



华南师范大学
SOUTH CHINA NORMAL UNIVERSITY

量子力学

邓明勋 (理6-437)

dengmingxun@scnu.edu.cn

QQ交流群: 791218736



群名称: 华师2021级量子力学
群号: 791218736

砺儒云课堂: <https://moodle.scnu.edu.cn/course/view.php?id=9678>

广东省量子调控工程与材料重点实验室
华南师范大学物理学院





自旋电子学研究组

团队主要成员

老师：王瑞强、**邓明勋**、段后建

博士：黄梦柔、吴永佳、陈复洋

硕士：秦韬锐、胡美薇、何雪生、
陈灼华、刘添星、谢伟俊、黄艺贝、
熊章泽、李晗、李雅希、许岱涵、牛仁朝

Welcome to join us!

量子力学应用之一:自旋电子学

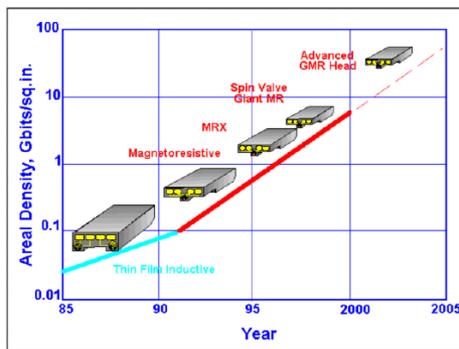
高密度低能耗经典信息存储

数据存储密度以60%/年的速度增长



1992年 ~10MB

2002年 ~10GB



1997年IBM公司率先推出GMR硬盘读出磁头

每年创造10亿美元的销售额

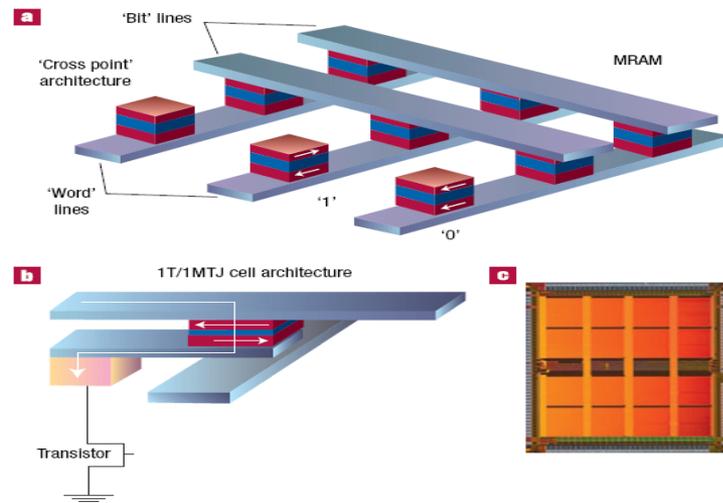
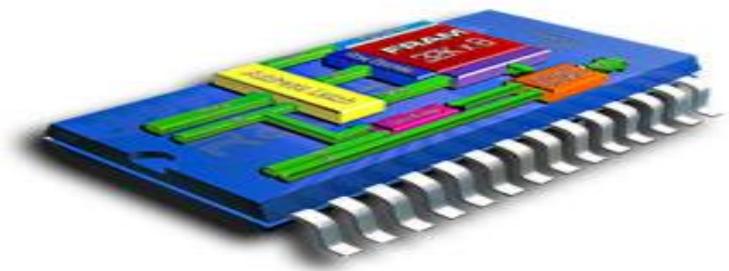


Figure 5 Magnetic random access memory. a, Principle of MRAM, in the basic cross-point architecture. The binary information 0 and 1 is recorded on the two opposite orientations of the magnetization of the free layer of magnetic tunnel

- 1) 硬盘磁读写、磁存储 (MRAM)
核心技术: 巨磁电阻效应 (GMR)
2007年获物理学诺贝尔奖;
- 2) 形成新型学科——自旋电子学



内存(磁随机存储MRAM)

量子力学应用:原子钟GPS、 量子通信、量子计算机

“墨子号” 科学实验任务

2016年8月16日

- 高速星地量子密钥分发
- 星地量子纠缠分发, 实现大尺度量子非定域性检验
[Science 356, 1140 (2017)]
- 地星量子隐形传态

本次发布的最新科学实验成果为

星地高速量子密钥分发和地星量子隐形传态

“墨子号” 已圆满实现预先设定的全部三大科学目标

@央视新闻

中国科大: 潘建伟院士

奇怪的量子世界（一）

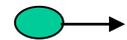
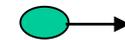
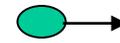
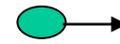
经典力学：运动轨迹（位置、动量）

$E > V$ 前进!

$E < V$ 后退!

量子力学：位置和动量无法同时确定

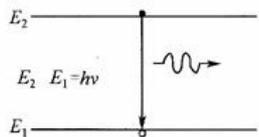
$E < V$ 后退？前进？



奇怪的量子世界（二）

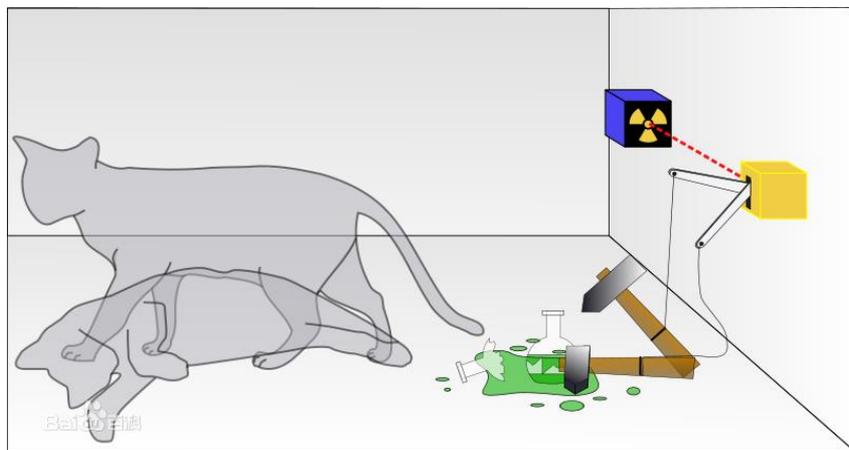
Schrodinger 和他的猫 ---1935

Erwin Schrodinger



(a) 自发辐射

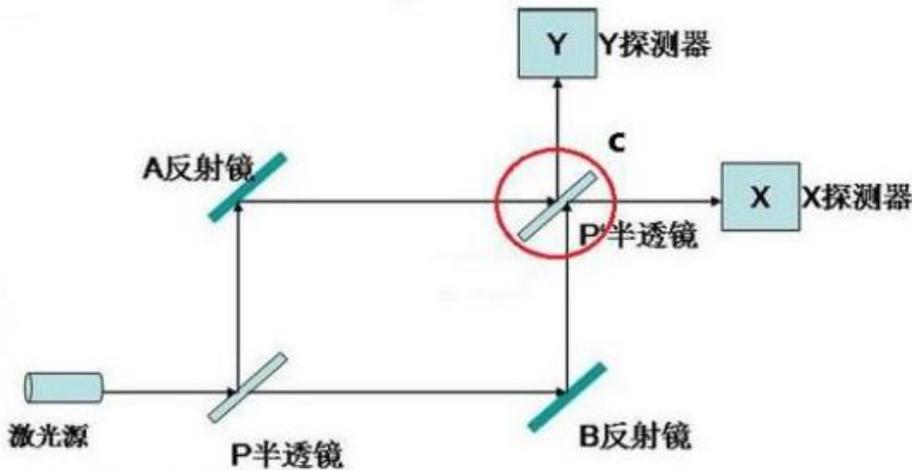
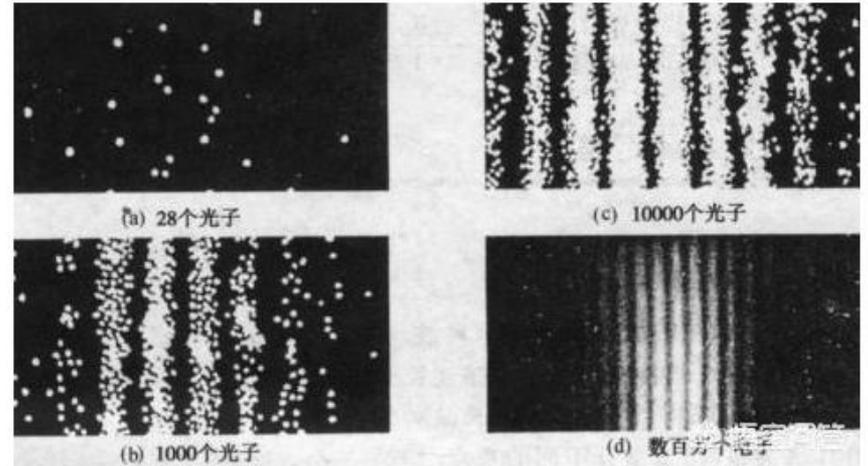
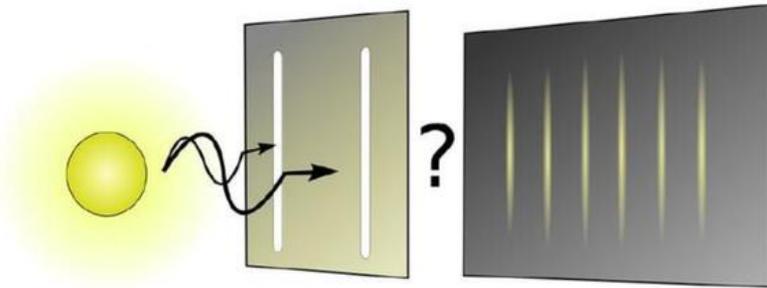
$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\uparrow\rangle + \alpha_2 |\downarrow\rangle$$



$$|\psi\rangle = \alpha_1 |\text{活}\rangle + \alpha_2 |\text{死}\rangle$$

奇怪的量子世界（三）

双缝干涉和延迟决定实验



物质决定意识？
意识决定物质？

“未来可以决定过去”？

“我们选择了这个宇宙，
之后宇宙才创造了我们”

揭秘：“量子+生活”，全都是骗子！

- ❌ 量子水、量子药、量子肥料
- ❌ 量子水、量子袜、量子眼镜
- ❌ “量子”防癌，量子返老返童
- ❌ 量子波动速读



一件产品量子不量子，看什么？郭光灿院士给出了说法：“判断一个商品是不是量子的，就是要看它有没有用到量子的相干性、叠加性，如果没有用上，它就不是量子。”

学术争鸣

DOI: 10.13703/j.0255-2930.2017.11.026

中图分类号: R 245 文献标志码: A

试论“量子纠缠”与针灸

王 军, 吴 彬, 陈晟

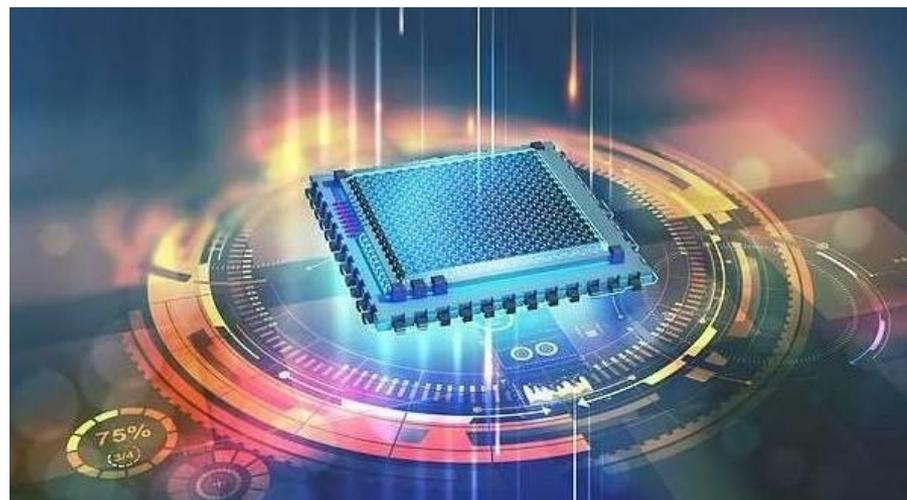
(北京中医药大学东直门医院针灸科, 北京 100700)

[摘要] 量子纠缠理论是近代物理学的新发现, 当前已获得世人广泛关注。笔者通过学习量子理论, 发现量子的许多特性在中医、针灸理论与临床中得到体现, 例如量子纠缠现象与中医学中整体观念、阴阳学说、标本根结等理论可以相互印证, 能解释针灸临床中难以解释的针刺瞬时取效、一病多穴、特效穴等临床现象。基于这一理论, 笔者运用量子纠缠理论实现针灸临床的直系亲属互治, 且效果显著, 结果提示疾病与直系亲属的相应腧穴之间存在着量子纠缠的耦合关系。笔者认为, 本研究的发现将有利于拓展针灸临床的治疗途径, 也有助于丰富疾病预防的理念。

[关键词] 量子纠缠; 针灸; 中医; 直系亲属互治



为什么学量子力学？



先进思想！

不连续！
不确定！

先进生产力

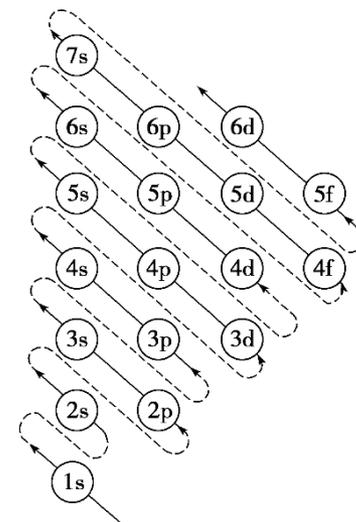
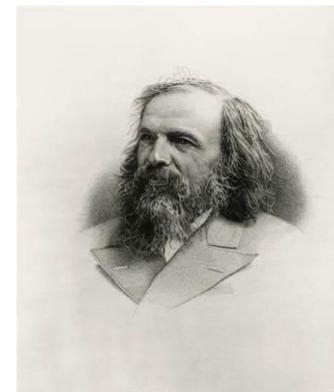
学好量子力学是与“先进”为伍！



为什么学量子力学?

Periodic Table of the Elements

IA 1											IIA 2											IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18																							
1 1.0 1 H											4.0 2 He											10.8 5 B	12.0 6 C	14.0 7 N	16.0 8 O	19.0 9 F	20.2 10 Ne																							
2 6.9 3 Li	9.0 4 Be											27.0 13 Al	28.1 14 Si	31.0 15 P	32.1 16 S	35.5 17 Cl	39.9 18 Ar																																	
3 23.0 11 Na	24.3 12 Mg	III B 3	IV B 4	VB 5	VIB 6	VII B 7	VIII 8 9 10			IB 11	IIB 12	69.7 31 Ga	72.6 32 Ge	74.9 33 As	79.0 34 Se	79.9 35 Br	83.8 36 Kr																																	
4 39.1 19 K	40.1 20 Ca	45.0 21 Sc	47.9 22 Ti	50.9 23 V	52.0 24 Cr	54.9 25 Mn	55.8 26 Fe	58.9 27 Co	58.7 28 Ni	63.5 29 Cu	65.4 30 Zn	69.7 31 Ga	72.6 32 Ge	74.9 33 As	79.0 34 Se	79.9 35 Br	83.8 36 Kr																																	
5 85.5 37 Rb	87.6 38 Sr	88.9 39 Y	91.2 40 Zr	92.9 41 Nb	96.9 42 Mo	98.9 43 Tc	101.1 44 Ru	102.9 45 Rh	106.4 46 Pd	107.9 47 Ag	112.4 48 Hg	114.8 49 In	118.7 50 Sn	121.8 51 Sb	127.6 52 Te	126.9 53 I	131.3 54 Xe																																	
6 132.9 55 Cs	137.3 56 Ba	138.9 57 La	175.0 72 Hf	180.9 73 Ta	183.8 74 W	186.2 75 Re	190.2 76 Os	192.2 77 Ir	195.1 78 Pt	197.0 79 Au	200.6 80 Hg	204.4 81 Tl	207.2 82 Pb	208.9 83 Bi	209 84 Po	210 85 At	222 86 Rn																																	
7 223 87 Fr	226 88 Ra	227 89 Ac	<table border="1"> <tr> <td>138.9 57 La</td> <td>140.9 58 Ce</td> <td>140.9 59 Pr</td> <td>140.9 60 Nd</td> <td>140.9 61 Pm</td> <td>140.9 62 Sm</td> <td>140.9 63 Eu</td> <td>140.9 64 Gd</td> <td>140.9 65 Tb</td> <td>140.9 66 Dy</td> <td>140.9 67 Ho</td> <td>140.9 68 Er</td> <td>140.9 69 Tm</td> <td>140.9 70 Yb</td> <td>140.9 71 Lu</td> </tr> <tr> <td>223 87 Fr</td> <td>226 88 Ra</td> <td>227 89 Ac</td> </tr> </table>															138.9 57 La	140.9 58 Ce	140.9 59 Pr	140.9 60 Nd	140.9 61 Pm	140.9 62 Sm	140.9 63 Eu	140.9 64 Gd	140.9 65 Tb	140.9 66 Dy	140.9 67 Ho	140.9 68 Er	140.9 69 Tm	140.9 70 Yb	140.9 71 Lu	223 87 Fr	226 88 Ra	227 89 Ac															
138.9 57 La	140.9 58 Ce	140.9 59 Pr	140.9 60 Nd	140.9 61 Pm	140.9 62 Sm	140.9 63 Eu	140.9 64 Gd	140.9 65 Tb	140.9 66 Dy	140.9 67 Ho	140.9 68 Er	140.9 69 Tm	140.9 70 Yb	140.9 71 Lu																																				
223 87 Fr	226 88 Ra	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac	227 89 Ac																																	



教材与参考书

- 教材:周世勋 《量子力学教程》
- 参考书目:
 1. 曾谨言 《量子力学导论》；卷I; 习题集（上）
 2. Greiner（顾莱纳）《量子力学导论》北大版中译本
 3. 倪光炯《高等量子力学》
 4. 狄拉克《量子力学原理》
 5. 费曼《费曼物理学讲义》第三册

学习成绩

- 学习成绩：

平时成绩30%+期末70%=100%

- 平时作业：习题（教材）
- 考试方式：期中、期末考试（闭卷）

目 录

- 第一章 绪论
- 第二章 波函数和 Schrodinger 方程
- 第三章 量子力学中的力学量
- 第四章 态和力学量的表象
- 第五章 微扰理论
- 第六章 散射
- 第七章 自旋与全同粒子
- 第八章 量子力学若干进展

第一章 绪论

§ 1.1 经典物理学的困难



§ 1.2 光的波粒二象性



§ 1.3 原子结构的玻尔理论



§ 1.4 微粒的波粒二象性



§ 1.5 例题



第一节：经典物理学的困难

(一) 经典物理学的成功

19世纪末20世纪初，物理学理论在当时看来已经发展到了相当完善的阶段。主要表现在以下方面：

- **经典力学：**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，表明电子的行为类似于一个牛顿粒子。
- **电磁学：**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
- **统计物理学：**玻尔兹曼、吉布斯等。

(一) 经典物理学的成功

- 已经认识到热辐射和光辐射都是电磁波
- 提出了热辐射满足的基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律和斯特藩 (Stefan) -玻尔兹曼 (Boltzmann) 定律, 证实黑体辐射场的能量密度与温度的四次方成正比。
- 当时把物理学的理论认作“**终极理论**”

物理现象的基本规律已经完全被揭露, 剩下的只是将它们应用于具体问题的计算!

1875年，普朗克曾在慕尼黑大学学物理时，物理老师P.约里（1809-1884）曾劝他不要学纯理论，因为物理学“是一门高度发展的、几乎是臻善臻美的科学”，现在这门科学“看来很接近于采取最稳定的形式。也许，在某个角落里还有一粒尘屑或一个小气泡，对它们可以去进行研究和分类，但是，作为一个完整的体系，那是建立得足够牢固的。而理论物理学正在明显地接近于几何学在数百年中所已具有的那样完美的程度。”

普朗克的另一位名师，柏林大学的G.基尔霍夫（1824-1887）也说过类似的话，他说“物理学已经无所作为，往后无非在已知规律的小数点后面加上几个数字而已。”

(二) 经典物理学的困难

19世纪的最后一天，欧洲著名的科学家欢聚一堂。会上，英国著名物理学家W.汤姆生（即开尔文勋爵）发表了新年祝词。他在回顾物理学所取得的伟大成就时说，物理大厦已经落成，所剩只是一些修饰工作。同时，他在展望20世纪物理学前景时，却若有所思地讲道：“动力理论肯定了热和光是运动的两种方式，现在，它的美丽而晴朗的天空却被两朵乌云笼罩了...”

第一朵乌云，主要是指迈克尔逊-莫雷实验结果和以太漂移说相矛盾；第二朵乌云，主要是指热学中的能量均分定理在气体比热以及黑体辐射能谱的理论解释中得出与实验不等的结果，其中尤以黑体辐射理论出现的“紫外灾难”最为突出。

经典理论在解释一些新的试验结果上遇到了严重的困难：

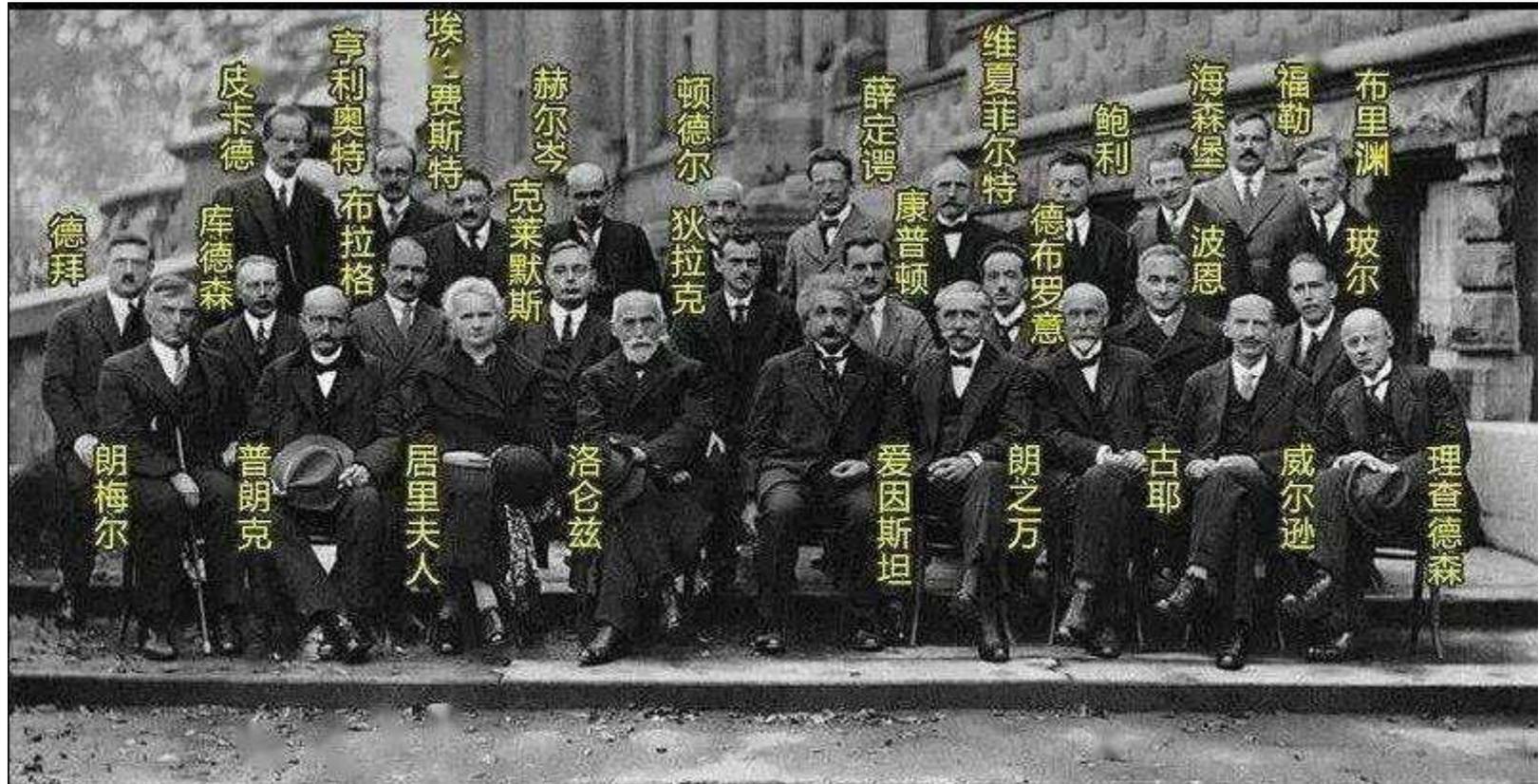
1. 黑体辐射问题 → 辐射量子假说
2. 光电效应 → 光的波粒二象性
3. 氢原子光谱 → 原子结构的量子论：经典理论+假设
→ 微观粒子的波粒二象性 → 量子力学

量子力学全家福



1911年第1届索尔维会议参加者合照

量子力学全家福



1927年第五届索尔维会议

Phys. Rev. 47, 777–780

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

Abstract

No References

Citing Articles (2,368)

Page Images

Download: [PDF](#) (616 kB) Export: [BibTeX](#) or [EndNote](#) (RIS)

A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey



Received 25 March 1935

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

© 1935 The American Physical Society

URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.47.777>

DOI: [10.1103/PhysRev.47.777](https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777)

Phys. Rev. 48, 696–702

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?

Abstract

References

Citing Articles (262)

Page Images

Download: [PDF \(1,097 kB\)](#) Export: [BibTeX](#) or [EndNote \(RIS\)](#)

N. Bohr

Institute for Theoretical Physics, University, Copenhagen



Received 13 July 1935

It is shown that a certain "criterion of physical reality" formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed "complementarity" is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness.

© 1935 The American Physical Society

URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.48.696>

DOI: [10.1103/PhysRev.48.696](https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696)

EPR 佯谬

Bohm version

爱因斯坦等人认为：如果一个物理理论对物理实在的描述是完备的，那么物理实在的每个要素都必须在物理理论里有其对应的要素，即**完备性判据**。

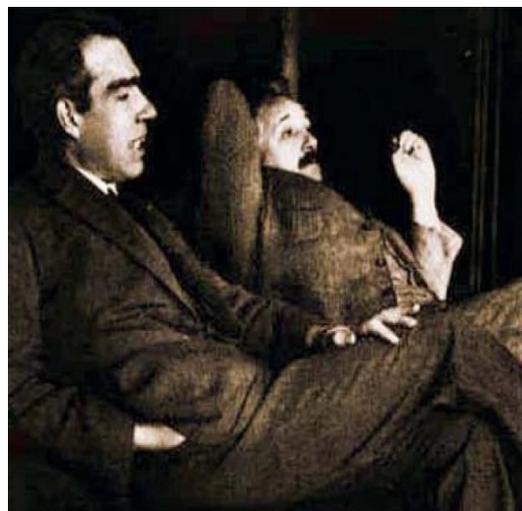
假设在对系统不造成任何搅扰的状况下，可以准确地预测一个物理量的数值，则对应于这物理量存在了一个**物理实在的要素**，即**实在性判据**。

他们认为，量子力学不满足这些判据，所以是不完备的。如果坚持把量子力学看作是完备的，那就必须认为对1的测量可以影响到2的状态，从而导致对某种超距作用的承认。

EPR 实在性判据包含着“定域性假设”，即如果测量时两个体系不再相互作用，那么对第一个体系所能做的无论什么事，都不会使第二个体系发生任何实在的变化。人们通常把和这种定域要求相联系的物理实在

观称为**定域实在论**。

量子力学



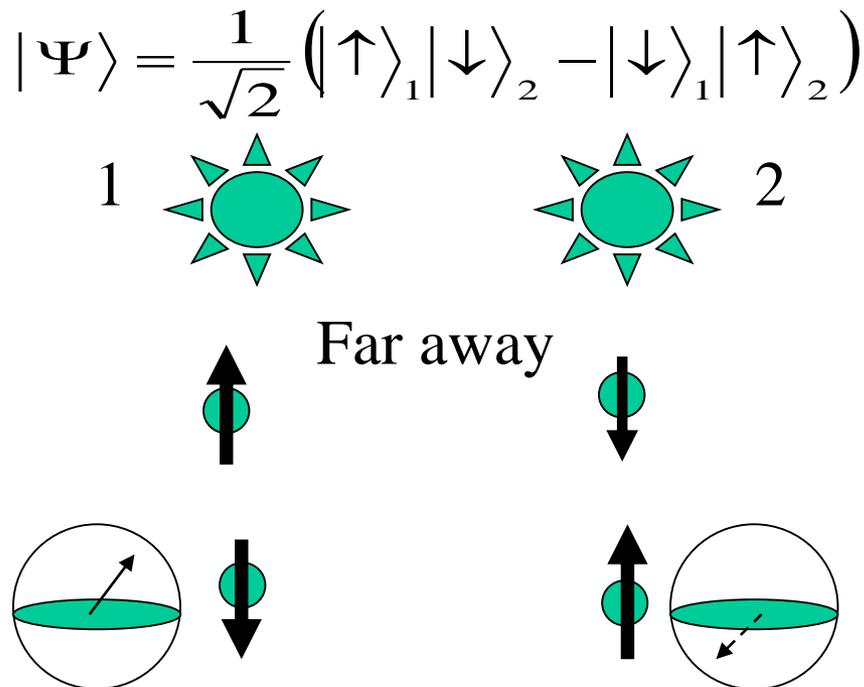
Einstein:

I can't believe God plays dice with the universe.



Bohr:

Albert, stop telling God what to do.



Schrodinger 和他的猫 ---1935

Erwin Schrodinger

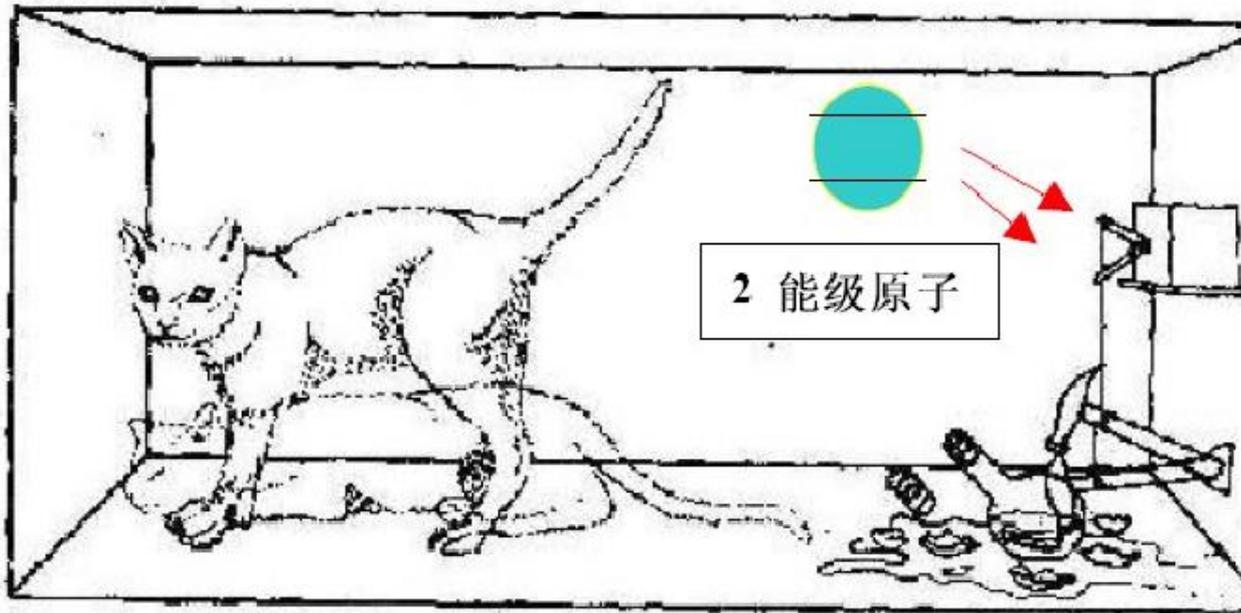


图1: 作为量子纠缠态的“薛定谔猫” (取自Phys. Today, 23, 9 并修改)



叠加 $|\psi\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$

纠缠 $|\psi\rangle = \alpha_1 |\text{活}\uparrow\rangle + \alpha_2 |\text{死}\downarrow\rangle$

玻尔名言：“谁要是第一次听到量子理论时没有感到困惑，那他一定没听懂。”

Bell不等式:

量子理论从哲学争辩到实验验证

关于量子纠缠态和量子非局域关联的争论，一开始只是思辩性的，直到1965年 J S Bell 导出了一个著名的不等式，情况才有了根本的改变。[J. S. Bell, Rev. Mod. Phys. 38, 447 (1966)]

Bell不等式是从隐参数理论和定域实在论出发推出的，它若成立，就表明量子理论有问题；它若被违背，则表明量子理论是成立的。

1982年，A Aspect 等人的实验表明，Bell不等式被违背。

[最新实验宣告爱因斯坦隐变量理论出局？](#)

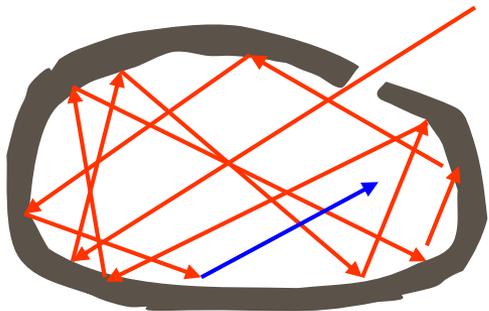
(二) 经典物理学的困难

在进入20世纪以后，经典理论在解释一些新的实验结果上遇到了严重的困难。19世纪最后一天，开尔文：晴朗天空中笼罩着“**两朵乌云**” ---“**紫外灾难**”（诞生量子物理学）、“**以太漂移**”（诞生相对论）

- (1) **黑体辐射问题**
 - (2) **光电效应**
 - (3) **氢原子光谱**
- } 光的波粒二象性

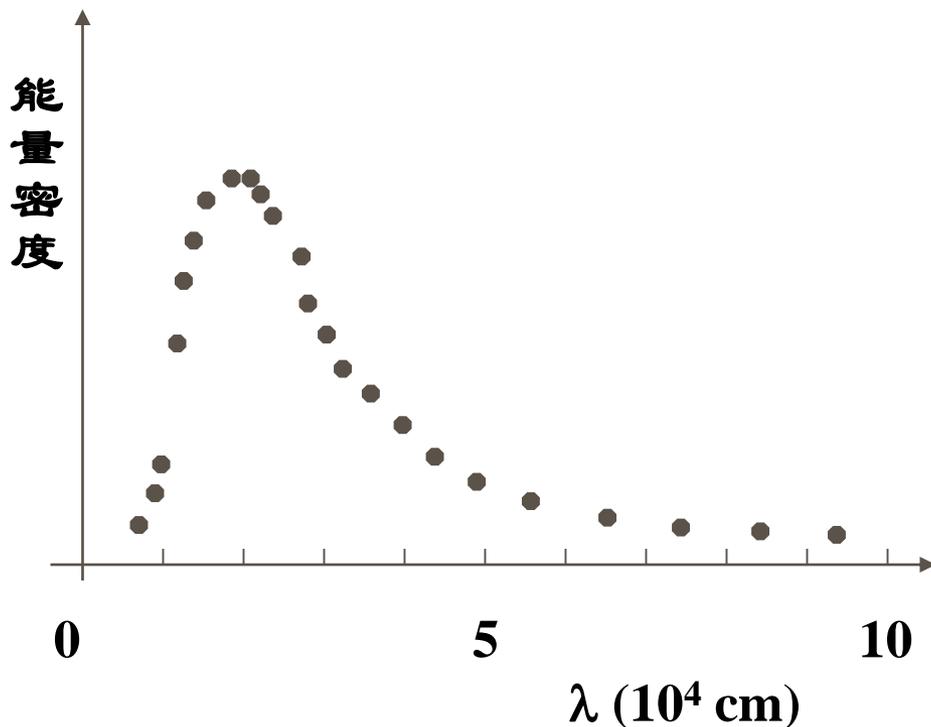
§ 1.2 光的波粒二象性

一、黑体辐射问题



黑体：能吸收射到其上的全部辐射的物体，这种物体就称为绝对黑体，简称黑体。

辐射热平衡状态：处于某一温度 T 下的腔壁，单位面积所发射出的辐射能量和它所吸收的辐射能量相等时，辐射达到**热平衡状态**。



热平衡时，空腔辐射的能量密度与辐射的波长的分布曲线，其形状和位置只与黑体的绝对温度 T 有关而与黑体的**形状**和**材料**无关。

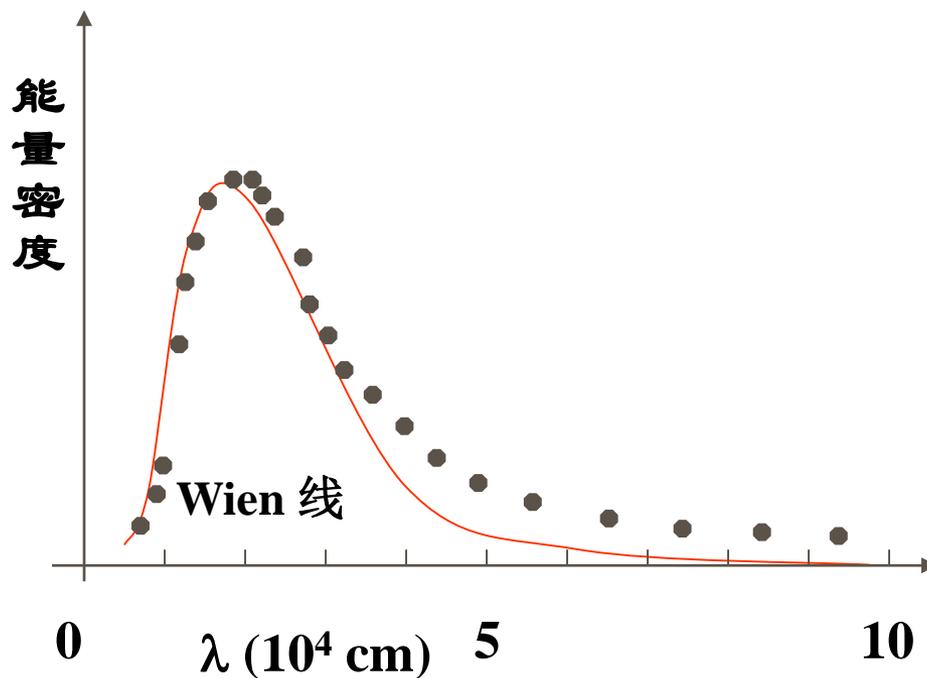
维恩公式：热力学 $\rho_\nu d\nu = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu/T} d\nu$

黑体辐射谱的 **Wien 经验公式** (1894 年) :

考虑黑体空腔中单位体积的辐射场, 令其中频率在 $\nu \rightarrow \nu + d\nu$ 间的能量密度为 $dE_\nu = \varepsilon(\nu)d\nu$, 该公式可以明确地写为

$$dE_\nu = \varepsilon(\nu)d\nu = N_\nu \bar{\varepsilon}_\nu d\nu = c_1 \nu^3 e^{-c_2 \nu \beta} d\nu \quad (1.1)$$

这里 c_1 、 c_2 是两个常系数, $\beta = 1/kT$ 。此公式在短波长 (高频率) 区间内与实验符合, 但在中、低频区, **特别是低频区与实验差别很大。**

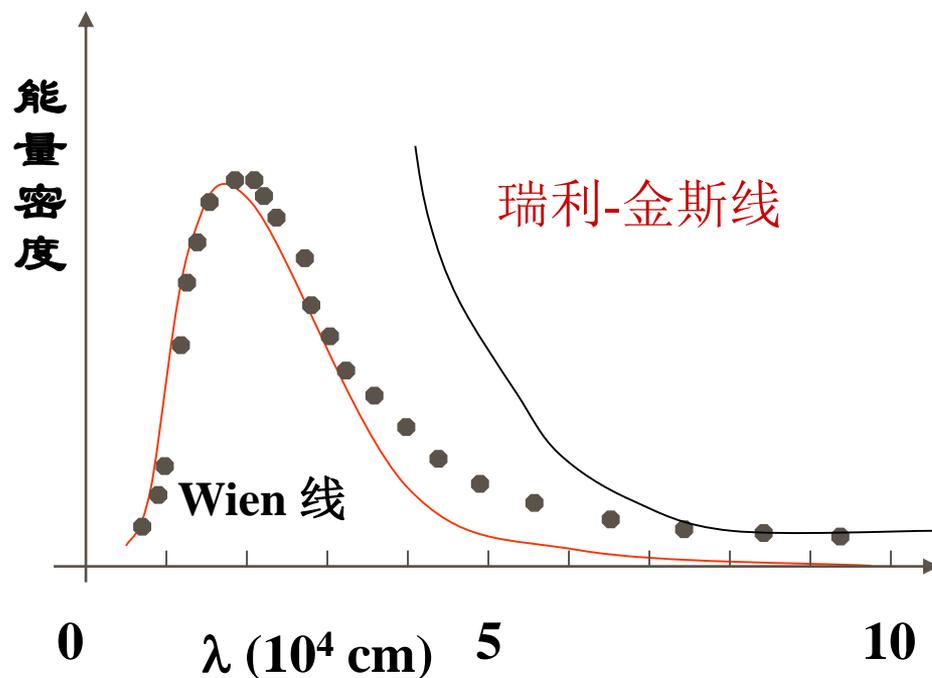


维恩公式：热力学

$$\rho_\nu d\nu = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu / T} d\nu$$

瑞利-金斯：经典电动力学+统计物理学

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT d\nu$$



维恩线公式在短波部分与实验还相符合，长波部分则明显不一致；

瑞利金斯线则长波部分较符合而短波部分完全不符（紫外灾难）

Rayleigh-Jeans 公式 (1900, Rayleigh; 1905, Jeans) :

将腔中黑体辐射场看成大量电磁波驻波振子集合, 利用能量连续分布的经典观念和 *Maxwell - Boltzmann* 分布律, 导出黑体辐射谱的另一个表达式——。若记 $\varepsilon(\nu) = N_\nu \bar{\varepsilon}_\nu$, 这里 N_ν 是腔中辐射场单位体积内频率 ν 附近单位频率间隔内电磁驻波振子数目 (自由度数目), 它为 $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ 。下面来简单推算出它:

$$0 \rightarrow L: e^{ikx} \Big|_{x=0} = e^{ikx} \Big|_{x=L}$$

$$kL = 2n\pi \rightarrow k = \frac{2n\pi}{L} \rightarrow \Delta k = \frac{2\pi}{L} \quad /$$

于是, 在单位体积辐射场中, 波数在 $\bar{k} \rightarrow \bar{k} + d^3k$ 内的自由度数目 ($|\bar{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c}$) 为

$$\left. \frac{2d^3k}{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3} \right|_{L=1} = \frac{2 \cdot 4\pi |\bar{k}|^2 d|\bar{k}|}{8\pi^3} = \frac{|\bar{k}|^2 d|\bar{k}|}{\pi^2} = \frac{8\pi^3 \nu^2 d\nu}{c^3 \pi^2} = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$$

而 $\bar{\varepsilon}_\nu$ 是频率为 ν 的驻波振子的平均能量, 由 *M-B* 分布律得

$$\bar{\varepsilon}_\nu = \frac{\int_0^\infty \varepsilon e^{-\varepsilon\beta} d\varepsilon}{\int_0^\infty e^{-\varepsilon\beta} d\varepsilon} = kT$$

于是得到 *Rayleigh-Jeans* 公式

$$dE_\nu = \varepsilon(\nu)d\nu = \frac{8\pi kT\nu^2}{c^3} d\nu \quad (1.2)$$

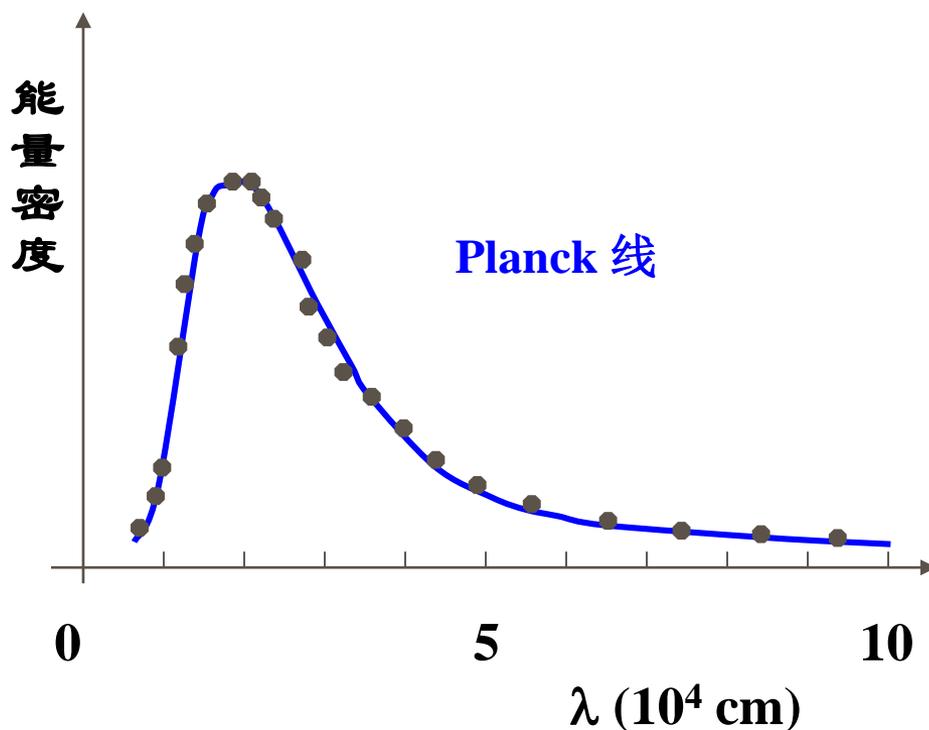
普朗克 (Planck) 黑体辐射公式 (1900年)

普朗克假设: 黑体只能以 $E = h\nu$ 为能量单位不连续的发射和吸收辐射能量, 而不是象经典理论所要求的那样可以连续的发射和吸收辐射能量。
普朗克常数 $h=6.62606896(33)\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$

• **Planck黑体辐射公式:**

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

$$\begin{cases} \text{高频: } e^{c_2\nu/T} - 1 \approx e^{c_2\nu/T} \rightarrow \text{Wein} \\ \text{低频: } e^{c_2\nu/T} - 1 \approx c_2\nu/T \rightarrow \text{R-J} \end{cases}$$



1900年 *Planck* 用一种崭新的观念来计算平均能量 $\bar{\varepsilon}_\nu$ 。他引入了“**能量子**”的概念，即，假设黑体辐射空腔中**振子的振动能量并不象经典理论所主张的那样和振幅平方成正比并呈连续变化，而是和振子的频率 ν 成正比并且只能取分立值，**

$$0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$$

这里的正比系数 h 就是后来所称的 ***Planck* 常数**。与此相应，腔中辐射场和温度为 T 的腔壁物质之间达到热平衡后，**交换的能量也是这样一份份的**。由此，按经典统计理论的麦-波分布律，与上述能级相对应的比例系数分别为

$$1, e^{-h\nu\beta}, e^{-2h\nu\beta}, e^{-3h\nu\beta}, \dots$$

将这些系数归一化(除以这些系数的总和)使它们变成为权重系数，就得到对应频率 ν 的驻波振子的平均能量，

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_\nu &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu \exp[-nh\nu\beta]}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nh\nu\beta]} = -\frac{\partial}{\partial\beta} \ln \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-nh\nu\beta] \right\} \\ &= \frac{\partial}{\partial\beta} \ln \{1 - \exp[-h\nu\beta]\} = \frac{h\nu}{e^{h\nu\beta} - 1}\end{aligned}$$

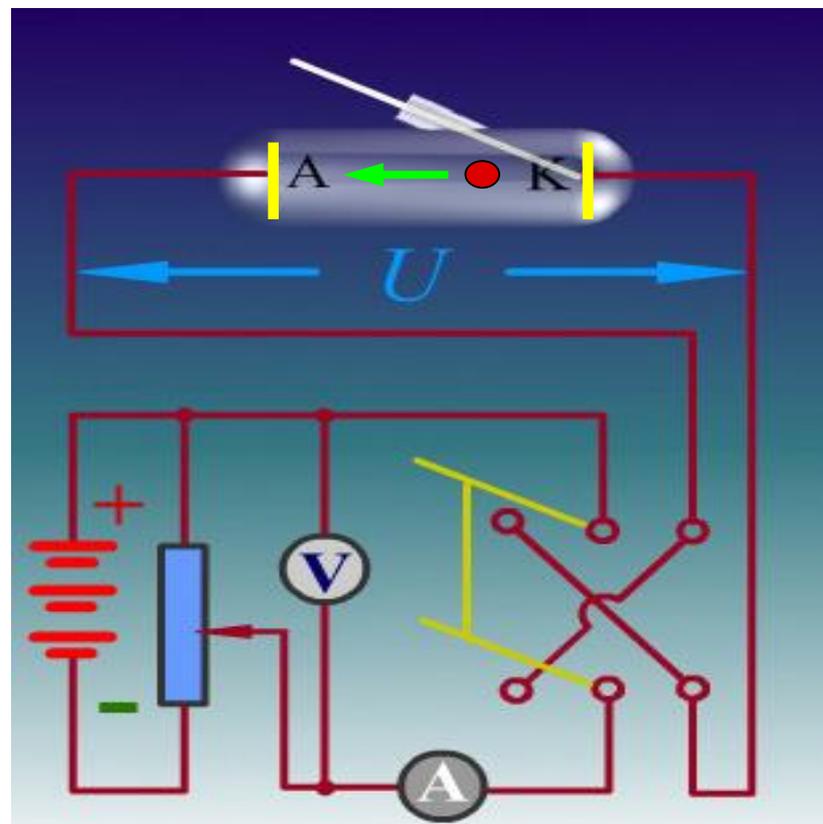
将这个平均能量 $\bar{\varepsilon}_\nu$ 乘以自由度数目，就得到下面 ***Planck* 公式**

$$\boxed{\varepsilon(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu\beta} - 1}} \quad (1.3)$$

二、光电效应

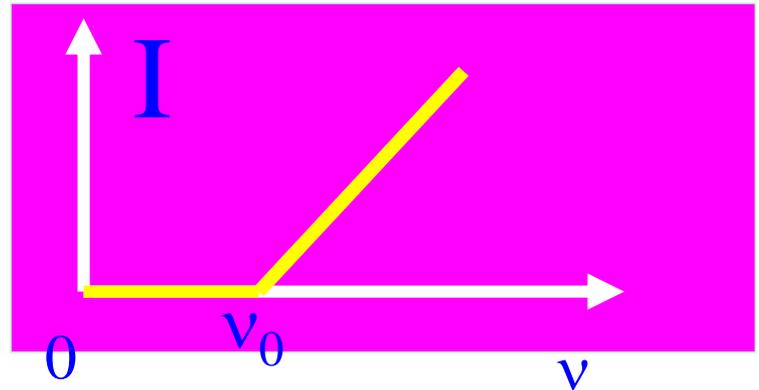
1、赫兹的光电效应实验 (1887)

光电效应：光照射到金属上，有电子从金属上逸出现象，这种电子称之为光电子。



(实验装置示意图)

2、光电效应应有两个突出的特点：



电流与频率关系曲线

(1) **临界频率 ν_0** 只有当光的频率 $\nu > \nu_0$ 时，才有光电子发射出来；若 $\nu < \nu_0$ 时，则不论光的强度多大，照射时间多长，都没有电子产生。光的这一频率 ν_0 称为临界频率。

(2) **光的频率决定光子的能量，光强只决定光子的数目。**
光电效应的这些规律是经典理论无法解释的。按照光的电磁理论，光的能量只决定于光的强度而与频率无关。

2 光子概念

第一个肯定光具有微粒性的是 [Einstein](#)，他认为，光不仅是电磁波，还是一种粒子。根据他的理论，电磁辐射不仅在发射和吸收时以能量 $h\nu$ 的微粒形式出现，而且以这种形式在空间以光速 c 传播，这种粒子叫做光量子，或光子。

3 Einstein的光电效应理论

用光子的概念, Einstein 成功地解释了光电效应的规律。

当光照射到金属表面时, 能量为 $h\nu$ 的光子被电子所吸收, 电子把这份能量的一部分用来克服金属表面对它的吸引, 另一部分用来提供电子离开金属表面时的动能。其能量关系可写为:

$$\frac{1}{2} m_e v_m^2 = h\nu - W_0$$

- 从上式不难解释光电效应的两个典型特点.

4 光子的动量

$$E = h\nu = mc^2 \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2}$$
$$h\nu_0 = h\nu + mgH = h\nu + \frac{h\nu}{c^2} gH$$

■ 光子的能量 $E = h\nu$ ，根据相对论知：

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

其中 m_0 是粒子的静止质量。

对于光子，速度 $v = c$ ，则光子静质量为零 $m_0 = 0$ 。

$$E^2 = (m_0 c^2)^2 + (pc)^2 = (pc)^2$$

总结光子能量、动量关系式如下：

于是得光子的能动量关系：

$$E = pc \text{ 或 } p = E/c$$

$$\begin{cases} E = h\nu = \hbar\omega \\ \vec{p} = \frac{E}{c} \vec{n} = \frac{h\nu}{c} \vec{n} = \frac{h}{\lambda} \vec{n} = \hbar \vec{k} \end{cases}$$

其中 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ；波矢 $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$

把光子的波动性和粒子性
联系起来

- 虽然爱因斯坦对光电效应的解释是对Planck量子概念的极大支持，但是Planck不同意爱因斯坦的光子假设，这一点流露在Planck推荐爱因斯坦为普鲁士科学院院士的推荐信中。

“ 总而言之，我们可以说，在近代物理学结出硕果的那些重大问题中，很难找到一个问题是爱因斯坦没有做过重要贡献的，在他的各种推测中，他有时可能也曾经没有射中靶的，例如，他的光量子假设就是如此，但是这确实并不能成为过分责怪他的理由，因为即使在最精密的科学中，也不可能不偶尔冒点风险去引进一个基本上全新的概念 ”

三、康普顿 (Compton) 效应

——证实了光的粒子性

1、康普顿效应： 高频率 X 射线被轻元素中的电子散射后，波长随散射角的增加而增大。

经典电动力学认为电磁波被散射后，波长不应该发生改变。但是如果把 X 射线被电子散射的过程看成是光子与电子的碰撞过程，则该效应很容易得到理解

2、定性解释

- 根据光量子理论，具有能量 $E = h\nu$ 的光子与电子碰撞后，光子把部分能量传递给电子，光子的能量变为 $E' = h\nu'$ 显然有 $E' < E$ ，从而有 $\nu' < \nu$ ，散射后的光子的频率减小，波长变长。根据这一思路，可以证明：

$$\Delta\lambda = 2\lambda_0 \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad \text{其中}$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{m_0C} = 2.4 \times 10^{-10} \text{ cm} \text{ 称为电子的康普顿波长.}$$

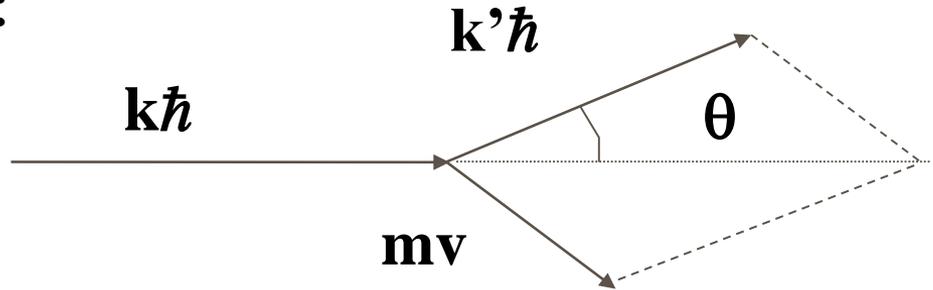
- 该式首先由康普顿提出，后被康普顿和吴有训用实验证实，用量子概念完全解释了康普顿效应。因为右式是一个恒大于或等于零的数，所以散射波的波长 λ' 总是比入射波波长长 ($\lambda' > \lambda$) 且随散射角 θ 增大而增大。
- 式中包含了 Planck 常数 h ，在宏观现象中， h 和其他物理量相比可以略去，因而辐射的能量可以连续变化；凡是 h 在其中起重要作用的现象都可以称为量子效应。

(3) 证明

根据能量和动量守恒定律：

$$\begin{cases} \hbar\omega - \hbar\omega' = mc^2 - m_0c^2 \\ \hbar\vec{k} - \hbar\vec{k}' = m\vec{v} \end{cases}$$

↑ 代入



两边平方

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} = kc \quad \text{得:} \quad \hbar c(k - k') = (m - m_0)c^2$$

两边平方：

$$\hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk') = (m - m_0)^2 c^2 \quad (1)$$

$$\hbar^2(k^2 + k'^2 - 2kk' \cos \theta) = (mv)^2 \quad (2)$$

(2) 式— (1) 式得：

$$\hbar^2 2kk'(1 - \cos \theta) = (mv)^2 - (m^2 + m_0^2 - 2mm_0)c^2$$

$$4\hbar^2 kk' \sin^2 \frac{\theta}{2} = m^2(v^2 - c^2) - m_0^2 c^2 + 2mm_0 c^2$$

$$\begin{aligned}
 4\hbar^2 k k' \sin^2 \frac{\theta}{2} &= m^2 (v^2 - c^2) - m_0^2 c^2 + 2m m_0 c^2 \\
 &= \frac{m_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} (v^2 - c^2) - m_0^2 c^2 + 2m m_0 c^2 \\
 &= \frac{m_0^2 c^2}{-(v^2 - c^2)} (v^2 - c^2) - m_0^2 c^2 + 2m m_0 c^2
 \end{aligned}$$

$$\hbar \omega - \hbar \omega' = m c^2 - m_0 c^2 = 2 m_0 (m - m_0) c^2$$

$$\omega = k c \implies = 2 m_0 \hbar (\omega - \omega') = 2 m_0 \hbar c (k - k')$$

所以

$$\begin{aligned}
 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} &= \frac{m_0 c}{\hbar} \left(\frac{k - k'}{k k'} \right) = \frac{m_0 c}{\hbar} \left(\frac{1}{k'} - \frac{1}{k} \right) = \frac{m_0 c}{2\pi\hbar} (\lambda' - \lambda) \\
 &= \frac{m_0 c}{2\pi\hbar} \Delta\lambda
 \end{aligned}$$

其中

$$\lambda_0 = \frac{2\pi\hbar}{m_0 c} = 2.4 \times 10^{-10} \text{ cm}$$

$$\text{最后得: } \Delta\lambda = 2 \frac{2\pi\hbar}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_0 \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

电子康普顿波长



§ 1.3 原子结构的玻尔理论

- 氢原子光谱有许多分立谱线组成，这是很早就发现了的。1885年瑞士**巴尔末**发现紫外光附近的一个线系，并得出氢原子谱线的经验公式是：

$$\nu = R_H c \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

其中 $R_H = 1.09677576 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 是氢的里德伯常数, c 是光速。

- 这就是著名的**巴尔末公式** (Balmer)。
- 以后又发现了一系列线系，它们都可以用下面公式表示：

$$\nu = R_H c \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > m$$

■ 这些问题，经典物理学不能给予解释。

1) 经典物理学不能建立一个稳定的原子模型。根据经典电动力学，电子环绕原子核运动是加速运动，因而不断以辐射方式发射出能量，电子运动轨道的曲率半径也就不断减小，因此绕原子核运动的电子，终究会因大量损失能量而“掉到”原子核中去，原子就“坍塌”了。

2) 不能解释谱线频率分布遵从并合原则，因为加速电子所产生的辐射，其频率是连续分布的。

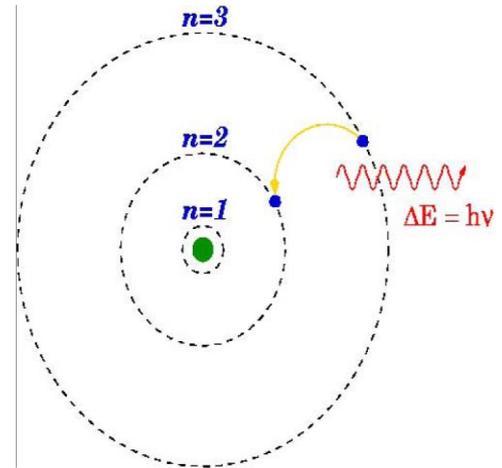
玻尔（Bohr）的原子量子论

- **Planck--Einstein** 光量子概念必然会促进物理学其他重大疑难问题的解决。1913年 **Bohr** 把这种概念运用到原子结构问题上，提出了他的原子量子论。

1、玻尔的假定：

在原子中的电子处于能量不连续的**定态**。当原子处于定态时不发生辐射；只有当电子从一个定态能级 E_n 跃迁到另一个定态能级 E_m 时，才发射（吸收）一个光子。光子的频率为：

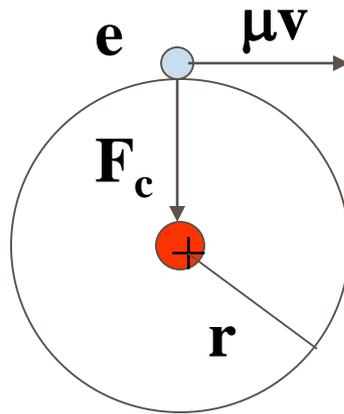
$$\nu_{mn} = |E_n - E_m| / h$$



2、玻尔的量子化条件： $L = n\hbar$

附：由玻尔假定推导巴耳末公式

假设氢原子中的电子绕核作圆周运动



$$F_c = \frac{\mu v^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{e^2}{\mu r} \quad (1)$$

角动量

由量子化条件

$$L = |\vec{r} \times \vec{p}| = r\mu v = n\hbar \longrightarrow (r\mu v)^2 = n^2\hbar^2$$

$$r^2 \mu^2 \frac{e^2}{\mu r} = n^2 \hbar^2$$

$$r = \frac{n^2 \hbar^2}{\mu e^2} \quad (2)$$

$$n = 1 \quad r_0 = \frac{\hbar^2}{\mu e^2}$$

第一 Bohr 轨道半径

电子的能量

$$v^2 = \frac{e^2}{\mu r} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 E = T + V &= \frac{1}{2} \mu v^2 - \frac{e^2}{r} \\
 &= \frac{1}{2} \mu \frac{e^2}{\mu r} - \frac{e^2}{r} = -\frac{e^2}{2r} = -\frac{\mu e^4}{2n^2 \hbar^2} = E_n
 \end{aligned} \quad (2)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

根据 Bohr
量子跃迁的
概念

$$\nu = \frac{[E_n - E_m]}{h} = \frac{1}{2\pi\hbar} \left[-\frac{\mu e^4}{2n^2 \hbar^2} + \frac{\mu e^4}{2m^2 \hbar^2} \right]$$

$$= \frac{\mu e^4}{4\pi\hbar^3} \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

与氢原子线光谱
的经验公式比较

$$\nu_{\text{exp}} = R_H c \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

$$R_H = \frac{\mu e^4}{4\pi\hbar^3 c}$$

与实验完全一致

得
Rydberg 常数



3、量子化条件的推广

由理论力学知，若将角动量 L 选为广义动量，则 θ 为广义坐标。考虑积分并利用 Bohr 提出的量子化条件，有

$$\oint L d\theta = n\hbar \oint d\theta = 2\pi n\hbar = nh$$

索末菲将 Bohr 量子化条件推广为推广后的量子化条件可用于多自由度情况，

$$\oint p_i dq_i = n_i h$$

其中 p_i 是广义动量， q_i 是相应的广义坐标。

这样索末菲量子化条件不仅能解释氢原子光谱，而且对于只有一个电子（Li, Na, K 等）的一些原子光谱也能很好的解释。

4 玻尔量子论的局限性

玻尔量子论首次打开了认识原子结构的大门，取得了很大的成功。但是它的局限性和存在的问题也逐渐为人们所认识

- 1. 不能应用于较复杂的原子甚至比氢稍微复杂的氦原子的光谱；
- 2. 只能求出谱线的频率，不能给出谱线的强度；
- 3. 把微观粒子看作经典力学中的质点，从而将经典力学的规律用在微观粒子上。

§ 1.4 微粒的波粒二象性

根据Planck-Einstein 光量子论，光具有波动粒子二重性，以及Bohr量子论，启发了德布罗意，他提出了实物粒子（静质量 m 不等于 0 的粒子）也具有波动性。也就是说，粒子和光一样也具有波动-粒子二重性。

假定：与一定能量 E 和动量 p 的实物粒子相联系的波（他称之为“物质波”）的频率和波长分别为：

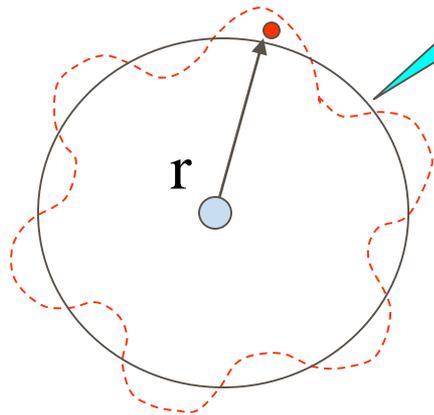
$$\begin{cases} E = h\nu = \hbar\omega \\ \vec{p} = \frac{h}{\lambda} \vec{n} = \hbar\vec{k} \end{cases}$$

- 该关系称为**德布罗意公式(关系)**。

驻波条件

为了克服 Bohr 理论带有人为性质的缺陷，de Broglie 把原子定态与驻波联系起来，即把粒子能量量子化问题和有限空间中驻波的波长（或频率）的分立性联系起来。

例如：氢原子中作稳定圆周运动的电子相应的驻波示意图



要求圆周长是波长的整数倍

de Broglie 关系

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\frac{2\pi r}{n}} = \frac{nh}{2\pi r} = \frac{n\hbar}{r}$$

$$2\pi r = n\lambda$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

代入

于是角动量： $L = rp = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$

德布罗意波

因为自由粒子 E 和 p 是常量，所以由德布罗意关系可知，与自由粒子联系的波的频率 ν 和波矢 k （或波长 λ ）都不变，即是一个单色平面波。由力学可知，频率为 ν ，波长为 λ ，沿单位矢量 n 方向传播的平面波可表为：

$$\Psi = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \quad \text{其中 } \omega = 2\pi\nu, \quad \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}。$$

写成复数形式

$$\Psi = A \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$$

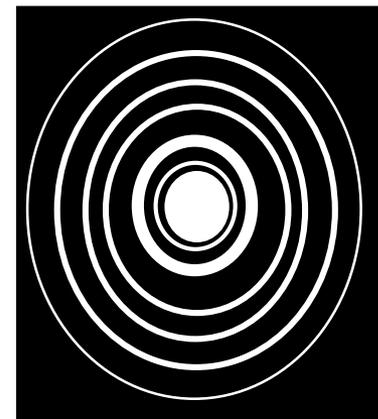
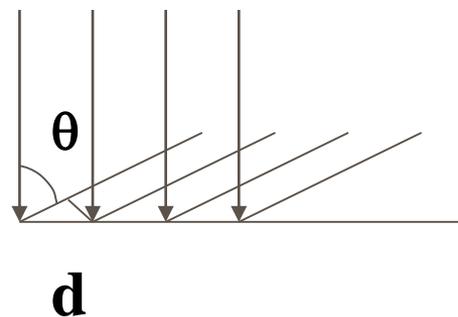
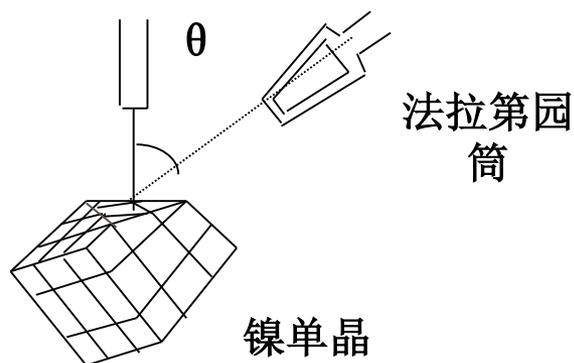
de Broglie 关系：
 $\omega = E/\hbar$; $\mathbf{k} = \mathbf{p}/\hbar$

$$= A \exp\left[\frac{i}{\hbar} (\vec{p} \cdot \vec{r} - Et)\right]$$

这种波就是与自由粒子相联系的平面波，或称为描写自由粒子的平面波，这种写成复数形式的波称为**德布罗意波**。

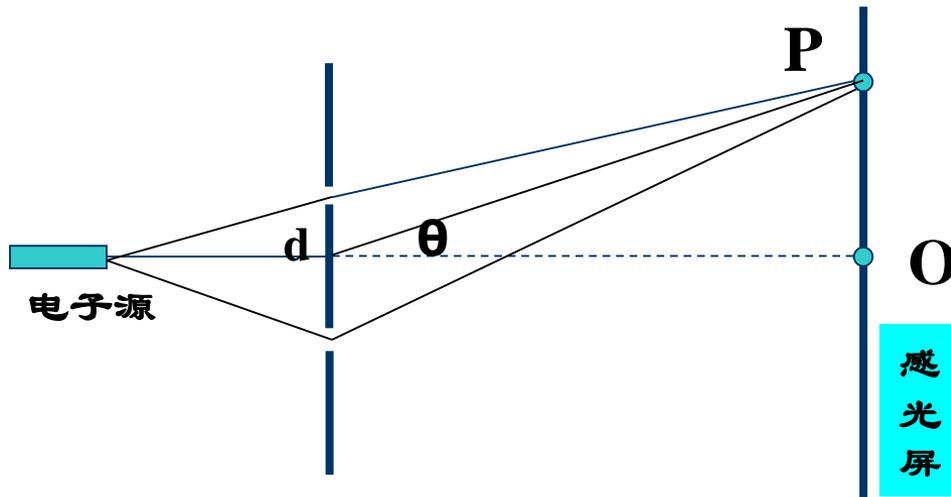
- 德布罗意波在1924年提出后，在1927-1928年由戴维逊 (Davisson) 和革末 (Germer) 的电子衍射实验所证实。

入射电子注



衍射最大值公式: $n\lambda = d \sin \theta$

双缝干涉实验



$$d \sin \theta = n \lambda$$

波粒二象性的理解

- 作为微观客体的电子，它既具有经典粒子的性质，又具有经典波的性质，但它既不是经典粒子，又不是经典波。
- **粒子性**：有一定质量、一定电荷、一个相对局域的空间位置；
- **波动性**：呈现出干涉、衍射现象。

旧量子论时代

- 1900年，普朗克提出辐射量子假说，假定电磁场和物质交换能量是以间断的形式(能量子)实现的，能量子的大小同辐射频率成正比，比例常数称为普朗克常数，从而得出黑体辐射能量分布公式，成功地解释了黑体辐射现象。
- 1905年，爱因斯坦引进光量子(光子)的概念，并给出了光子的能量、动量与辐射的频率和波长的关系，成功地解释了光电效应。其后，他又提出固体的振动能量也是量子化的，从而解释了低温下固体比热问题。
- 1913年，玻尔在卢瑟福原有原子核模型的基础上建立起原子的量子理论。按照这个理论，原子中的电子只能在分立的轨道上运动，在轨道上运动时候电子既不吸收能量，也不放出能量。原子具有确定的能量，它所处的这种状态叫“定态”，而且原子只有从一个定态到另一个定态，才能吸收或辐射能量。这个理论虽然有许多成功之处，但对于进一步解释实验现象还有许多困难。
- 在人们认识到光具有波动和微粒的二象性之后，为了解释一些经典理论无法解释的现象，法国物理学家德布罗意于1923年提出了物质波这一概念。认为一切微观粒子均伴随着一个波，这就是所谓的德布罗意波。

量子力学的建立与发展

- 量子力学是在旧量子论的基础上发展起来的（1923-1927）：
- 1925年，海森堡和玻恩、约尔丹一起建立起矩阵力学；
- 1926年薛定谔（Schrödinger）首先找到波动方程；
- 其后不久还证明了波动力学和矩阵力学的数学等价性
- 狄拉克和约尔丹各自独立地发展了一种普遍的变换理论，给出量子力学简洁、完善的数学表达形式
- 量子力学和狭义相对论的结合产生了相对论量子力学。
- 经狄拉克、海森堡和泡利（Pauli）等人的工作发展了量子电动力学。
- 1927年，海森堡提出了测不准原理。
- 20世纪30年代以后形成了描述各种粒子场的量子化理论——量子场论，它构成了描述基本粒子现象的理论基础。
- 1948年，费曼创立了量子力学的路径积分形式。
- 1930年保罗·狄拉克出版了他的著作《量子力学原理》：这是整个科学史上的一个里程碑之作，狄拉克将量子力学的最重要的基础严谨地公式化。

作 业

周世勋 《量子力学教程》：

1.1~1.4