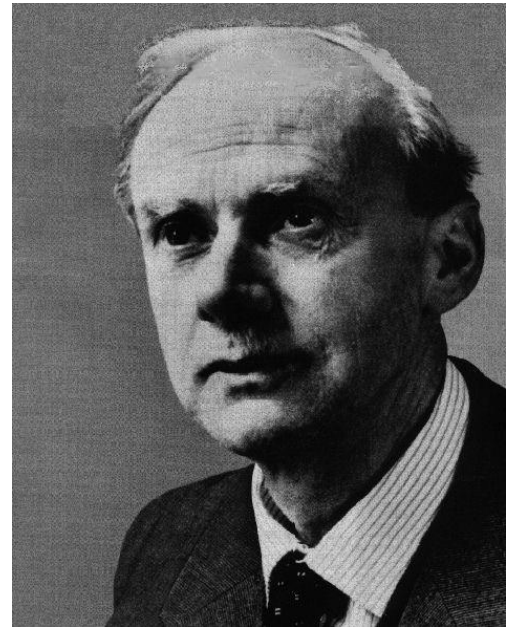
1928, Dirac, 电子的相对论运动方程, 电子的自旋; Fermi, 电子遵循Fermi-Dirac统计; Heisenberg, 不确定关系



Heisenberg



Schrodinger



Dirac

1928年, Goudsmit和Uhlenbeck, 电子自旋

1927年, Heisenberg, He原子的Schrodinger方程的近似解,
原子结构理论的基础

Slater, Hartree和Fock, 原子结构的计算方法

London和Heitler, H分子结构

Pauling, 量子化学

Sommerfeld和Pauli, 金属的电子理论的基础



Uhlenbeck



Goudsmit



Sommerfeld

Bloch, 能带结构理论

Heisenberg, 铁磁体

Gamow, α 粒子衰变, 量子隧道效应

Fermi, 量子统计, 中子物理、核物理

Feynman, 路径积分, 量子电动力学, 费曼图

Higgs, 希格斯机制

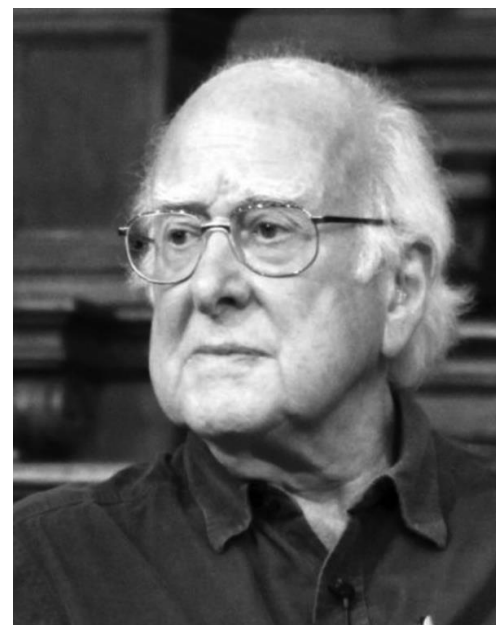
Glashow, Weinberg, Salam, 标准模型



Fermi



Feynman



Higgs

量子力学的基本观念(波动力学)

基本描述：波函数

系统的行为由薛定谔方程描述，薛定谔方程的解称为波函数

系统的完整信息用它的波函数表述，通过波函数可以计算任意可观察量的可能值

在空间给定体积内找到一个粒子的概率正比于波函数的模方

对于同样制备的相同系统进行同样的测量不一定给出同一结果，相反，结果分布在波函数描述的范围

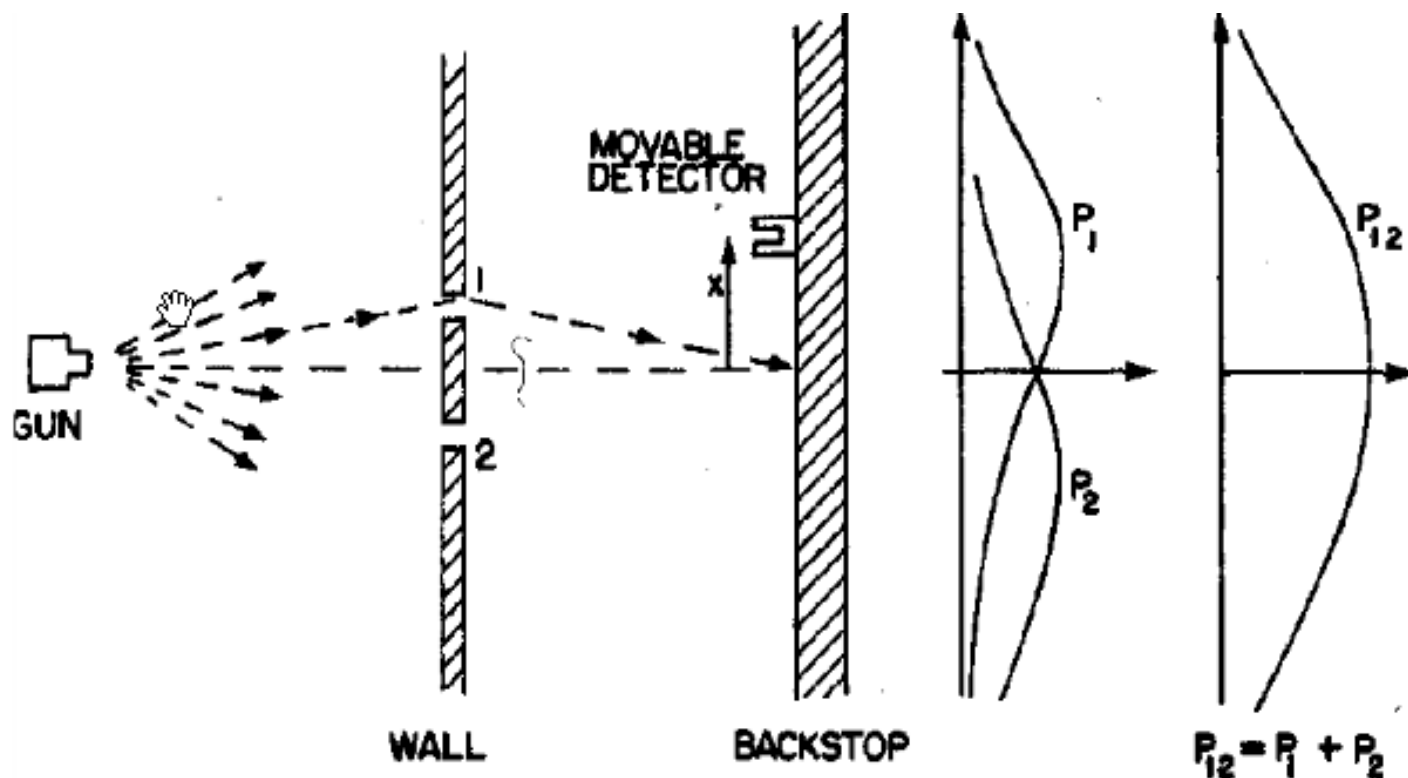
波的干涉：

波相长干涉还是相消干涉取决于它们的相位，振幅同相时相长干涉，反相时相消干涉。当波沿着几条路径从波源到达接收器，比如光的双缝干涉，一般会产生干涉图样

电子遵循波动方程，有类似的行为，如电子的衍射和双缝干涉现象。电子的波动性是经典物理学无法解释的现象

注意：与经典的波不同，量子力学的波函数只是我们对系统信息的一种陈述

子弹的双缝实验

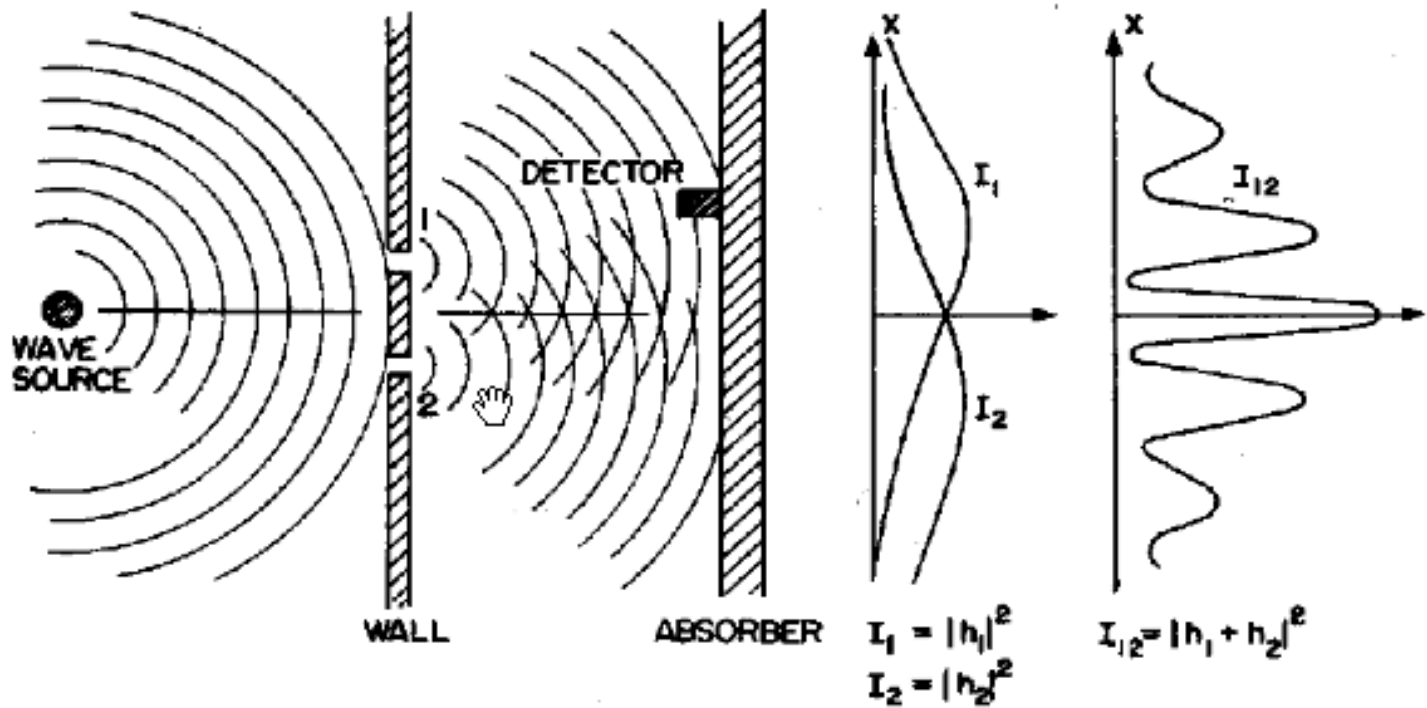


当双缝齐开时，子弹不相干地从1，2两缝打到靶子上，子弹的密度分布为：

$$P_{12} = P_1 + P_2$$

几率加法，无干涉 (no interference)

声波的双缝干涉实验

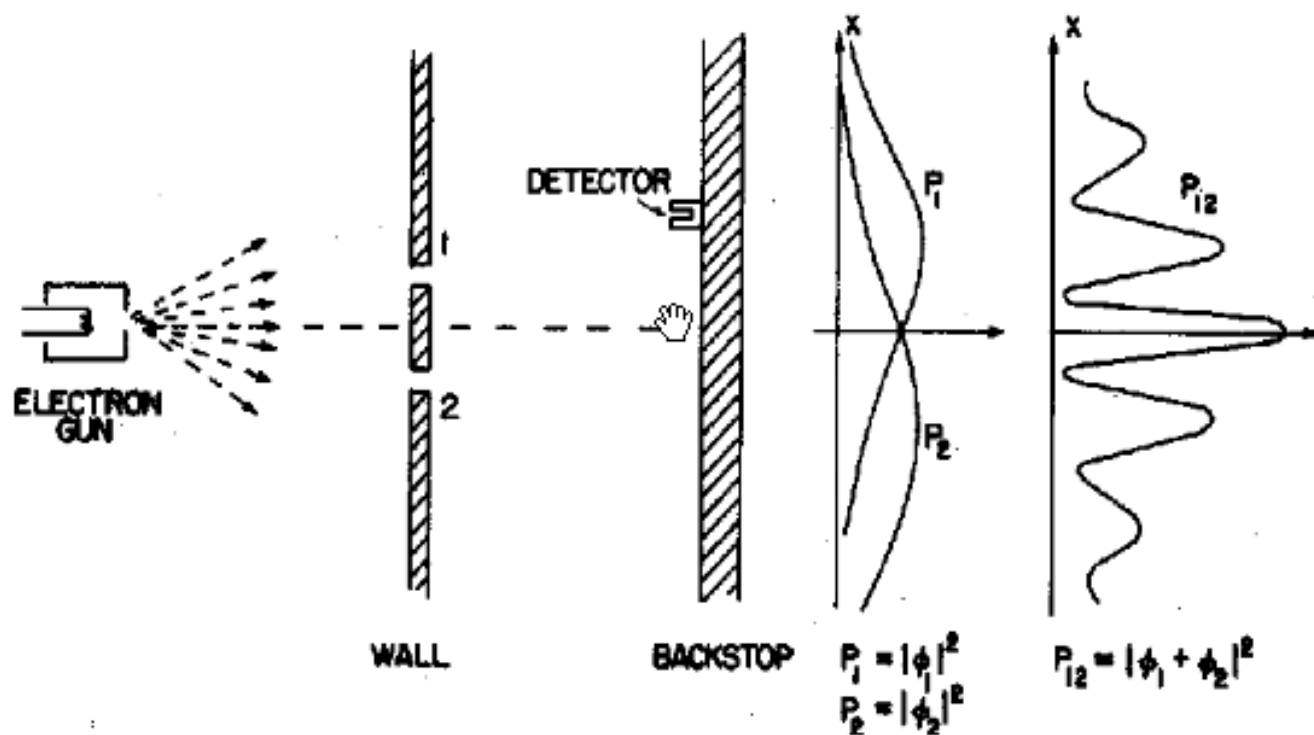


只开缝1时，声波： $h_1(x)\exp(i\omega t)$ 强度 I_1

只开缝2时，声波： $h_2(x)\exp(i\omega t)$ 强度 I_2

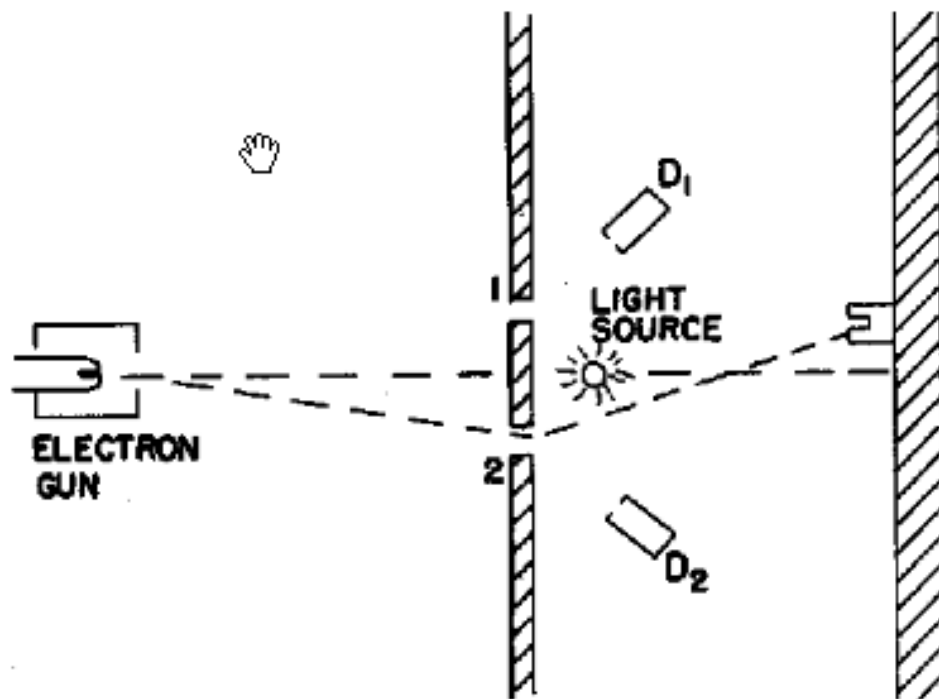
双缝齐开，出现干涉现象： $I_{12} \neq I_1 + I_2$

电子的双缝干涉现象



实验现象与经典波的干涉现象类似，但是两者间存在本质的不同，经典波有强度概念，电子的干涉条纹代表探测器接收到电子的概率的大小

如果在缝和接收屏之间放上探测光源，以探测哪个电子从哪条缝通过 (which-way experiments)



$$P_{12} = P_1 + P_2$$

打开探测光源，干涉条纹消失，关闭探测光源，又出现干涉条纹。我们“看”或“不看”电子会影响电子的行为！

这是由于观测利用了探测器与电子之间的某种相互作用，而这种相互作用破坏了干涉现象所要求的相位关系。也就是说，当**探测到电子从哪条缝通过**时，电子的行为就完全变为粒子性，波的干涉条纹就失去（参考《费曼物理学讲义》第三卷）

有人说电子衍射现象是许多电子相互作用所共同产生的一个统计结果，这种观点是**不正确**的。我们可以控制电子的出射，使得一次只有一个电子从电子枪出来打在单缝处。积累足够多次射击后，会得到相同的衍射图案

这些结果使我们相信，电子的波动性是它**本身的性质**，与其它电子无关。由于这种性质使得单个电子具有“**分身之术**”

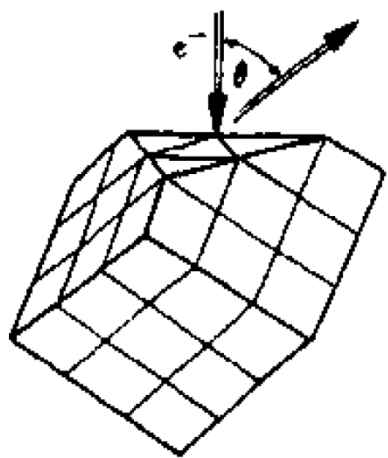


微观粒子有分身之术

微观粒子波动性的其它实验

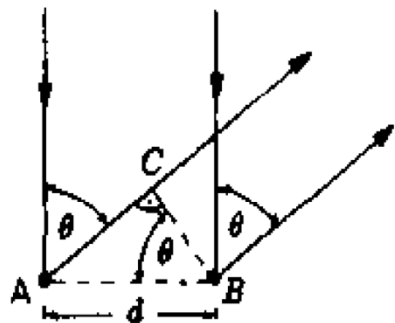
波动性的体现就是衍射、干涉等。通过观察这些现象还可以测量波长

Davisson-Germer电子衍射实验（1927）的结果证实了电子确实有波动性，而且波长与de Broglie的预言完全一致



利用Laue X射线衍射的方法，将具有一定能量（波长）的电子注射到晶体表面，观察散射电子束的强度与散射角之间的关系。此时晶体的表面可以看作平面衍射光栅

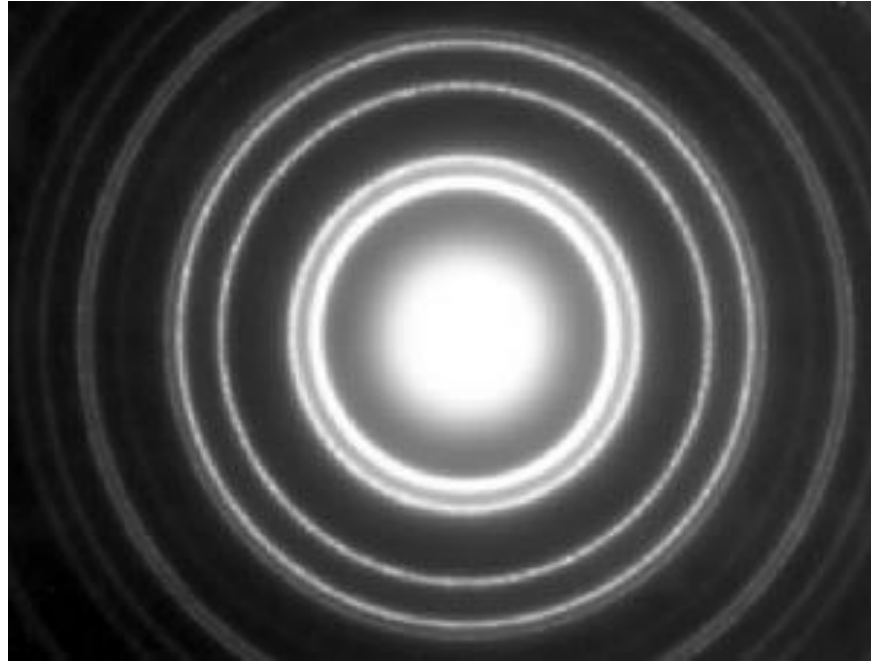
发现散射电子束的强度随散射角改变，当散射角取某些特定值时，强度最大。与X射线的衍射现象相同，证明电子具有波动性



衍射的极大值出现在： $n\lambda = d \sin \theta$ 为什么？

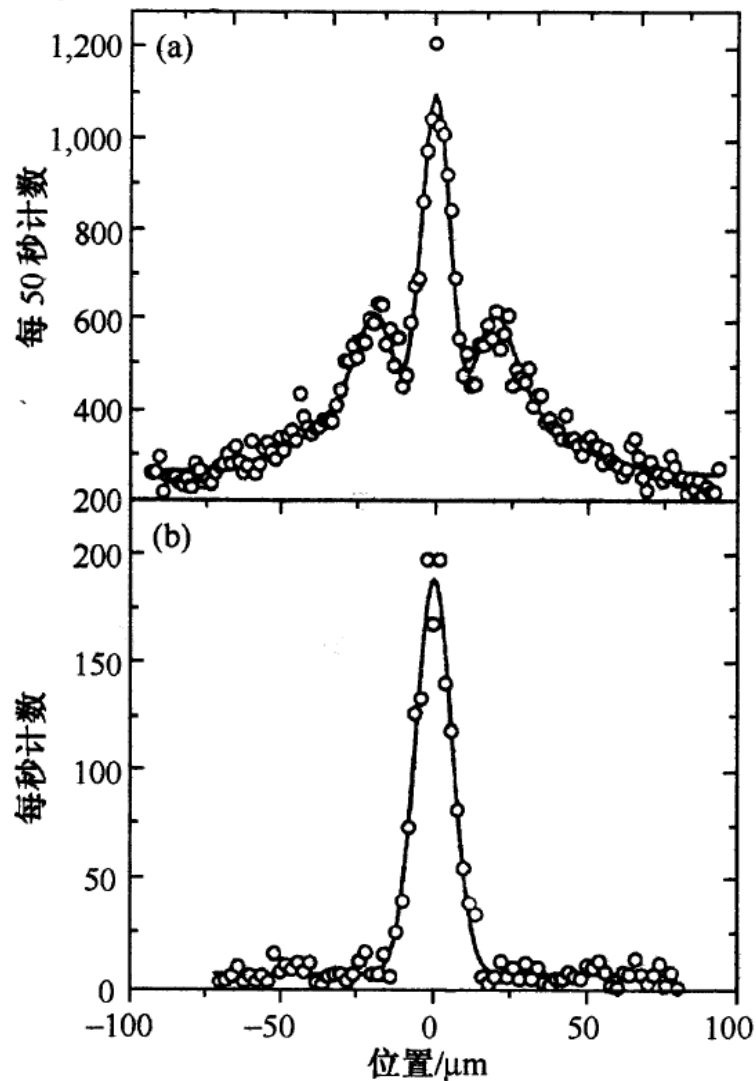
并且由此测出的电子的波长与量子力学预言的结果一致

Davission-Germer 电子衍射实验



一个150eV电子的德布罗意波长为 1\AA – 原子尺度,难观测
类比:可见光波长约 $500\text{nm}=5000\text{\AA}$,其粒子性难观测(1923康普顿散射)

C_{60} 衍射现象实验



(a)有衍射光栅，缝宽50nm

(b)没有衍射光栅

M. Arndt et al., Nature 401, 680
(1999)

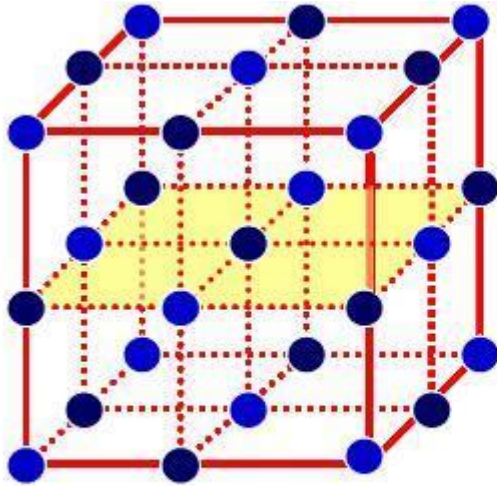
微观世界的规律在本质上不同于宏观世界，但是我们不得不用在宏观世界中建立起来的语言和图像（比如波、粒子等）去描述它，这就使量子力学看起来非常奇怪、神秘和不可思议（**strange, mysterious and peculiar**）[引自费曼物理学讲义和徐湛老师的讲义]

因此我们只能靠抽象和想象来把握微观粒子的行为，而不能依赖于直接的经验（we have to learn about them in a sort of **abstract or imaginative fashion**）[引自费曼物理学讲义和徐湛老师的讲义]

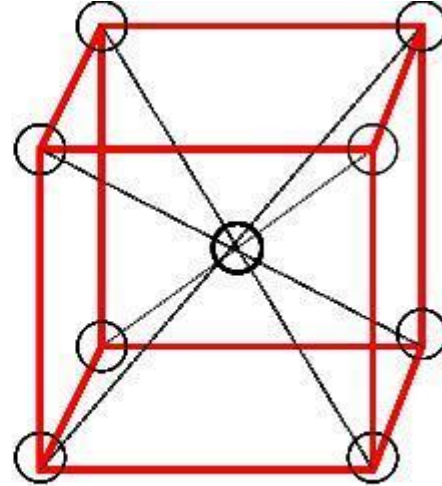
微观量子性质的宏观统计表现

- 晶体的比热在低温时减少，偏离经典统计预期
- 黑体辐射能量密度与辐射频率之间的关系

晶体比热



NaCl的晶胞

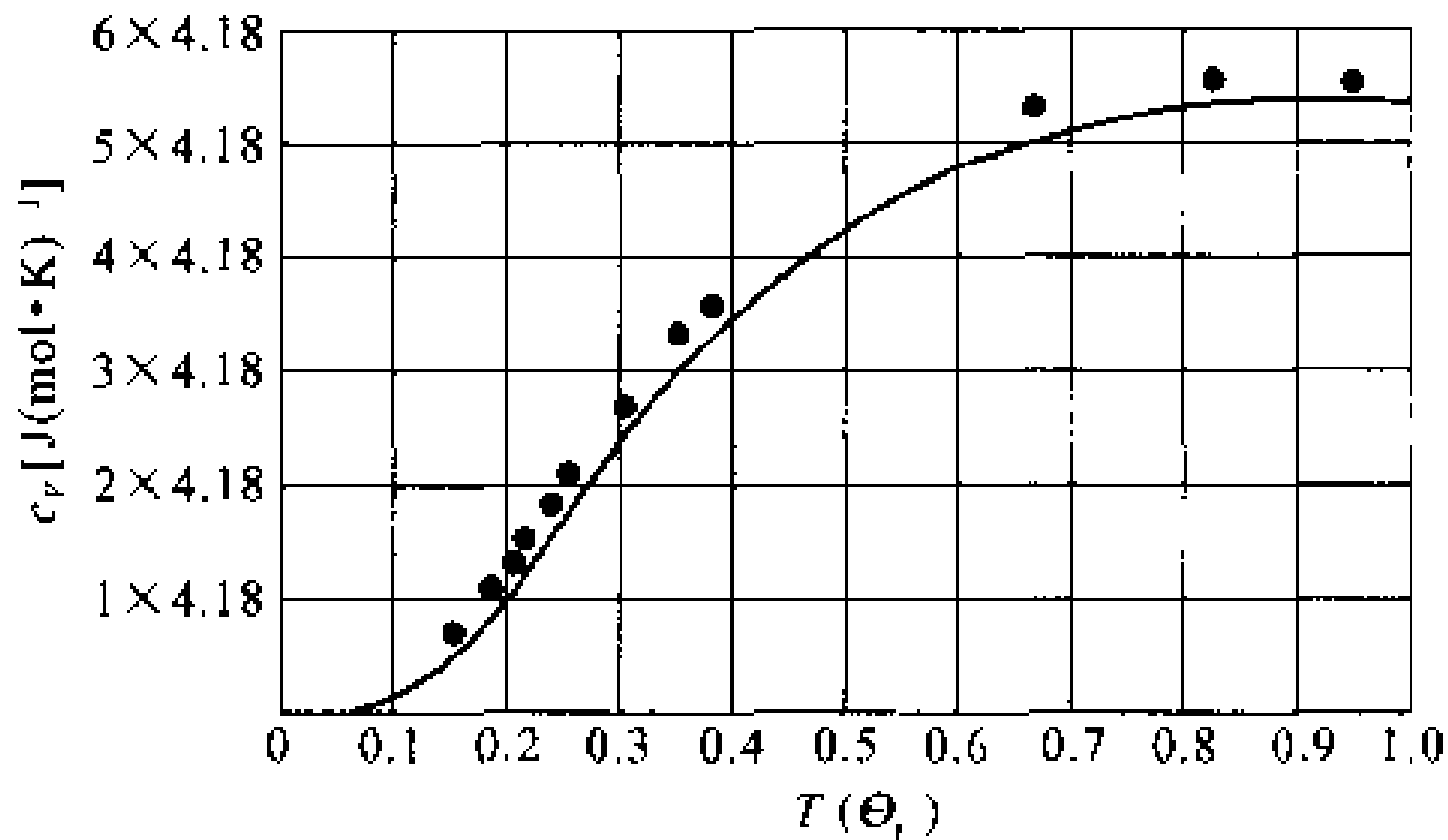


CsCl的晶胞

w

每一个晶格格点就是一个3维谐振子，每个自由度的振子能量只能取一个最小值 (ε) 的整数倍： $n\varepsilon$

晶体比热

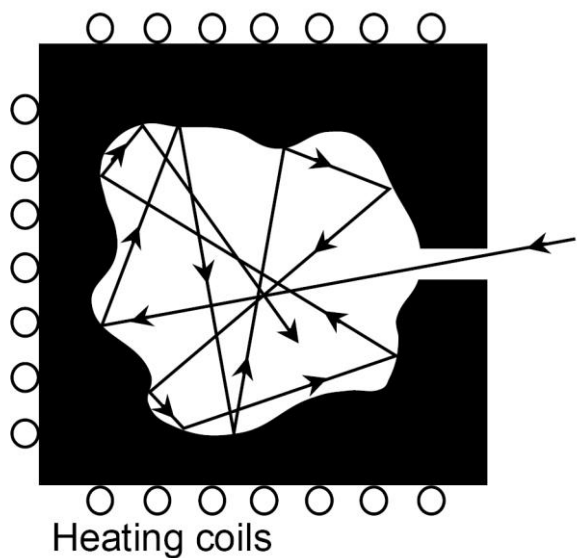


黑体辐射

黑体辐射的能量分布

所有物体都有热辐射，这种热辐射是一定波长范围内的电磁波。而物体也能反射和吸收外来的辐射

如果一个物体能够全部吸收投射到它上面的辐射而无任何反射，则被称为绝对黑体，简称黑体

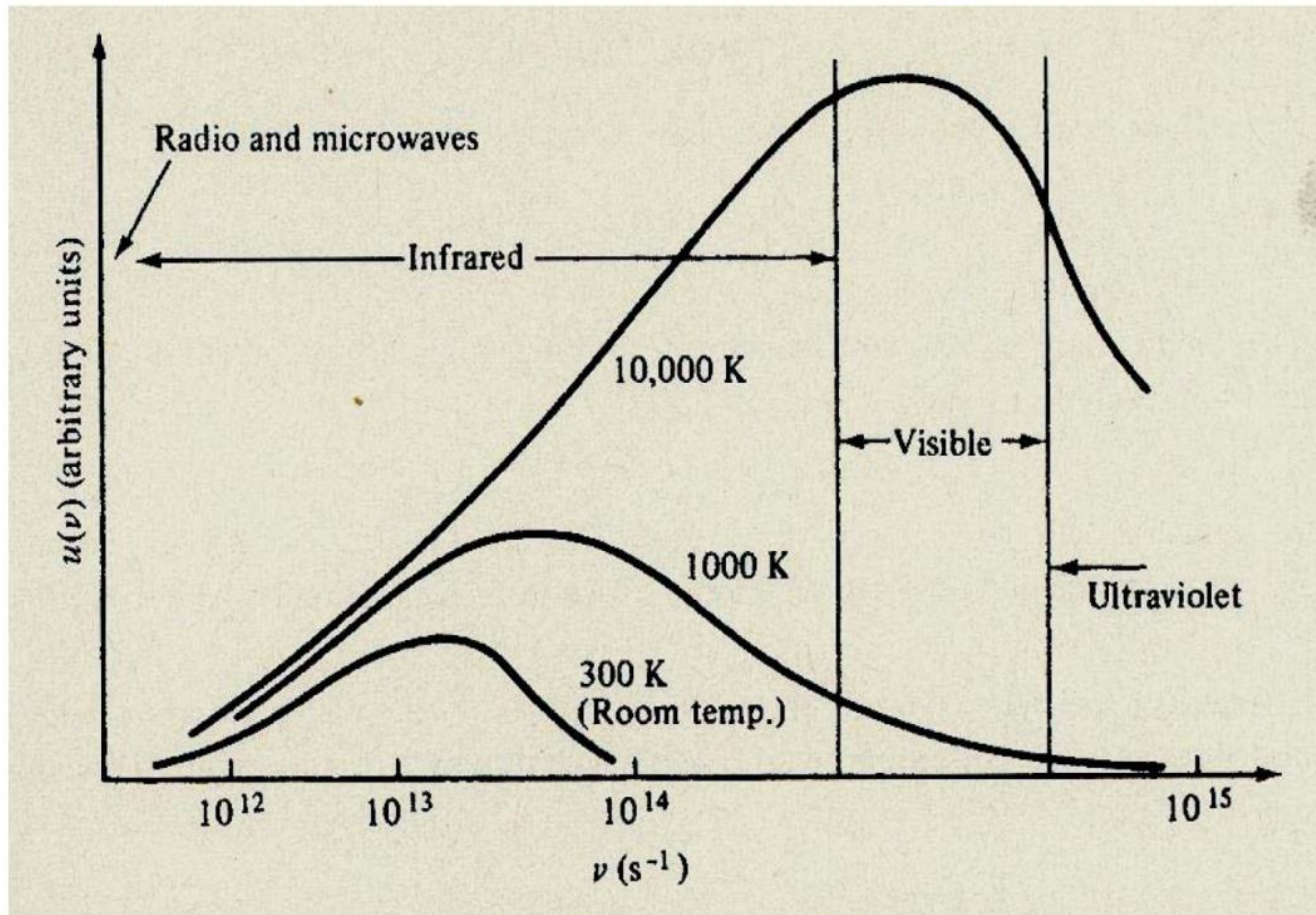


黑体辐射（或称“空腔辐射”）的特征可以用“空腔辐射”的空间能量密度（即单位体积中的辐射场能量）按频率（或波长）的分布来描写：

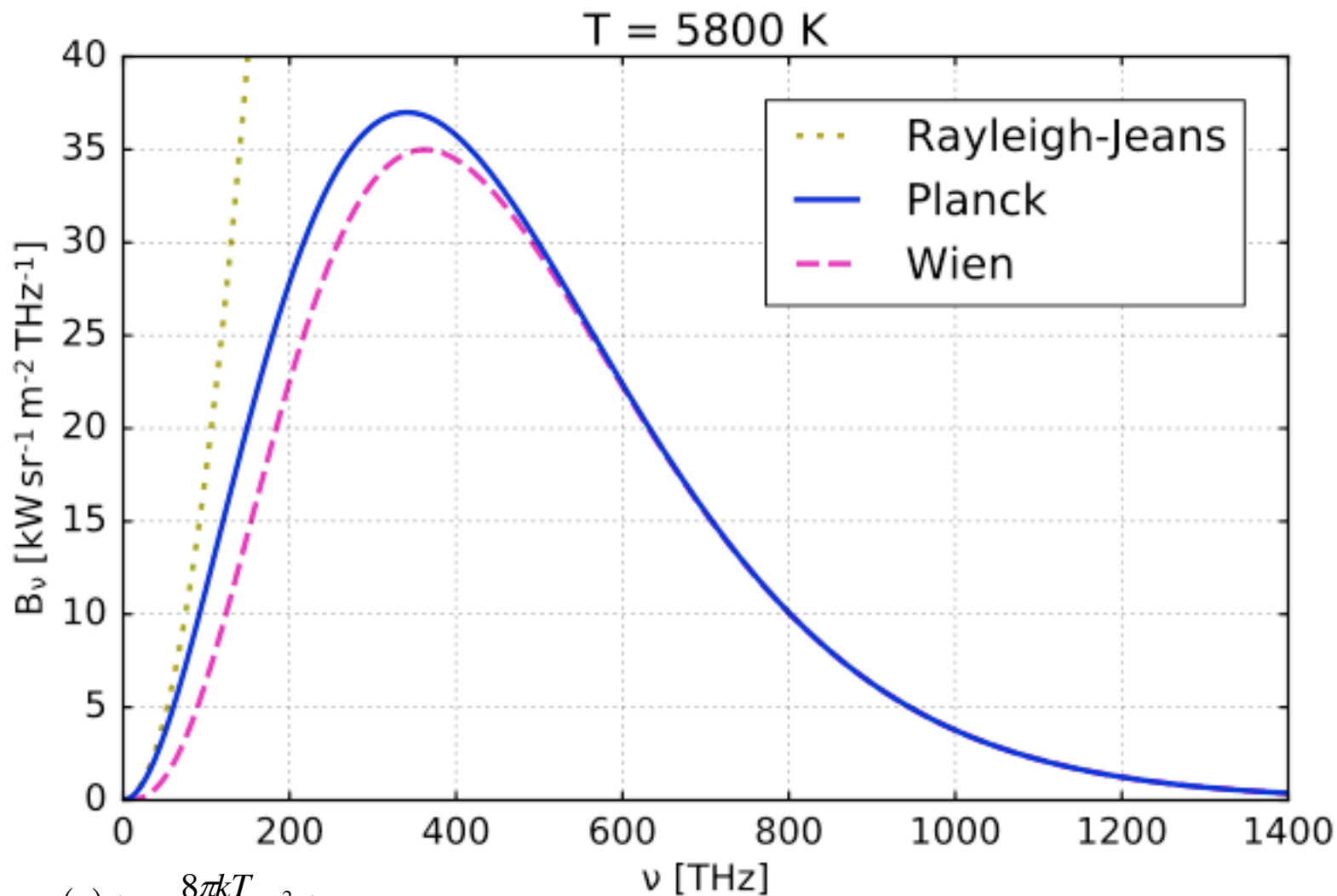
$\rho(\nu)d\nu$ = 空腔辐射的频率在 $\nu \rightarrow \nu + d\nu$ 内的空间能量密度

分布只与温度有关，而与空腔的体积、形状、构成腔壁的物质种类等等都无关，所以一定是由基本物理定律所决定的

Wien公式 $\rho(\nu)d\nu = c_1\nu^3 \exp(-c_2\nu/T)d\nu$



Planck公式与实验完全符合，在高频和低频极限下分别过渡到Wein公式和Rayleigh-Jeans公式



Rayleigh-
Jeans

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

Planck假说 (1900):

假定物质与辐射间的能量交换不是连续的，而是以一系列分立的，不可再分的能量单元（即能量子）来进行

频率为 ν 的电磁辐射的能量以 $h\nu$ 为单位. h 为Planck常数
 $h\nu$ 被称为能量子或光量子，不连续变化。 $\varepsilon = h\nu$.

h 的现代测量值（CODATA 2002年的推荐值）是

$$h = 6.626\,069\,3(11) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$hc \approx (5/4) \text{ eV } \mu\text{m}$$

$$U = \int \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1} g(\varepsilon) d\varepsilon, \quad g(\varepsilon) \sim \varepsilon^2 \text{ 为态密度 (能量简并度)}$$

$$\text{能量密度: } \rho = \frac{dU}{d\varepsilon} = \frac{\varepsilon^3}{e^{\varepsilon/kT} - 1} \sim \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Planck假说

Planck公式:

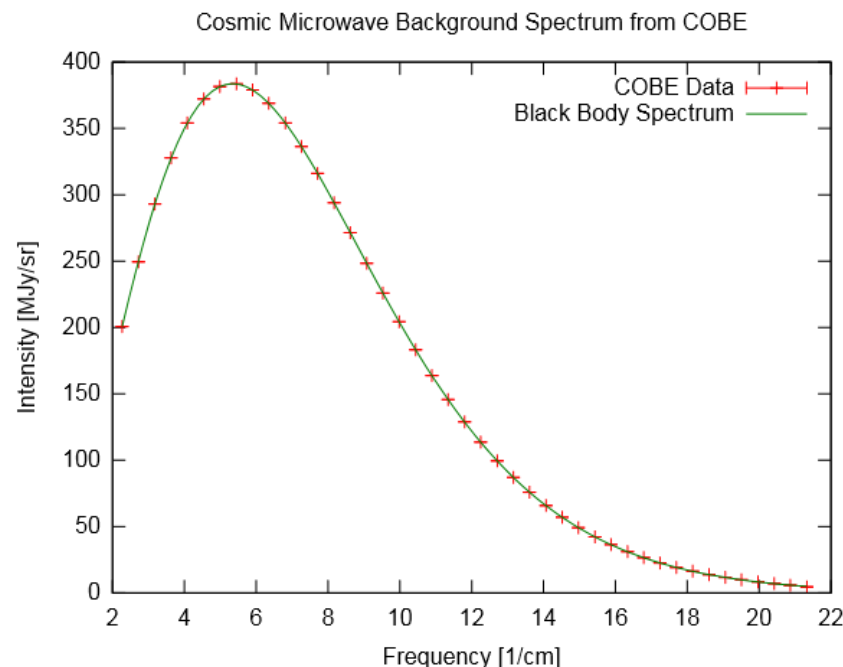
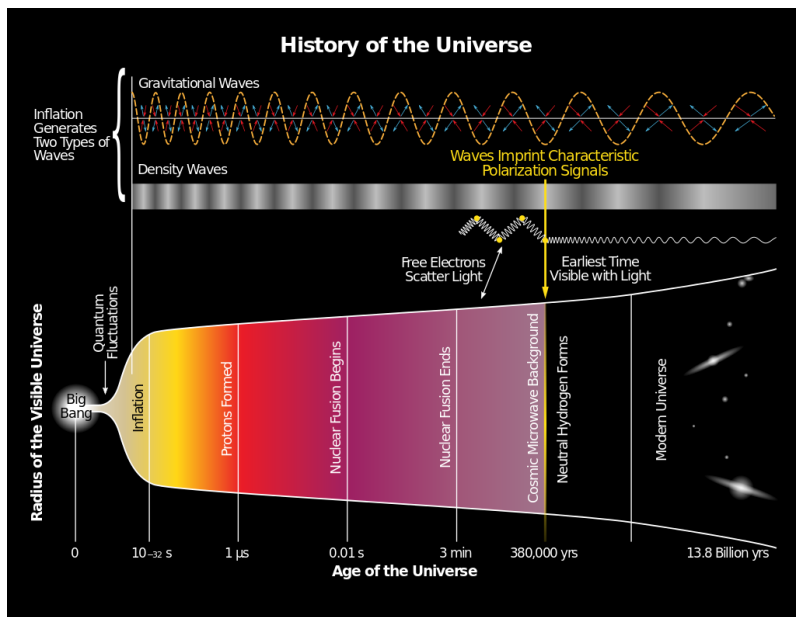
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

c 为光速, k_B 是Boltzmann常数, T 是绝对温度.

公式具体推导参见任何一本统计力学教材

Planck的能量子的假设虽然很好地解释了实验, 但是毕竟是间接的证明。能量子或光量子还需要进一步的直接的实验证实

前沿介绍: 宇宙微波背景辐射



宇宙微波背景辐射也遵从Planck公式，对应的温度为2.7K。
它如同宇宙早期物质与电磁辐射退耦合时拍的一张照片—
支持宇宙大爆炸理论

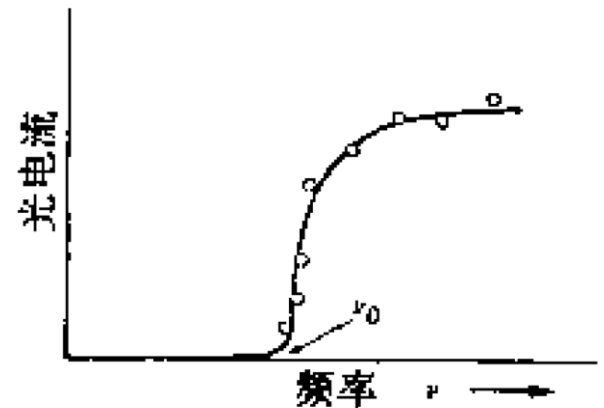
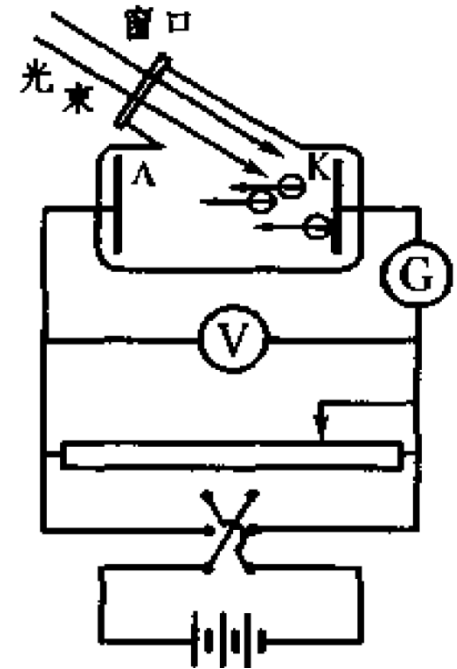
光电效应和Einstein的光量子

Maxwell电磁理论和Young双缝干涉等一系列实验证实了光的波动性

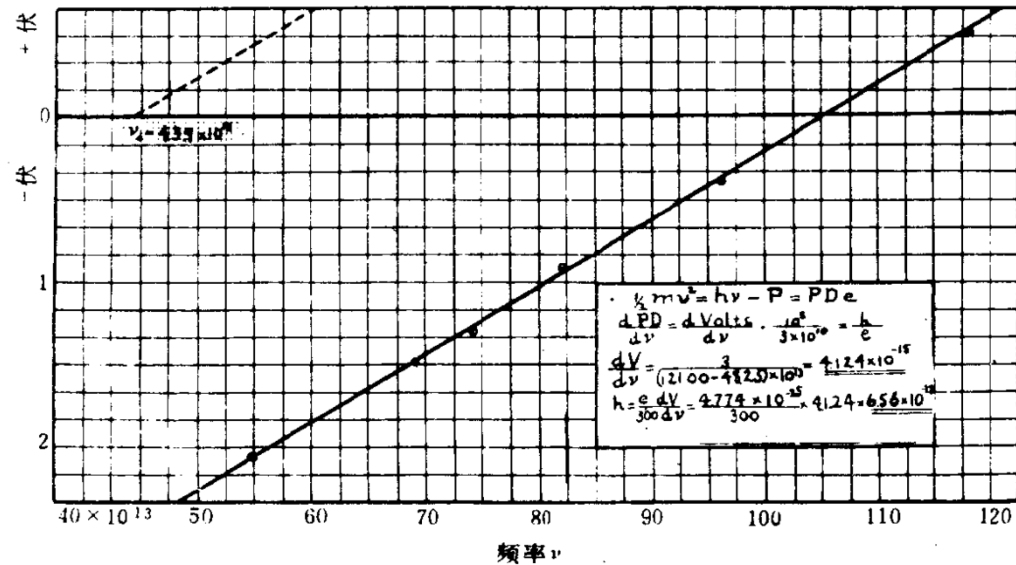
光照射到金属上时,有电子从金属中逸出-光电子

实验现象:

1. 对于一定的金属材料制成的电极,存在临界(最低)的光频率
2. 光电子能量只与光频率有关,而不依赖于照射光的强度
3. 光的强度只影响光电子数目
4. 没有可观察的延迟现象(10^{-9}s 就产生光电子)



光电流与入射光频率的关系



光电子最大动能与入射光频率的关系

依据经典理论，光波携带正比于其强度的能量，当它透入金属板时，将部分或全部失去这些能量，而金属板中的电子必须吸收足够的能量才能脱离金属板。因此，金属板中电子的能量积累是连续的和渐进的

经典理论无法解释光电效应实验现象

Einstein的解释（1905）：

提出光量子(light quantum)的概念，辐射场是由光量子组成，每个光量子能量与辐射频率的关系为： $E = h\nu$

当光照射到金属表面时，光量子的能量立刻被金属中的自由电子所吸收，但只有当光的频率足够大时，电子才能克服脱出功而逸出金属表面，逸出的光电子的能量为：

$$K_e = h\nu - W_0,$$

K_e 光电子动能， W_0 电子在金属中的脱出功（或称功函数）

意义：证明电磁场的能量量子 $h\nu$

可以和单个的电子相互作用，从而它本身也可以看成是一种粒子，称为光子

光子的静止质量是零，它的能量-动量关系是

$$E = pc$$

而光子的能量是 $E = h\nu$

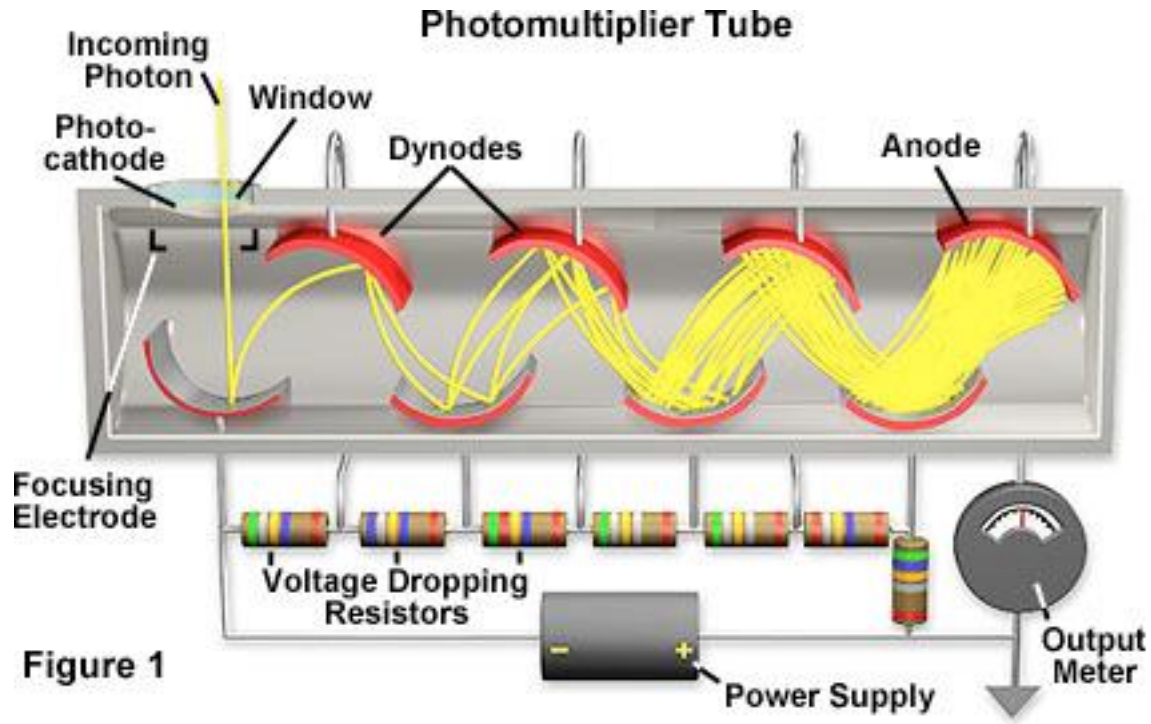
所以光子的动量大小是

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Planck-Einstein关系

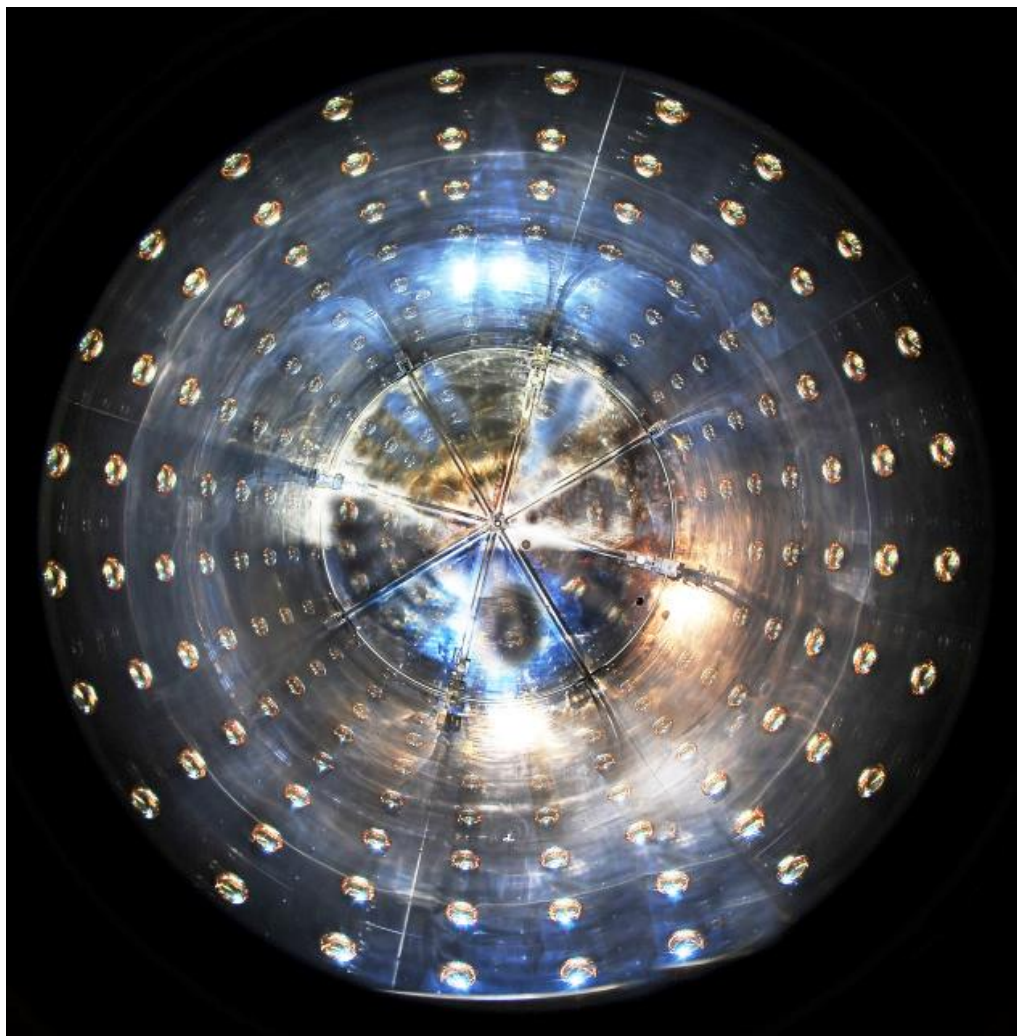
$\lambda = \frac{c}{\nu}$ 是光的波长

光电倍增管



百年前爱因斯坦的理论，现在仍有巨大应用价值

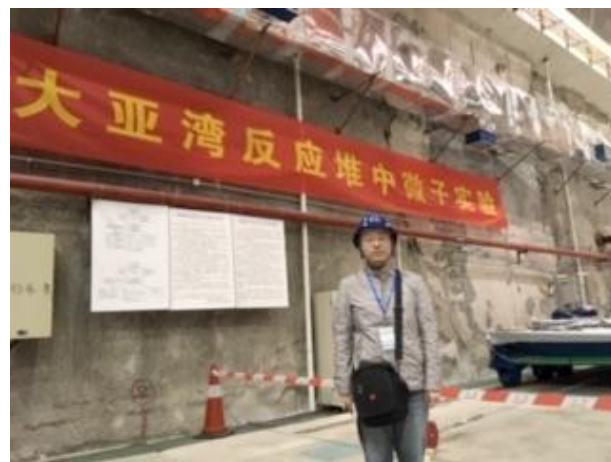
前沿介绍：中微子震荡



大亚湾中
微子实验
(θ_{13})

192个8英寸光电倍增管安装在紧贴钢罐内壁的支架上，用于探测中微子俘获时发出的光信号

前沿介绍：中微子震荡



Compton效应

Compton实验 (1923) 是观察光在自由电子上的散射，或者说光子与自由电子的碰撞

实验现象：在散射角不为零的时候，散射后的光子波长变长（也就是能量变小），同时出现反冲电子

这个结果在经典电动力学中是完全无法解释的

依据经典理论，在频率为 ω 的电磁场下，原来静止的电子将做同一频率的受迫振荡，这种受迫振荡会产生同一频率的交变电磁场。因此散射的辐射频率和入射的辐射频率相同，不会产生波长的改变

实质上，经典理论所预言的电磁场和电子的能量和动量的交换过程是连续的

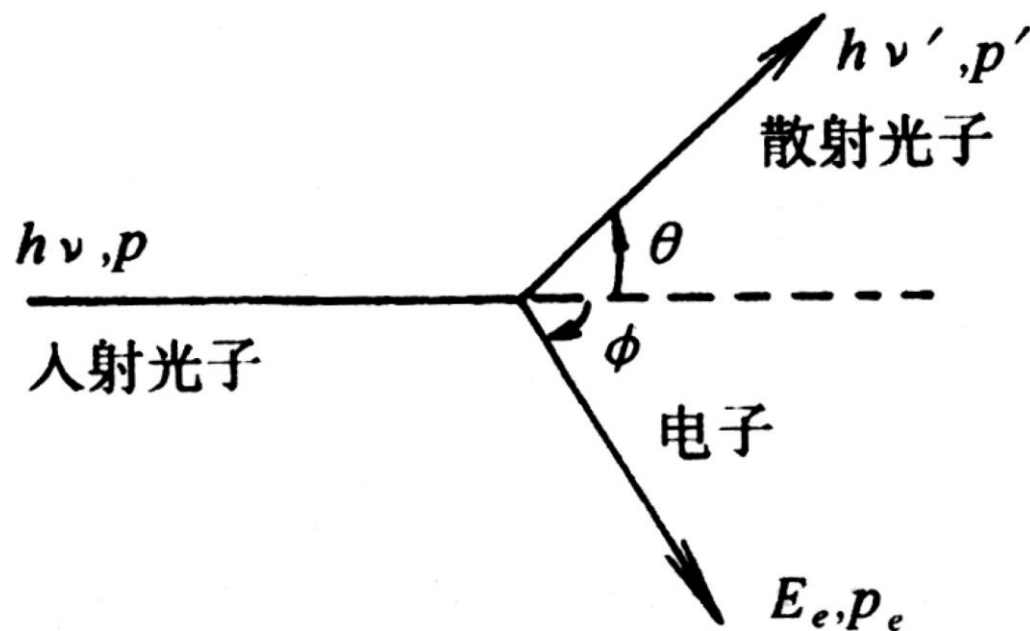
如果假设在碰撞过程中系统（光子加电子）的总能量和总动量守恒，

光子的能量是 $h\nu$ ， 动量的大小是 h/λ ，

动量的方向和光子的运动方向相同

散射光子的频率是 ν' ， 入射光子与散射光子方向的夹角是 θ

反冲电子的动量是 \vec{p}_e



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

与实验完全符合

Compton实验的意义：

证明了在光子和电子（或其它粒子）相互作用的单个事件中（不仅仅是平均值），能量守恒和动量守恒是被严格遵守的
实验证明了光是一种既具有波动性又具有粒子性的物质，这称为光的波粒二象性

Planck-Einstein关系在定量上是正确的

问：为什么康普顿散射不容易观察到？

光与物质相互作用

低能(<100 KeV):

- 瑞利散射、光电效应

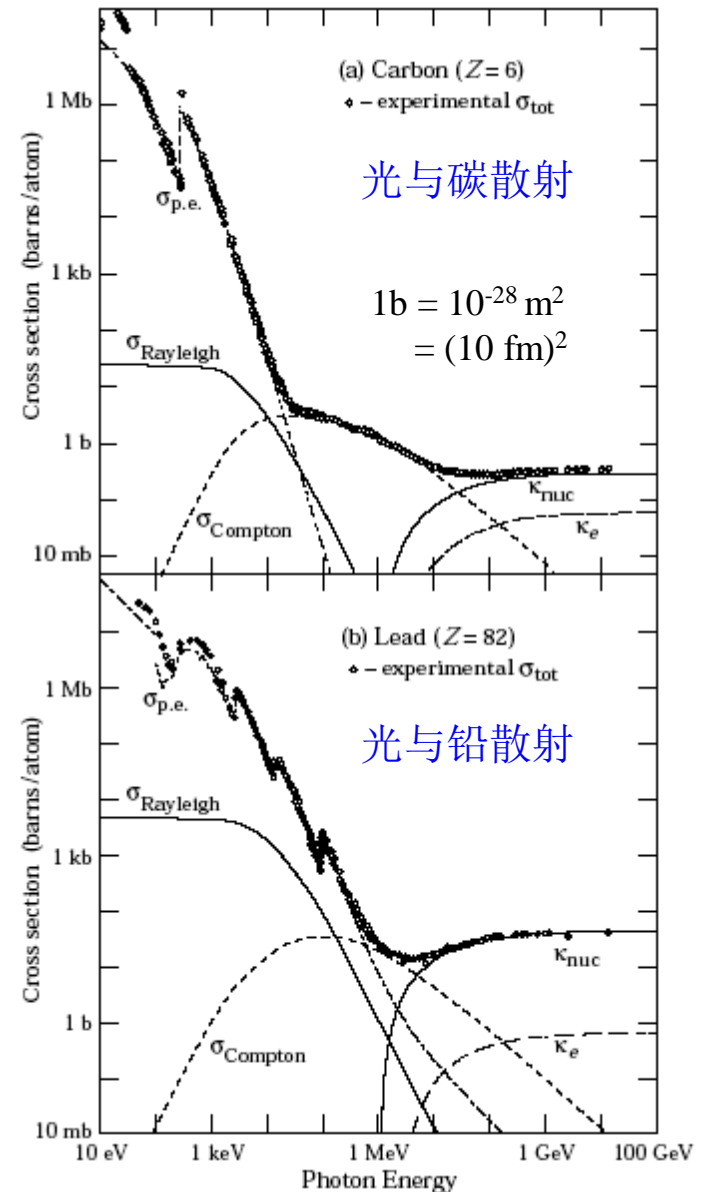
中能(~1 MeV):

- 康普顿散射

高能(>10 MeV):

- 产生正负电子对

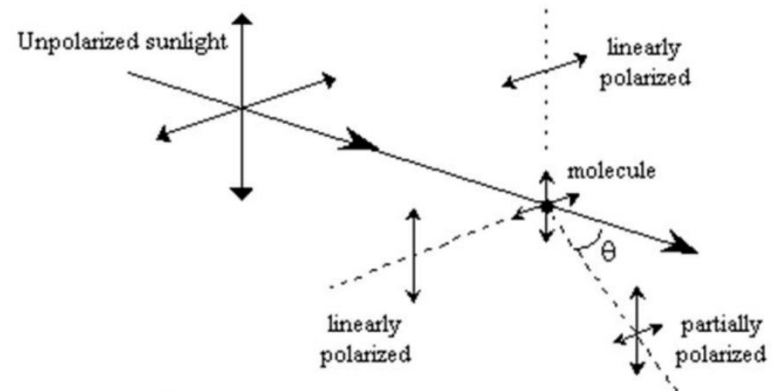
经典电动力学→量子电动力学
(QED)



瑞利散射



- 光子与气体分子的弹性散射——入射和出射光子能量一样
- 高频光子散射截面更大 ($\sigma \sim \lambda^{-4}$)——天空是蓝色的
- 偏振的分析

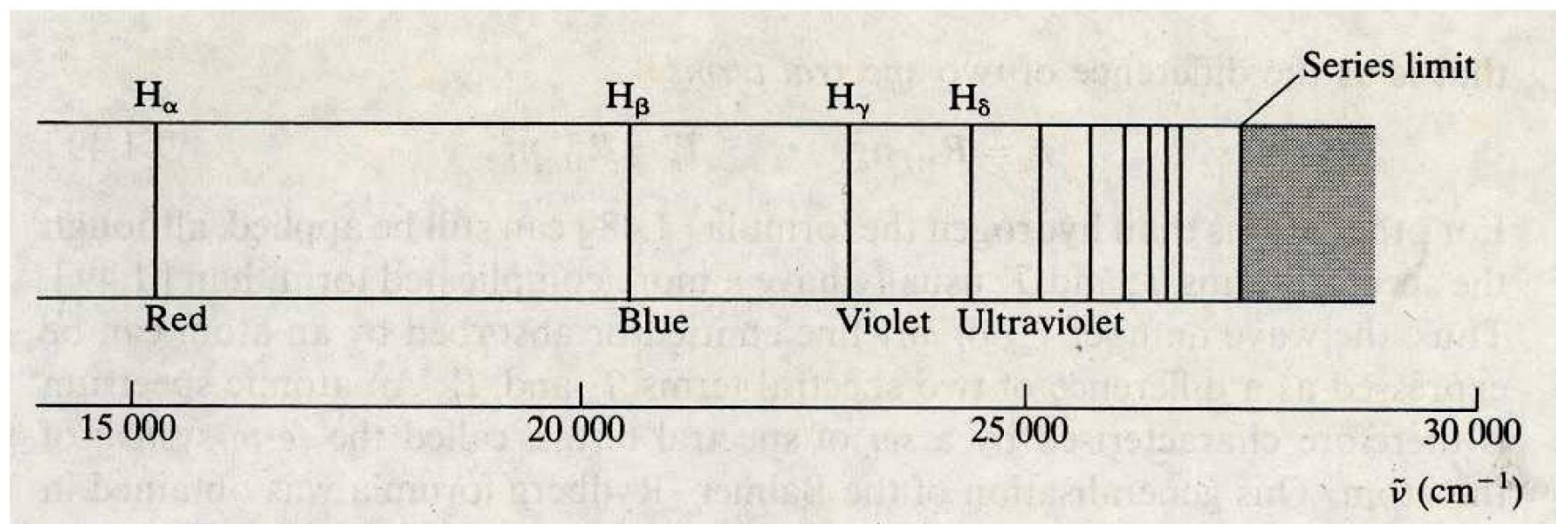


微观量子特性的体现

- 电子绕原子核转动却不辐射电磁波能量（直至最后落入原子核中）
- 电子磁矩在均匀磁场中进行拉莫进动却不辐射电磁波能量（直至最后磁矩与磁场同向）
- 低能粒子在半径为 a 的3维无限高球势垒上散射的横截面积为 $4\pi a^2$ ，（经典为 πa^2 ）

Bohr的原子结构模型

氢原子光谱和Franck-Hertz实验



氢原子的光谱由许多分立的谱线组成，特征谱线的频率为 (Rydberg, 1890)：

$$\nu = R_H c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad n_1 < n_2 = 1, 2, 3, \dots$$

R_H 为Rydberg常数（量纲是长度的倒数）。它满足“**并合规则**”：

若 ν_1 和 ν_2 在特征光谱中，则有时 $\nu_1 + \nu_2$ 和 $|\nu_1 - \nu_2|$ 也在特征光谱中

谱线公式中的每一项称为“光谱项”：

$$\nu_n = R_H c \frac{1}{n^2}.$$

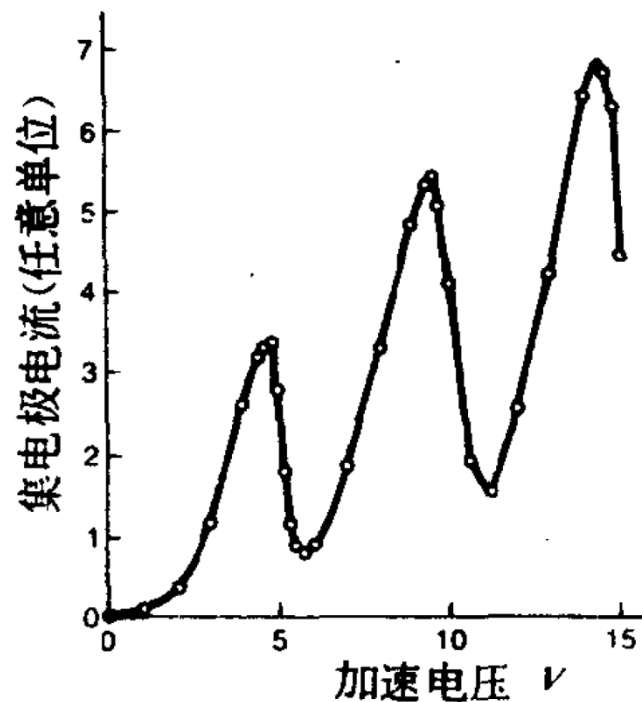
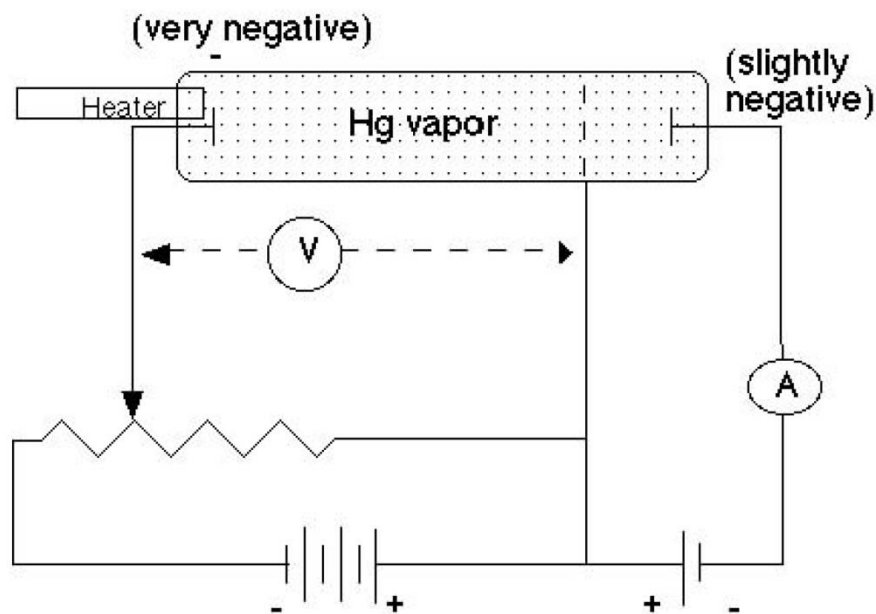
可以认为每个光谱项对应着氢原子的一种能量状态。
氢原子的能量就是不连续地变化的，其可能的值为：

$$E_n = -R_H hc \frac{1}{n^2},$$

这称为氢原子的能谱

经典理论的困难：在不考虑电子自身的电场时，氢原子的能量不可能是分立的（或称离散的）。如果考虑到电子自身还带电并且在做加速运动，则连稳定的氢原子都不可能存在

Franck-Hertz实验 (1914) 直接证明了原子能量的不连续性



实验现象：利用电子流通过汞蒸汽，发现电流随电压以 4.9eV 为周期变大和变小。汞原子光谱最明显的谱线之一： 2537\AA 的紫外谱线

汞原子能够精确地从与之碰撞的电子中吸取能量

证实汞原子中存在分立能级（能量的量子化）

Bohr 模型 (1913)

Bohr 模型的基本假设：

(1) 电子在原子中只能沿某些特殊的轨道运动，当电子在这些轨道上时，既不发出也不吸收光辐射（定态假设）

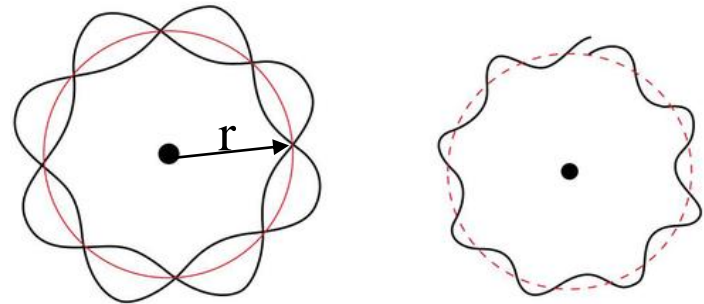
(2) 当电子由一个定态“跳”（跃迁）到另一个定态时会发出或吸收光辐射，其频率为（跃迁假设）：

$$\nu = \frac{|E_1 - E_2|}{h},$$

(3) 电子在原子中的允许轨道满足下面的条件：它的轨道角动量是

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}$$

的整数倍（量子化条件）



经典力学加Bohr假设可以导致氢原子能级为：

$$E_n = -\frac{\mu k_1^2 e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

μ 是电子质量, e 是电子电荷绝对值,

$$k_1 = \begin{cases} 1/4\pi\epsilon_0, & (\text{SI}) \\ 1. & (\text{CGS}) \end{cases} \quad \vec{F} = \frac{k e_1 e_2}{r^2}$$

Sommerfeld的量子化条件 (1915)

为处理多自由度体系的周期运动的分立能级问题，Sommerfeld提出了推广的量子化条件

对于周期运动的自由度 (q, p) ,

$$\oint p \cdot dq = nh, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

其中 q 是广义坐标, p 是与之共轭的广义动量,积分对一个周期进行。

Bohr模型（又称为“老量子论”）的缺点：不能解释比较复杂的原子（比如氦原子）的能谱，不能解释谱线的强度，无法处理非束缚态系统等

在量子力学诞生以后，人们证明了老量子论是量子力学的“半经典近似”

但是Bohr提出的一些最基本的概念（原子能级的量子化，量子跃迁等）具有非常重要的意义，在量子力学中被保留下来

在Bohr模型提出以后，人们一再追问这个模型基本假设的根据，但是Bohr无法回答

后来de Broglie和Heisenberg分别从两个不同的角度研究了这个问题，de Broglie 和Schrodinger提出了“**波动力学**”，Heisenberg, Born和Jordon提出了“**矩阵力学**”

后来发现二者其实是同一种力学——量子力学的不同“**表象**”（Dirac）。由于波动力学的语言比较容易被初学者接受，所以一般的教科书都是沿着de Broglie的路子引出量子力学。但是Heisenberg对量子力学的诞生所做的贡献是非常重要的

de Broglie的物质波假说

Planck-Einstein “光量子假说”：

$$\begin{cases} E = h\nu, \\ p = h / \lambda, \end{cases}$$

$E = \hbar\omega$, ω 是圆频率 $= 2\pi\nu$,

$\vec{p} = \hbar\vec{k}$, \vec{k} 是波矢量, $|\vec{k}| = 2\pi / \lambda$,

建立了波动性-粒子性之间的关系



de Broglie假说 (1923)：微观粒子也有波动性！

微观粒子波动性-粒子性之间的关系：

$$\omega = \frac{E}{\hbar}, \quad \vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar},$$

称为de Broglie关系。由粒子性决定波动性。

它适用于自由粒子和平面波之间的关系。平面波是：

$$\Psi(\vec{r}, t) = A e^{-i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

代入de Broglie关系成为：

$$\Psi(\vec{r}, t) = A e^{-i(Et - \vec{p} \cdot \vec{r})/\hbar}$$

这称为de Broglie波（是复数波）

对质量为 μ 的非相对论粒子,

$$E = p^2 / 2\mu, \quad \therefore p = \sqrt{2\mu E},$$

所以de Broglie波的波长是 :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\mu E}}$$

对于电子,

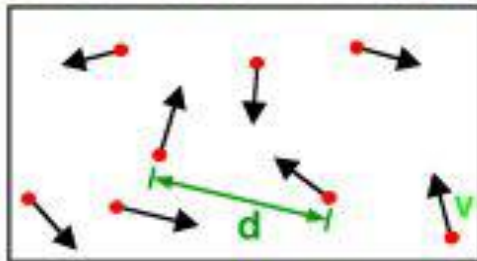
$$\lambda \approx \frac{12.25}{\sqrt{E}} \approx \sqrt{\frac{150}{E}},$$

其中 E 的单位是电子伏特 (eV), λ 的单位是埃

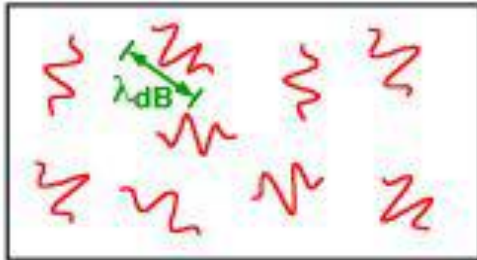
$$E = 150\text{eV}, \quad \lambda = 1\text{\AA}$$

宏观尺度的量子现象- Bose-Einstein凝聚

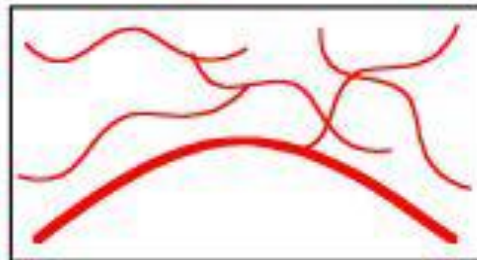
What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



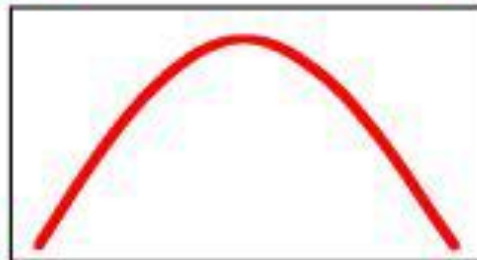
High
Temperature T :
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



Low
Temperature T :
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



$T = T_{\text{crit}}$:
Bose-Einstein
Condensation
 $\lambda_{dB} = d$
"Matter wave overlap"



$T = 0$:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"

$$\lambda \sim \frac{h}{\sqrt{2mkT}}.$$

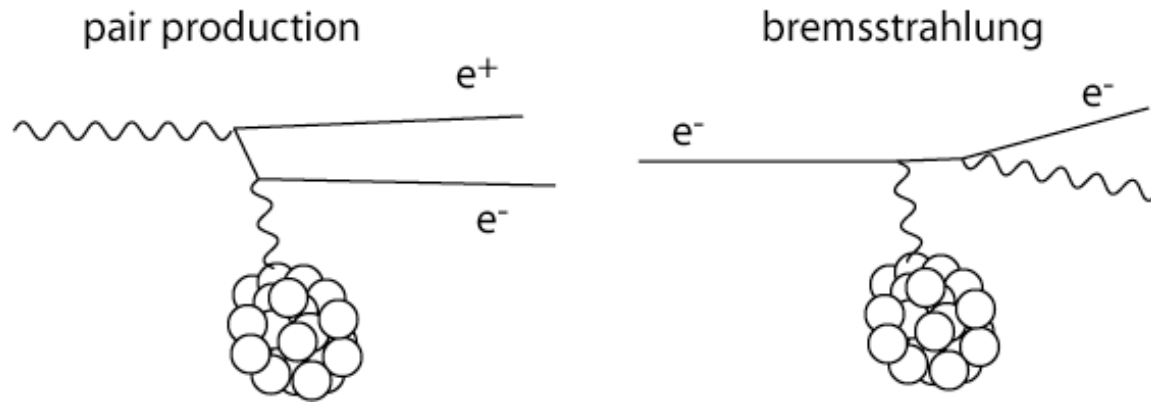
总之，波粒二象性是微观客体的共性，不管在经典物理中它们被看作是粒子（比如电子）还是波（比如光辐射）。但是，二者在经典极限下显然有完全不同的表现，所以即使在微观世界中它们也应该有一些本质的差别

从量子力学的角度来看，这二者的差别在于所服从的统计不同——服从Fermi-Dirac（费米-狄拉克）统计的在经典极限下成为“粒子”，而服从Bose-Einstein（玻色-爱因斯坦）统计的在经典极限下成为“波”

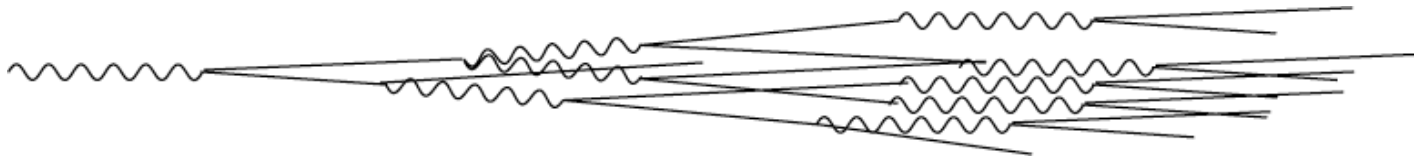
在高能情况下，这两种粒子还可以相互转化，比如正负电子湮灭为双光子，双光子碰撞出正负电子

高能光子与物质作用

高能电子在物质核子电磁场中转化为正负电子对，高能电子又能辐射次级光子（轫致辐射）



一步步发展形成雪崩效应：物质内部形成簇射粒子束



微观世界的发现之旅、粒子物理



1897	汤姆逊发现电子(e^-)
1911	卢瑟福发现原子核结构(uud三夸克组成质子)
1931	泡利发现中微子(ν_e)
1932	安德森在宇宙线中发现正电子(e^+)
1936	安德森在宇宙线中发现 μ 轻子
1947	鲍威尔发现 π 介子(ud二夸克组成)
	法国物理学家发现K介子(us二夸克组成)
1962	莱德曼、舒瓦茨发现 ν_μ
1974	丁肇中、瑞奇特发现J/psi(cc二夸克组成)
1975	佩尔等发现 τ 轻子
1977	莱德曼发现b夸克
1978	德国 e^+e^- 对撞实验的三jet事例(g)
1983	UA1/UA2实验发现W/Z波色子
1995	Tevatron发现顶夸克(t)
2012	ATLAS/CMS实验发现上帝粒子(H)

高能粒子物理研究是基础物理学的前沿，一百多年来深刻影响着人类对物质世界的认识了解（星系-行星-分子-原子-核子-夸克）

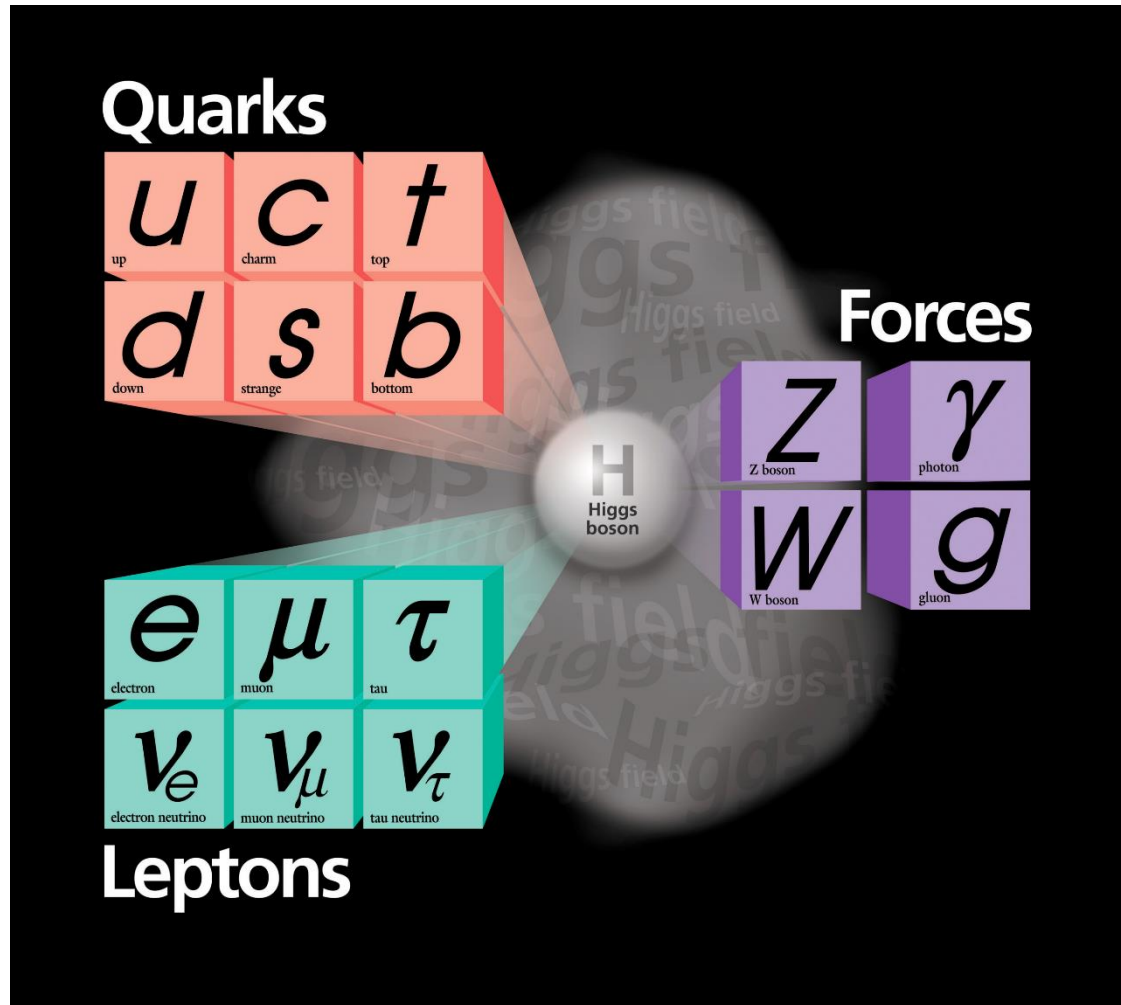
粒子对撞机是研究物质组成结构及相互作用规律重要的、有效的实验工具(电子电子，电子质子，质子质子对撞)

统计数据显示，从1901年诺贝尔奖诞生之日起，一百多位诺贝尔物理学奖得主中有40多人的研究与高能物理有关

高能粒子物理可以提供宏观天体物理研究的线索：宇宙中的暗物质、暗能量，物质-反物质不对称

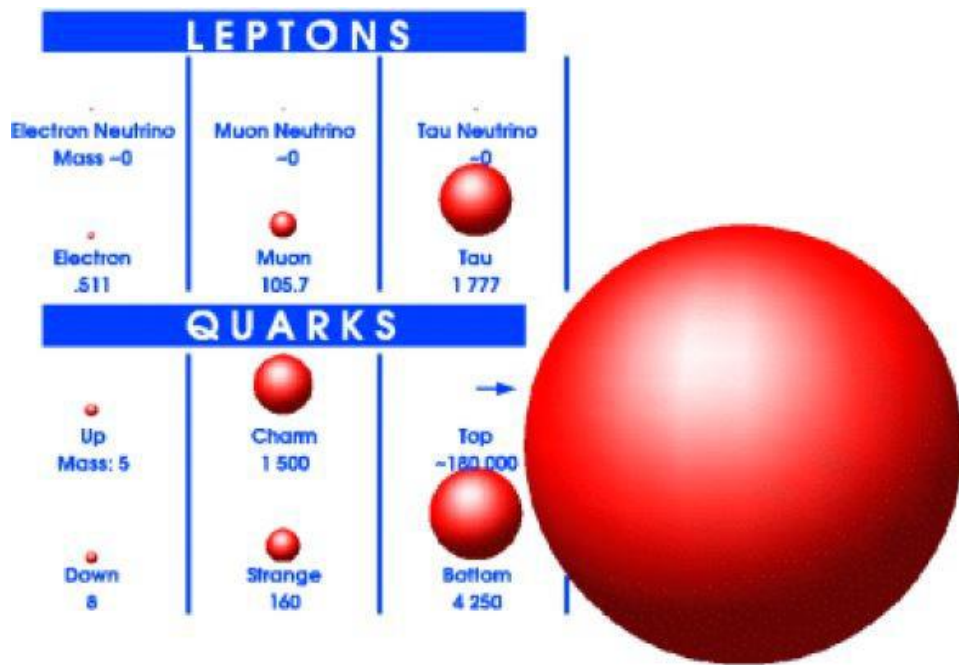
物质组成、标准模型

12种费米子



4种传递
相互作用的玻色子

基本粒子的质量

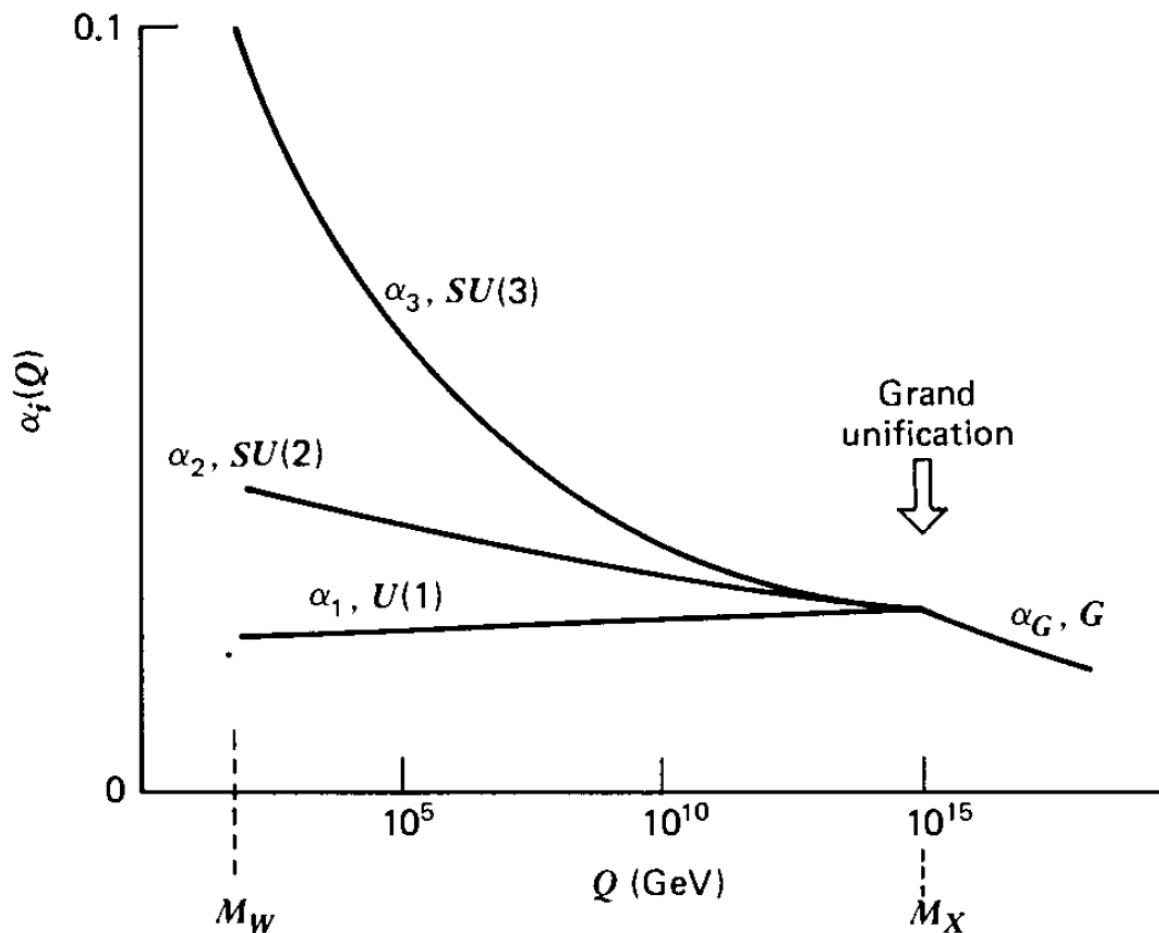


希格斯场赋予所有基本粒子以质量：

中微子 $<1\text{eV}$ ，顶夸克质量 $1.73 \times 10^{11} \text{ eV}$

为什么不同费米子的质量相差如此悬殊？标准模型没有答案。

大统一理论



随着能量的升高，在某一能标，电磁力、弱作用力和强作用力统一为一种力

粒子物理、宇宙演化

Past Events	Time	Temperature T (degrees Kelvin)	Energy kT (GeV)
Quantum gravity effects are large	10^{-45} sec	10^{32}	10^{19}
Matter-antimatter asymmetry through X-boson interactions	10^{-35} sec	10^{27}	10^{14}
Helium abundance established	10^3 sec	10^9	10^{-4}
γ 's decouple from matter, origin of photon background	10^6 years	10^3	10^{-10}
NOW!	10^{10} years	3	10^{-12}

摘自《Quarks and Leptons》，Halzen and Martin