

# 量子波澜：历史与概念

马红孺

上海交通大学机械与动力学院

## 参考书:

1, R. P. Feynman, The Feynman Lectures on Physics, Volume III. (有中译本: 费恩曼物理学讲义, 第三卷)

2, 黄祖洽, 现代物理学前沿选讲

3, 高纯寿, 今日物理

4, Amir D. Aczel, Entanglement: The Greatest Mystery in Physics, 2001

课程网页: <http://www.physics.sjtu.edu.cn/hrma/node/26>

## 课堂上不容许做的事：

- 1， 上课不许迟到，
- 2， 课堂上不容许小声讲话，
- 3， 做作业时不容许抄错误的习题解答。
- 4， 大作业不得以任何形式抄网上和文献中的原文。



Chris  
Piddens

物理学是自然科学中**最基本的**学科。物理学研究组成世界的**物质基元**和他们之间的**相互作用**。同时利用这些基元和相互作用解释从基本粒子，原子，分子，凝聚态直到整个宇宙尺度上发生的各种现象。

化学，天文学，地质，气象等学科从广义的角度来讲，都是物理学的一个部分。

尽管这些学科有自己的特殊的研究对象和研究内容，但其基础都是物理学的基本规律，研究的工具也很大程度上来源于物理学。

经典物理学的大厦在**19**世纪已经基本建成。

由牛顿，伽利略等建立的经典力学经过拉格朗日，哈密顿等的完善，已经成为物理学的中心理论，而且影响着物理学其它领域的思维方式。



Galileo Galilei



Sir Isaac Newton



Joseph Lewis Lagrange



**William Rowan Hamilton**



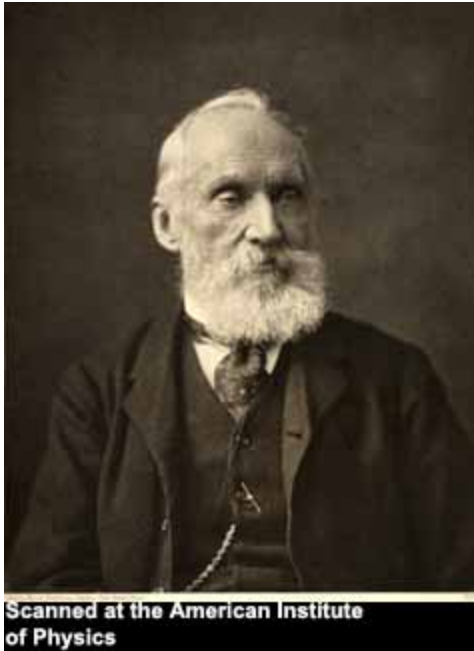
经过卡诺，焦耳，开尔文，克劳修斯，吉布斯等人的努力，热力学理论已经非常牢固的建立起来。



Sadi Carnot



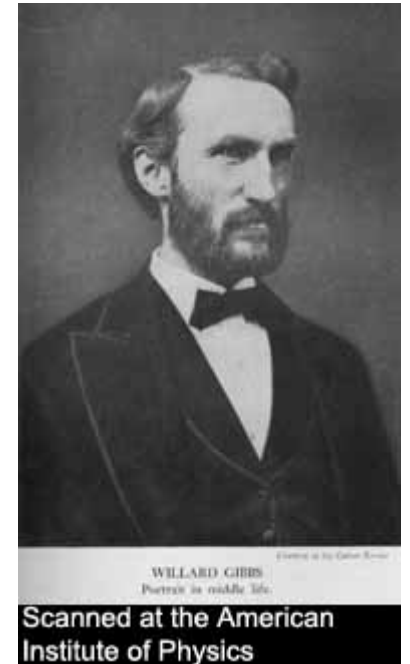
James Prescott Joule



William Thomson,  
1st Baron Kelvin



Rudolf Julius Emmanuel  
Clausius

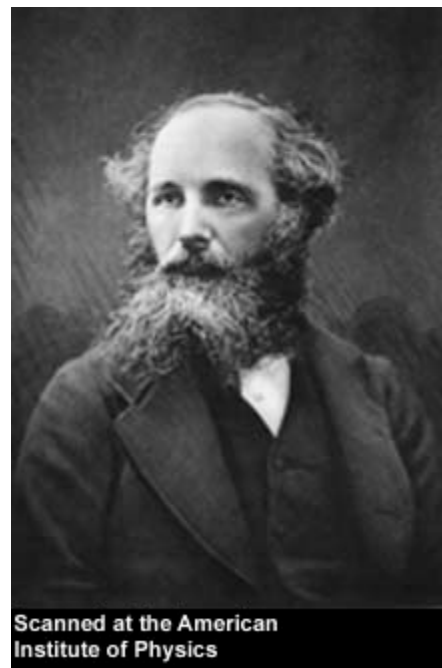


Josiah Willard Gibbs

在法拉第等前人研究的基础上，麦克斯韦 已经成功建立了描述电磁现象和光学的基本理论，麦克斯韦方程组。



Michael Faraday



James Clerk Maxwell

基于这些牢固建立的理论，似乎表明物理学的基础问题已经全部得到了解决，19世纪末的一些物理学家甚至认为物理学留下的问题仅仅就是把一些物理量的计算和观测做的更精确一些而已。

实际上，这些看法其实完全不符合事实，在19世纪即将结束的时候，一系列新的发现震撼了物理学，也影响了社会的注意力。

这其中最著名的当是三大发现

## 19世纪末的三大发现

- 1895年, 伦琴发现X射线. (伦琴, W. C. Rontgen, 1845-1923, 德国物理学家, 1901年获首届诺贝尔物理学奖)
- 1896年, 贝克勒尔发现放射性. (贝克勒尔, H. A. Becquerel, 1852-1908, 法国物理学家, 1903年同居里夫妇一起获诺贝尔奖.)
- 1897年, 汤姆生发现电子. (J. J. Thomson, 1856-1940, 英国物理学家, 1906年获诺贝尔物理学奖.)
- 卢瑟福Ernest Rutherford (1871 - 1937) 发现了 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线



W. C. Rontgen



Here is an interview that Rontgen accorded to a journalist:

J: What did you think?

R: I did not think, I investigated.

J: What is it?

R: I don't know.



Ernest Rutherford



J. J. Thomson

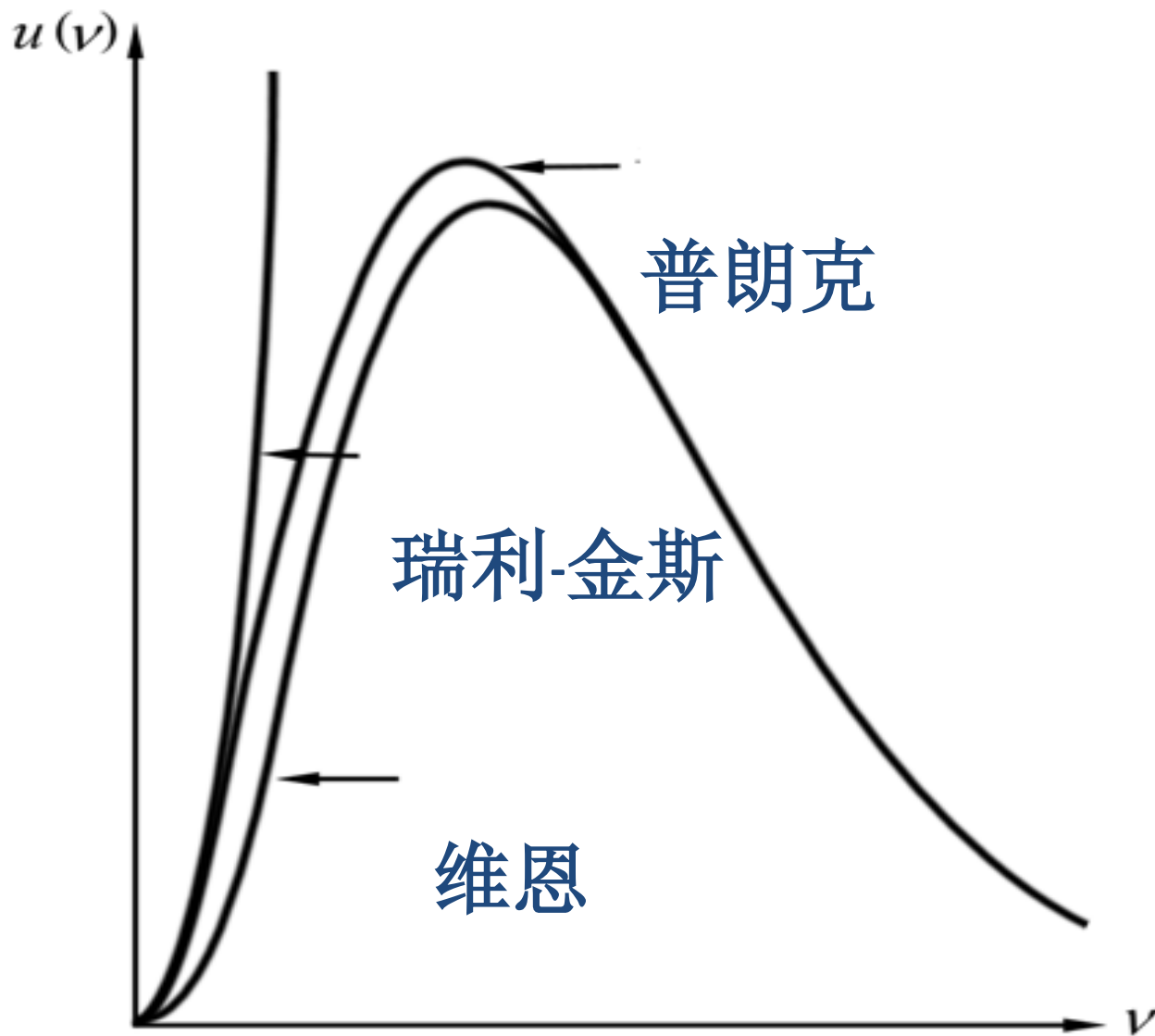


H. A. Becquerel



在这个时期，同样还存在一些经典物理完全无法解释的现象，特别突出的是黑体辐射的谱分布。

按照麦克斯韦的电磁理论和能量均分定理，黑体辐射的强度将随频率增加而增加，而实验事实与此预言完全不符，从逻辑上，随频率增加的辐射强度将导致发散的总辐射能量密度，这也是不能接受的。



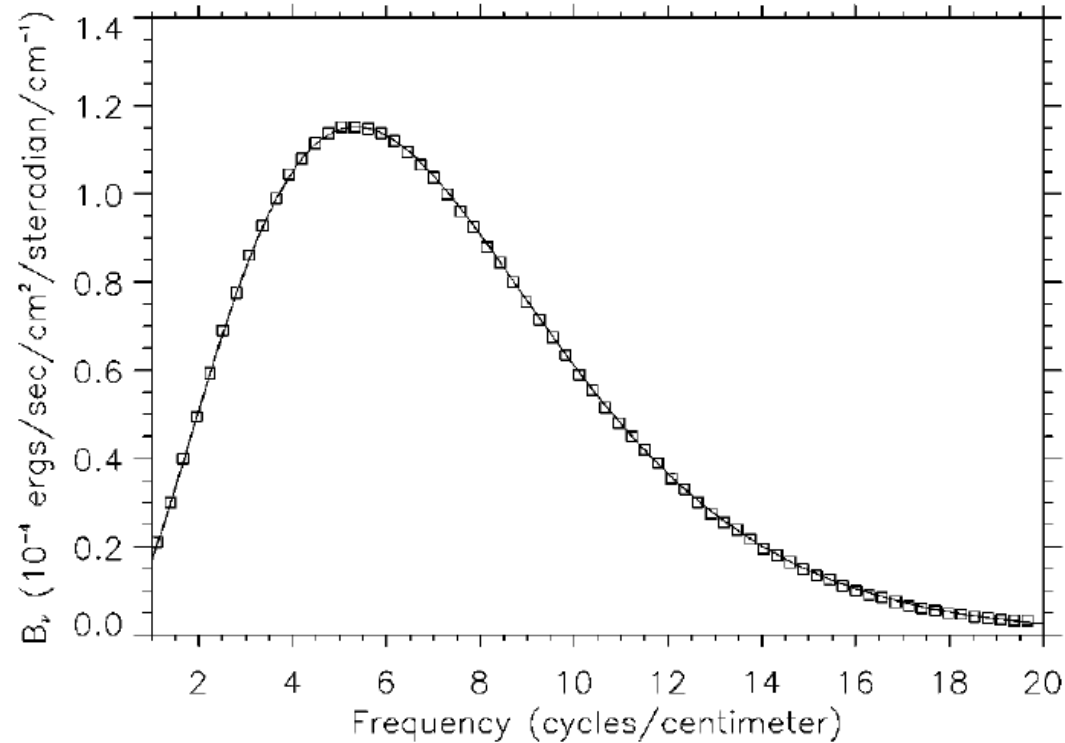
另一个理论问题涉及到相对性原理。经典力学的规律在所有的惯性参照系都成立，不同参照系通过伽利略变换相联系。但麦克斯韦方程并不满足伽利略变换，也就是说，如果伽利略变换和相对性原理成立，那么麦克斯韦方程就不可能正确，所以，物理学家面临在伽利略变换，相对性原理和麦克斯韦方程之间的选择。

如果放弃相对性原理，那么就存在一个特殊的参照系，麦克斯韦方程只在这个参照系成立。迈克尔逊-莫雷已经做了测量地球相对于麦克斯韦方程成立的那个参照系的巧妙实验，结果表明地球就是那个参照系！！这在逻辑上同样是不能接受的，因为在19世纪末20世纪初，物理学家已经清楚的知道地球只不过是太阳系的一颗普通行星而已。她不应该具有这个特殊的地位。

这些困难的解决过程中发现了量子力学和相对论。量子力学和相对论成为了20世纪物理学的两大支柱，并带动了20世纪前30年物理学研究的空前的进步，也带来了其后大半个世纪的高技术的飞速发展和人的生活方式，社会，文化的巨大进步和改变。

# 二十世纪的物理学

- 1900年, 普朗克提出黑体辐射公式, 量子论诞生.  
(普朗克, M. Planck, 1858-1947, 德国物理学家, 1919年获1918年诺贝尔物理学奖)



$$u(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$



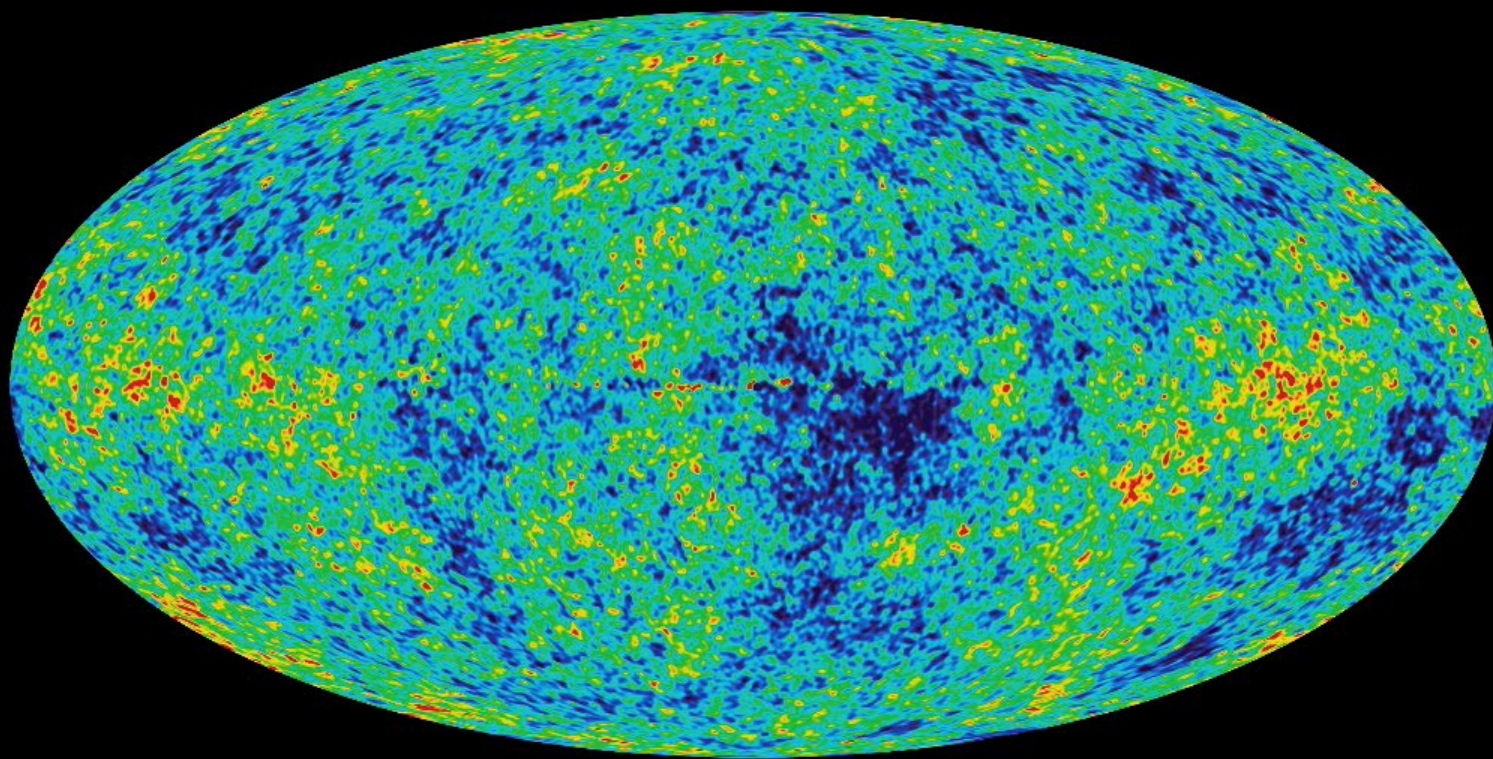
M. Planck

(April 23, 1858 – October 4, 1947)

普朗克是一名热学专家，对热力学理论有精深的理解。

在长期对黑体辐射的研究中，普朗克做了一个假定而背离了经典物理学，宣告了量子论的诞生。

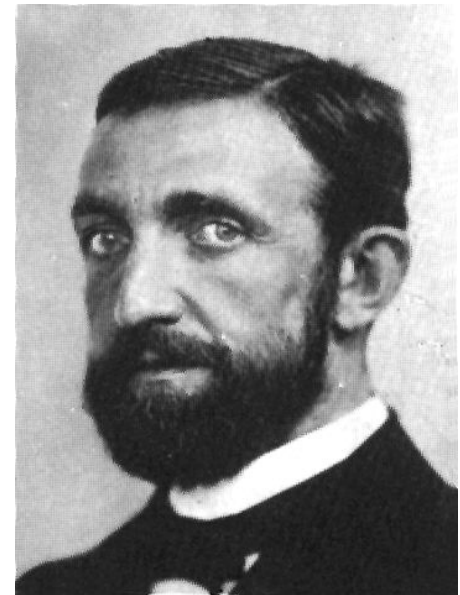
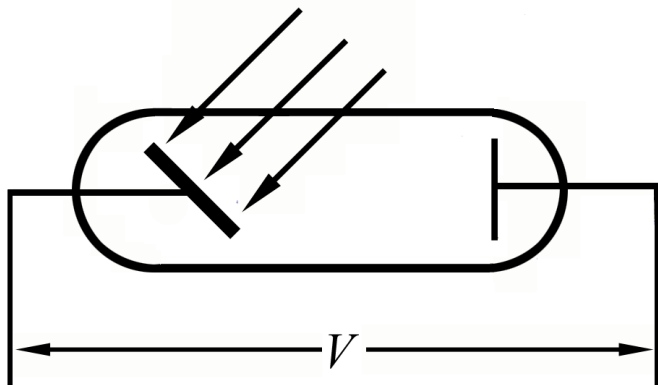
普朗克的4个小孩都先于他去世，大儿子一次世界大战中丧生，二儿子因谋杀希特勒未果被处死，两个女儿均死于难产。



万分之一的不均匀



- 1902年, 勒纳德得到光电效应的基本规律, 发现电子的最大速度与光强无关. (勒纳德, P. Lenard, 1862-1947, 德国物理学家, 1905年因对阴极射线的研究获诺贝尔物理奖)
- 1902年, 吉布斯创立统计系综理论. (J. W. Gibbs, 美国物理学家)



P. Lenard

- 1905年, 爱因斯坦发表了三篇重要论文.

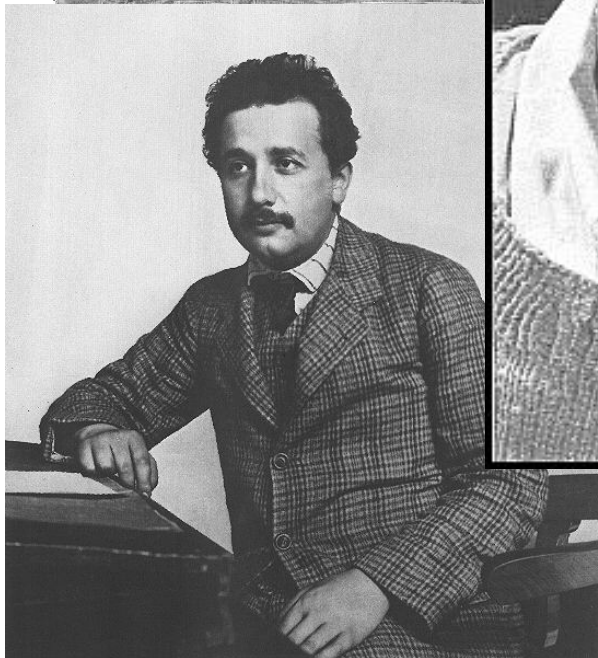
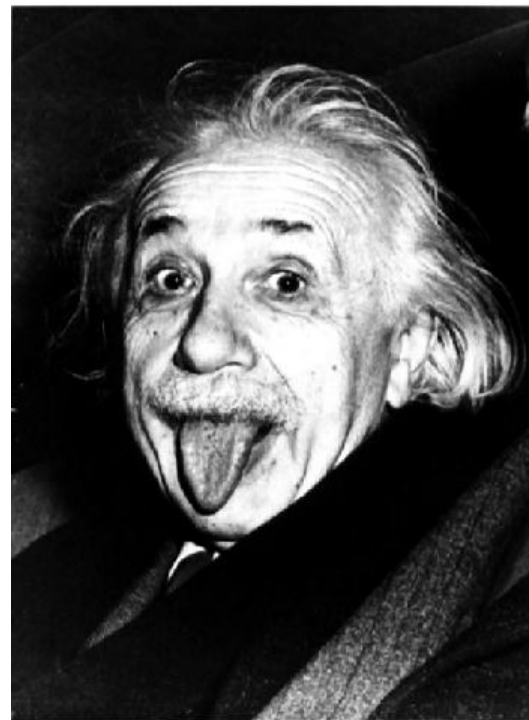
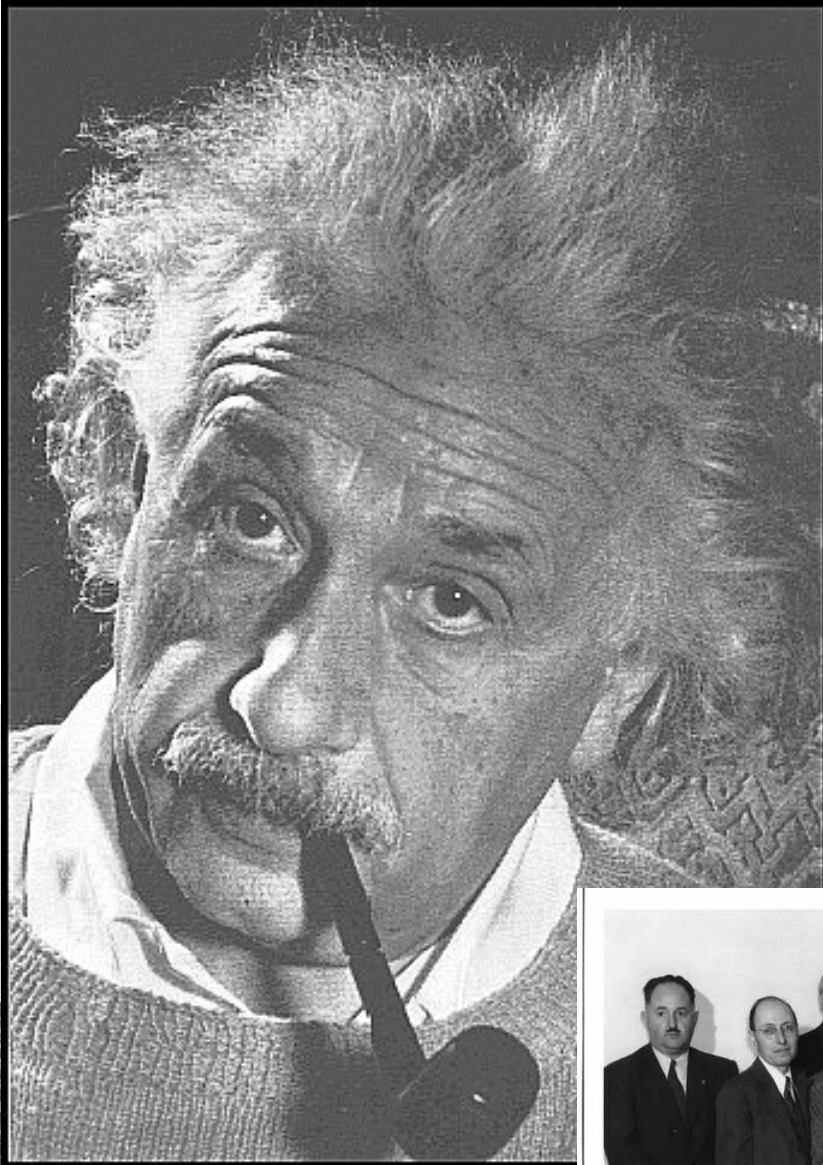
- 1, 关于布朗运动的论文.

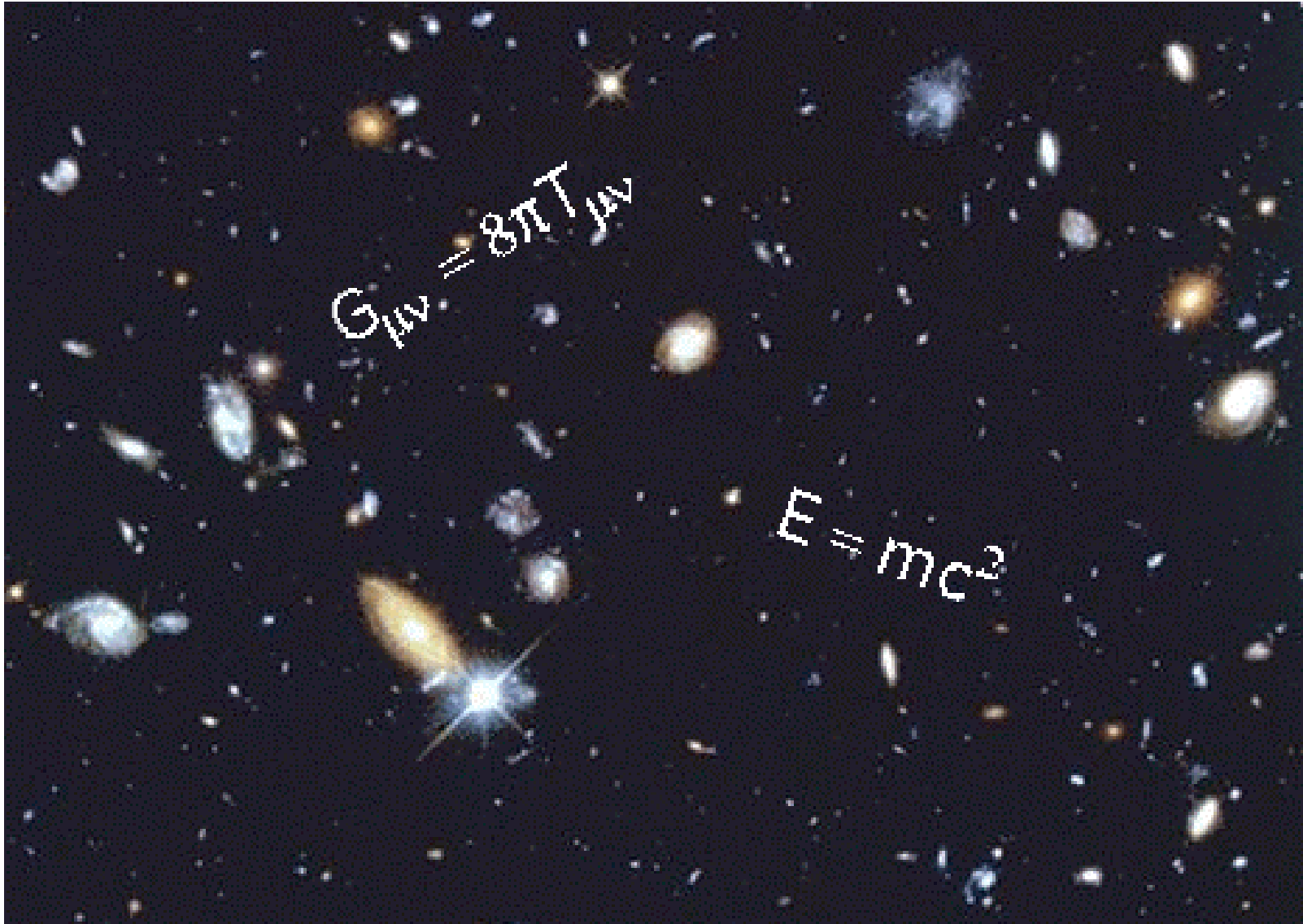
- 2, 关于光电效应的论文, 提出光量子概念.

- 3, 关于运动媒质的电动力学, 提出狭义相对论.

(爱因斯坦, A. Einstein, 1879-1955, 德国物理学家, 1922年因光电效应理论获诺贝尔物理奖.)

- 1915年, 爱因斯坦建立了广义相对论.

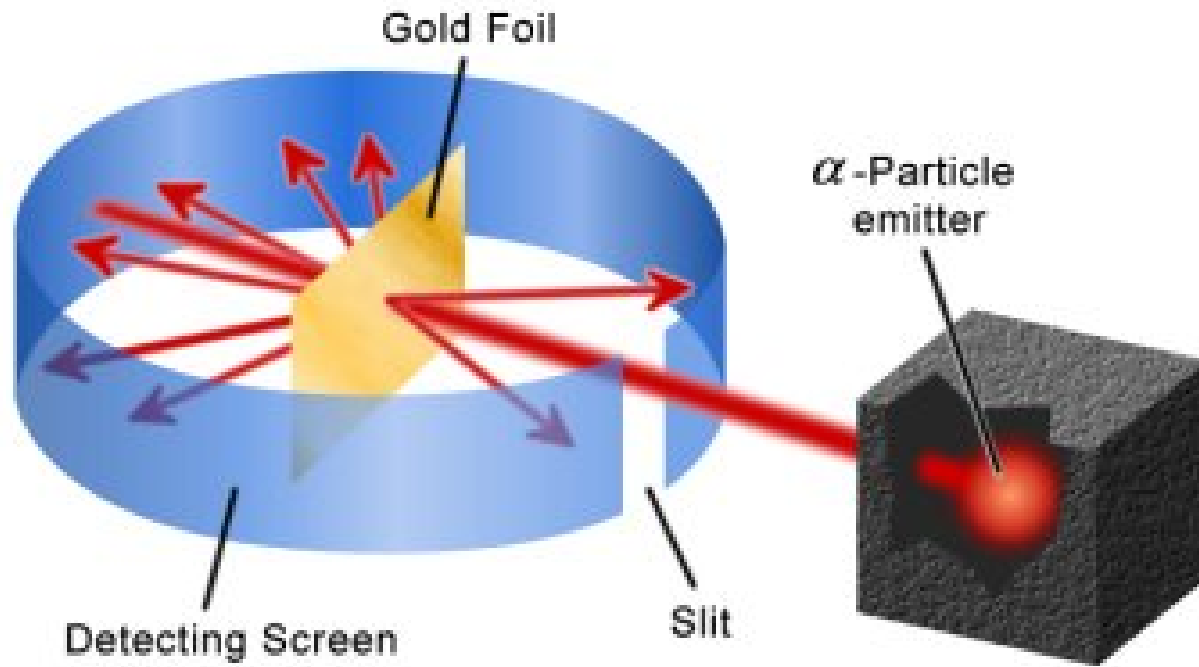




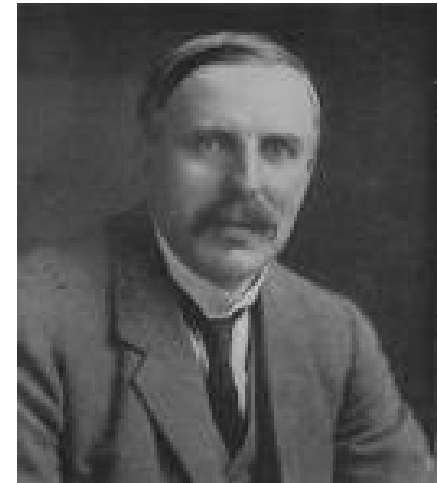
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$E = mc^2$$

1909年，卢瑟福，盖革和马斯顿测量了alpha粒子在金箔上的散射，这一实验最终导致了卢瑟福在1911年提出了原子的有核行星模型。这个模型认为原子是由非常小的原子核和绕核运动的电子构成，原子核的尺度在  $10^{-15}\text{M}$  的数量级，但几乎贡献了原子的所有质量。这个模型一提出来就遇到了严重的困难，根据电磁理论，加速运动的电子将辐射能量，并将在  $10^{-9}\text{s}$  的时间内下落到原子核上面，从而原子完全不可能稳定存在，这与实际情况完全相反。

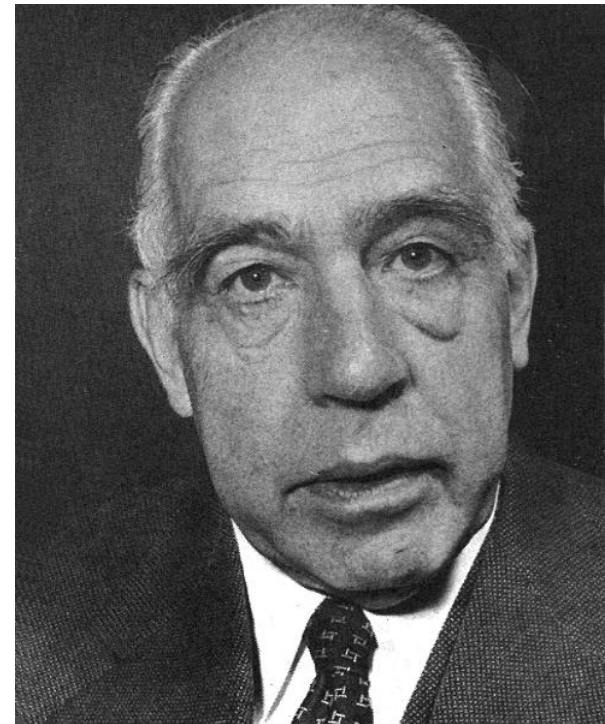
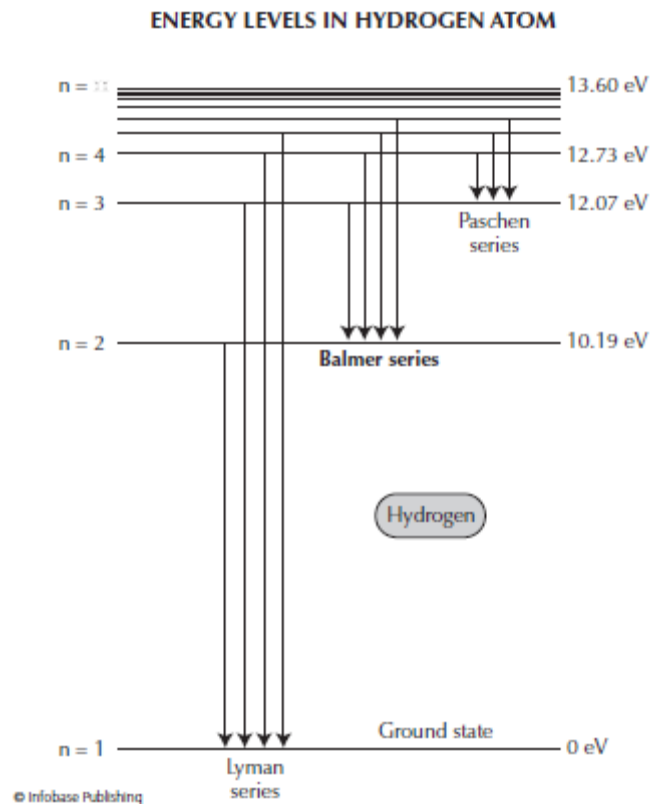


Hans Wilhelm  
Geiger



Ernest Marsden

1913年玻尔利用量子概念，对卢瑟福的原子模型给出了两个限制，建立了一个氢原子的理论，解决了原子的稳定性问题。而且成功地解释了氢原子的几个光谱线系。



N. Bohr

1924年，德布罗意 Louis de Broglie(1892–1987)提出了波粒二像性的概念；

1925年，泡利提出了不相容原理，薛定谔为物质波建立了波动方程并求解了氢原子问题，自动给出了玻尔的原子理论，与此同时，波恩，海森堡，约旦等人建立了矩阵力学；

其后，海森堡 Werner Heisenberg (1901–76) 在1927年建立了不确定关系。





Werner Heisenberg



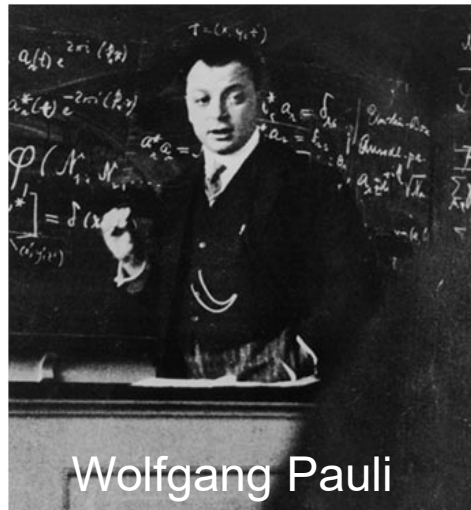
Erwin Schrodinger



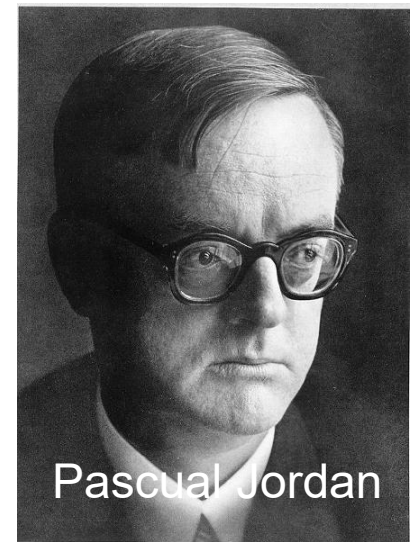
Max Born  
Scanned at the Max Born  
Institute of Physics



Louis de Broglie

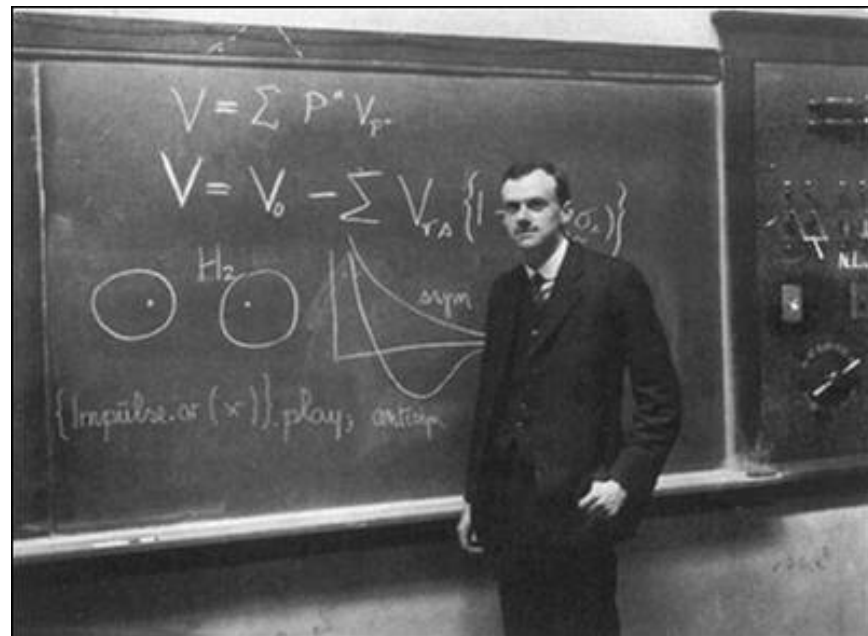


Wolfgang Pauli

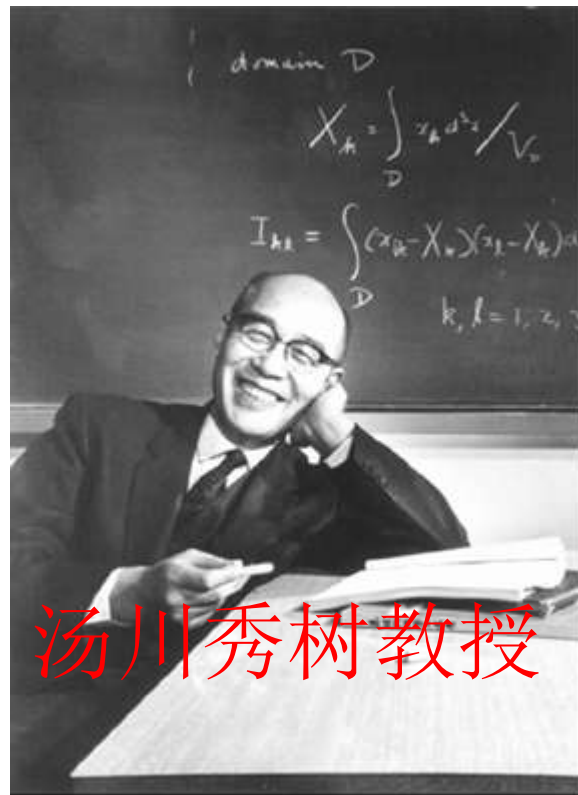
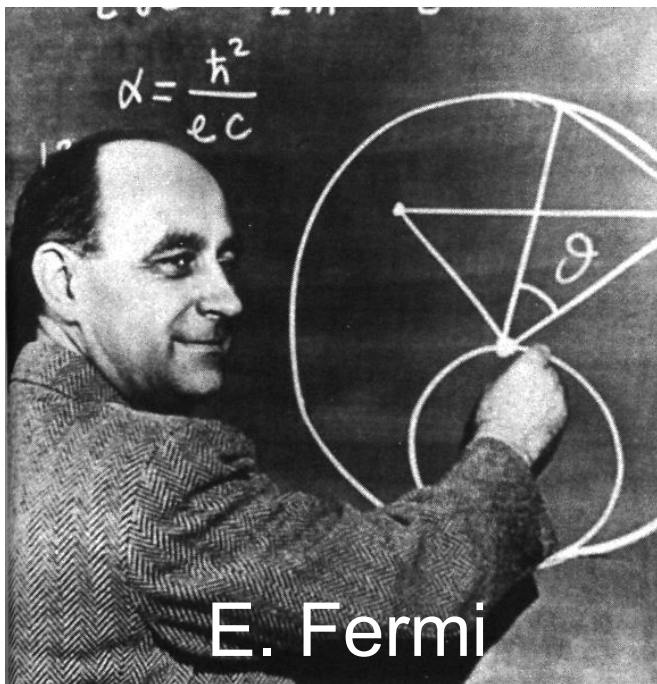


Pascual Jordan

1928年，狄拉克 Paul A. M. Dirac (1902–84)把波动方程推广到相对论情形，建立了以他的名字命名的相对论波动方程。



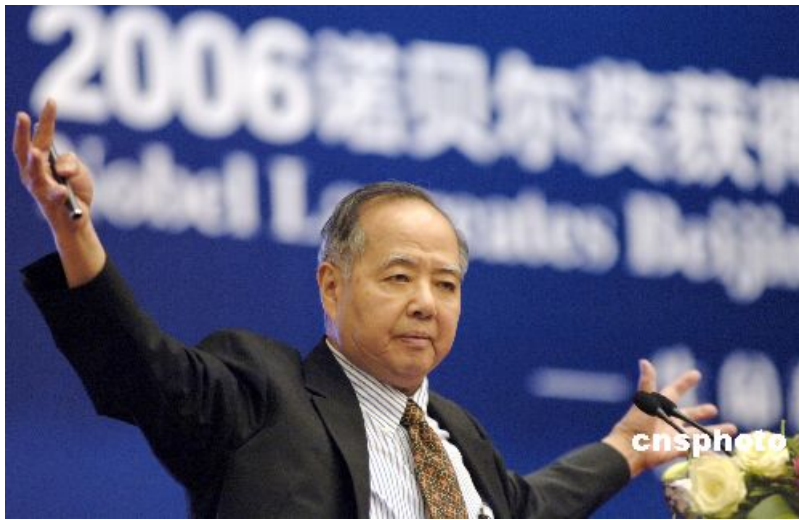
通过方程的求解，狄拉克预言了正电子，而这一预言随后于1932年由安德森发现正电子而证实。至此，20世纪物理学的基础已经建立起来，随后的发展是一大批所谓基本粒子的发现和相关理论的建立。



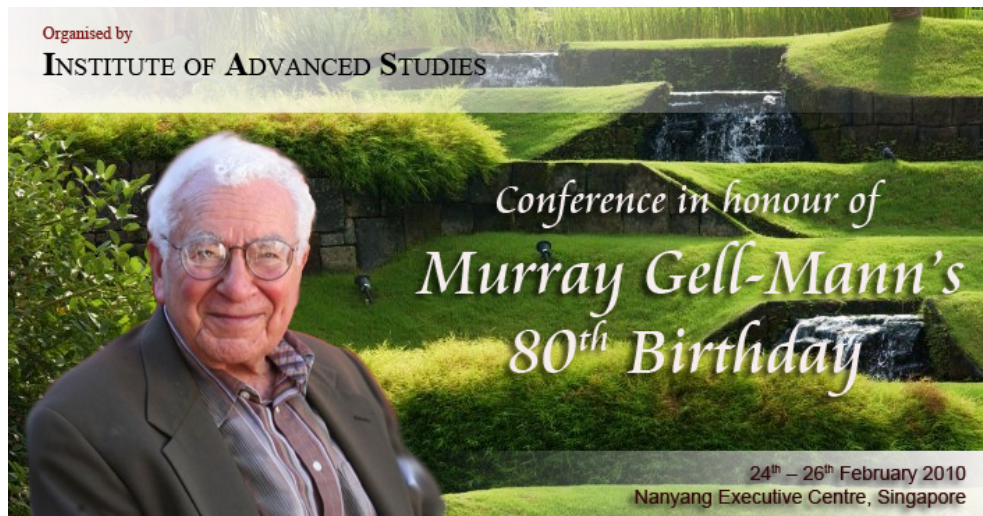
费米在1933-1934年建立了beta衰变的理论和弱相互作用理论，1935年，汤川秀树建立了强相互作用的理论。

1957年，李政道和杨振宁分析了大量的弱相互作用过程的数据，提出了弱相互作用下宇称不守恒的预言并建议了实验检验办法，吴健雄等很快就在实验上证实了李杨的理论。当基本粒子的数目急剧增加时，建立更基本的模型的需求被提了出来。1964年，盖尔曼建立了基本粒子的夸克模型，经过几代人的努力最终建立了标准模型。

# 杨振宁 教授



## 李政道 教授





近 60 年代的吴健雄。



袁家骝教授和吴健雄教授



1932年，施士元博士论文答辩，主席为居里夫人(右二)



百岁老人施士元教授





施士元教授和学生吴健雄在一起

标准模型是目前关于物质最基本性质的基本理论，这个模型的大多数预言都得到了实验的验证。下面我们简单的介绍一下标准模型。

构成标准模型的物质粒子是三代夸克和三代轻子，物质粒子的自旋为 $1/2$ ，是费米子。

标准模型包括三种相互作用，强相互作用，弱相互作用和电磁相互作用。

强相互作用的媒介粒子是胶子，由量子色动力学描述；弱相互作用的媒介粒子称为中间波色子，而电磁相互作用的媒介粒子是光子。

描写电磁相互作用的理论是量子电动力学 (Quantum Electrodynamics, 简写QED)，这是迄今为止与实验符合最好的物理理论，由量子电动力学计算得到的电子反常磁矩 和实验值的符合达到了**12**位有效数字，这相当于测量北京到上海之间的距离精确到**1**微米 (大约**0.1**个头发丝的直径)。

QED是在1942年到1948年期间由

费曼 Richard Feynman (1918–1988),

朝勇振一郎 Sin-Itiro Tomonaga (1906–79),

薛温格 Julian Schwinger (1918–1994)

等人分别建立起来的，

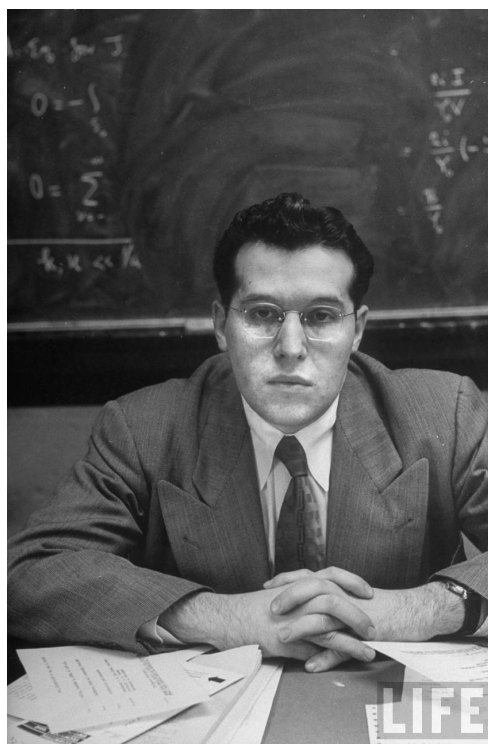
戴森 Freeman Dyson (1923– )

证明了他们三个人的理论实际上是等价的，并且给出了一个统一的描述。

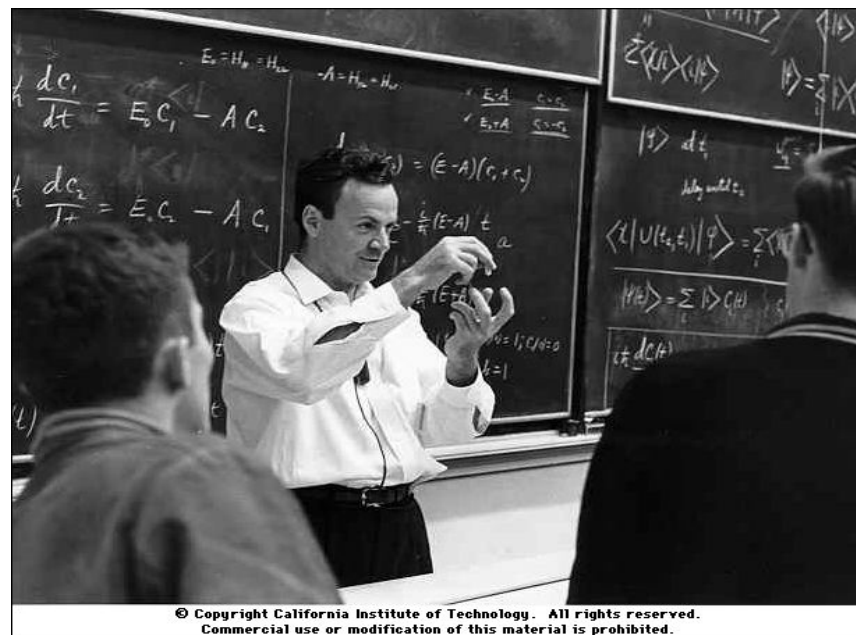


Scanned at the American  
Institute of Physics

朝勇振一郎教授



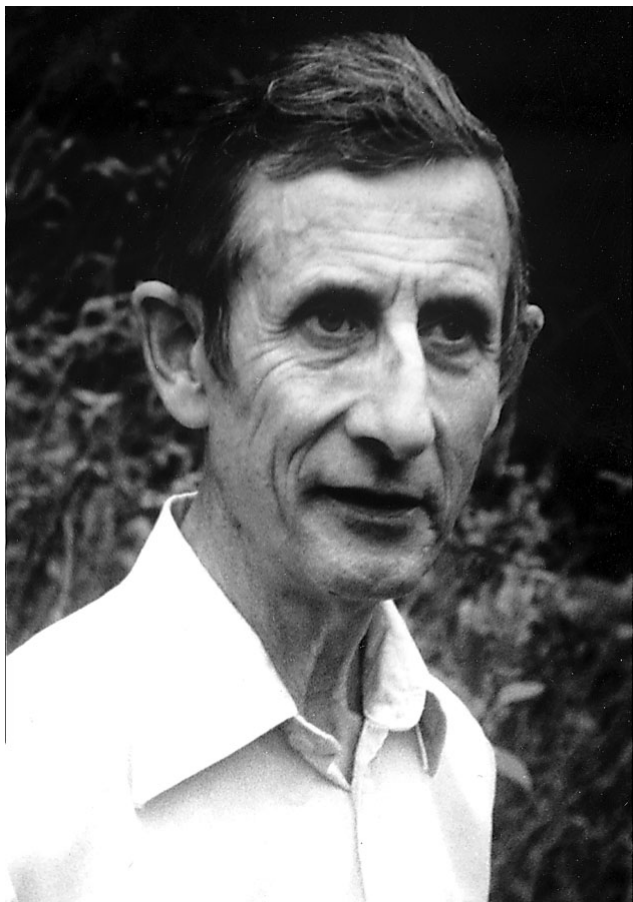
Julian Schwinger



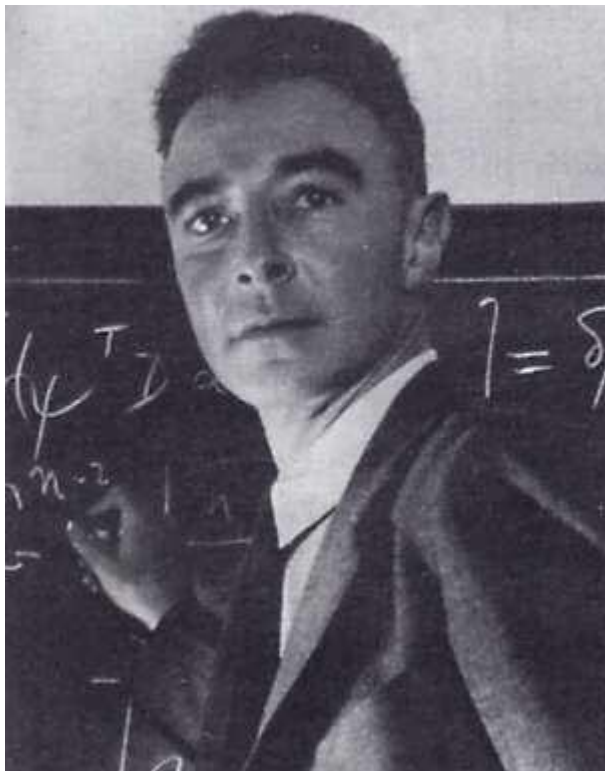
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Richard Feynman


在此期间物理学和社会的一个重大事件是一批物理学家领导，参与建造了世界上第一颗原子弹，并在1945年用于战争。1945年8月6日8时15分，美国在日本的广岛投掷了原子弹，8月9日又在长崎投掷了原子弹，导致了大量平民的死亡。研制原子弹的曼哈顿工程的负责人是著名的理论物理学家奥本海默。



Freeman Dyson



J. Robert Oppenheimer



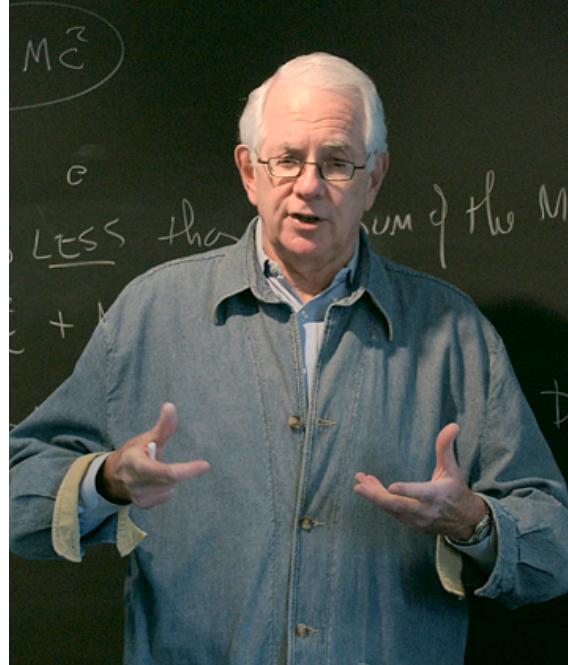
1970年前后，三组物理学家，分别由  
温伯格Steven Weinberg (1933– )，  
格拉肖Sheldon Glashow (1932– )，  
萨拉姆Abdus Salam (1926–96)领导，  
建立了弱相互作用和电磁相互作用的统一理论，  
简称为弱电统一理论。

这一理论的一个重要数学基础是杨振宁和米尔斯提出的非对易规范场理论，和特霍夫特关于杨-米尔斯理论可重整化的证明。





Steven Weinberg



Sheldon Glashow

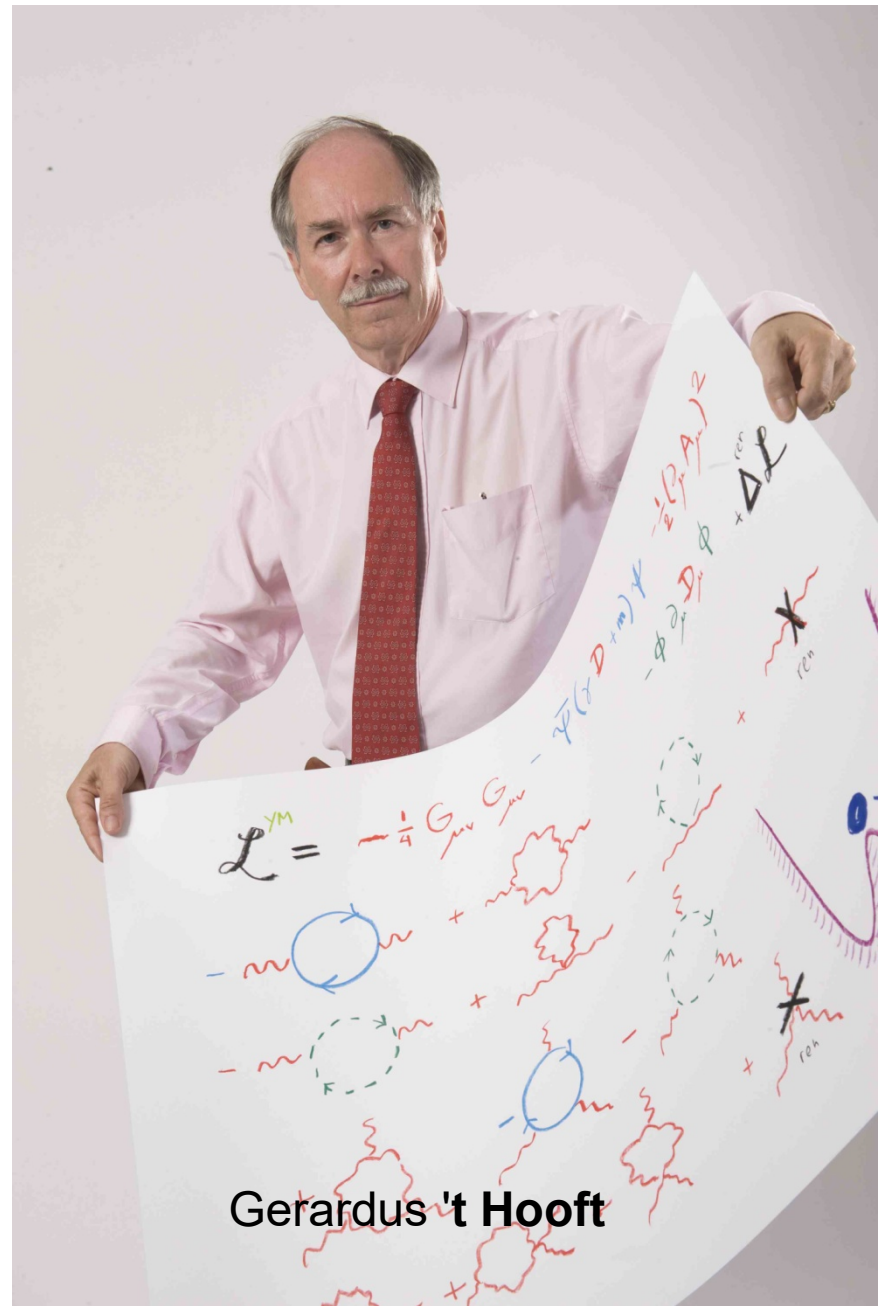


Abdus Salam



Scanned at the American Institute of Physics

杨振宁和 Robert L. Mills



Gerardus 't Hooft

在1970年代，由弱电统一理论和量子色动力学的组合而成的标准模型的理论逐步建立了起来。这一理论的各个部分均具有相似的数学结构，满足不同的规范对称群，而且可以包含在一个同样结构的更大的群下面，所以，以这样的更大的对称群为基础的理论称为大统一理论(Grand Unification Theory, 简称为GUT).

宇宙加速膨胀（accelerating universe）是宇宙的膨胀速度越来越快的现象。以天文学术语来说，就是宇宙标度因子 $d(t)$ 的二次导数是正值，这意味着星系远离地球的速度，随着时间演进，应该会持续地增快。这速度是哈柏定律里所提到的退行速度。于1998年观测Ia超新星得到的数据，提示宇宙的膨胀速度正在加快。物理学者索尔·珀尔马特、布莱恩·施密特与亚当·里斯“透过观测遥远超新星而发现了宇宙加速膨胀”，因此，共同荣获2006年邵逸夫天文学奖与2011年诺贝尔物理学奖。

# Royal Swedish Academy of Sciences 2011 Nobel Prize in Physics

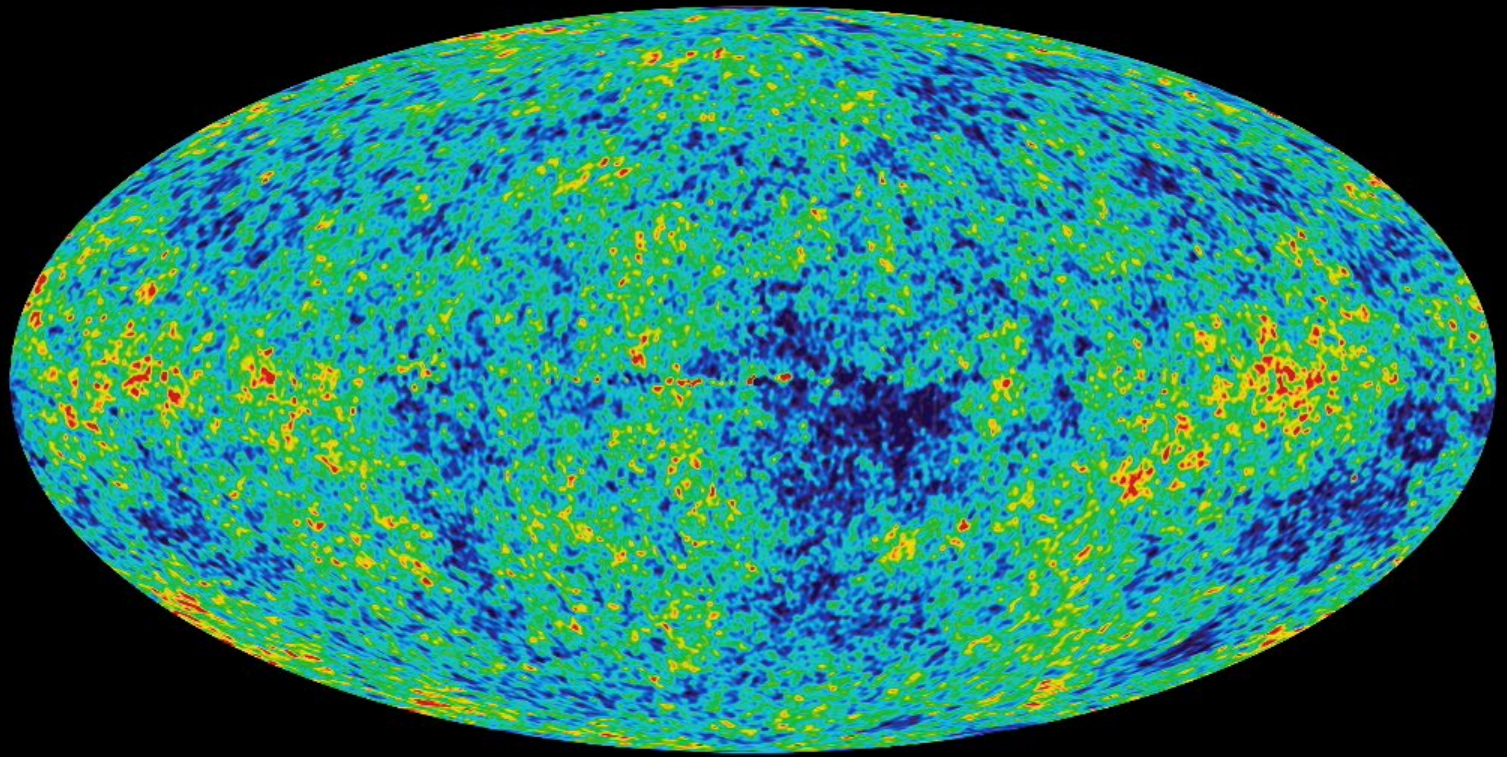


*Saul Perlmutter*

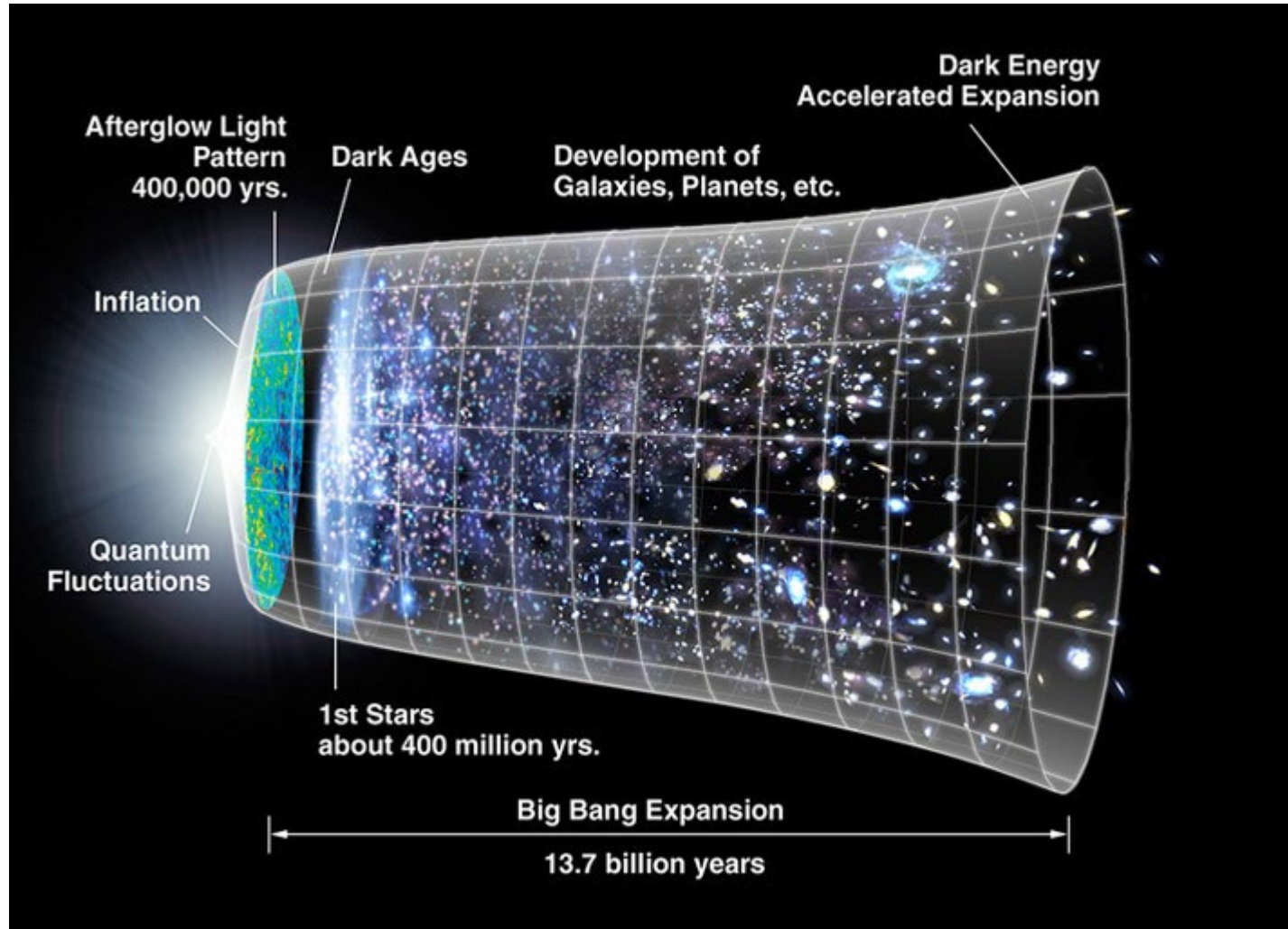
*Adam Riess*

*Brian Schmidt*

*for the discovery of the  
accelerating expansion of the universe through  
observations of distant supernovae*

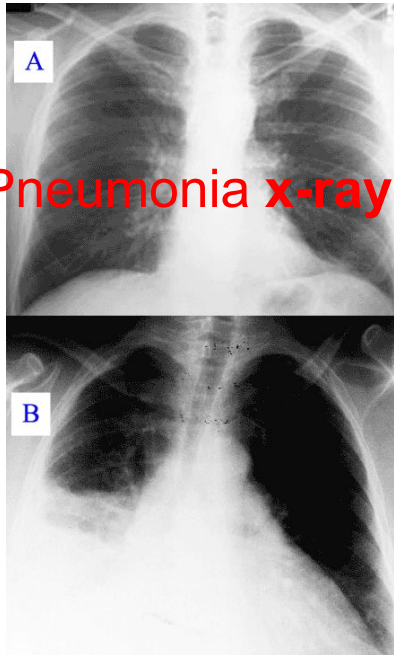


# 我们宇宙的演化



在基本物理发展的同时，20世纪物理学在各个层次的应用上也取得了巨大的进展。

凝聚态物理是其中之一。在X-射线发现之时，人们立刻就想到了医学的应用，X-光诊断现在已经是各个不同档次的医院中的常规诊断方法之一。





X-光的另一个重要用途是在凝聚态物理领域。

1912年, 劳厄Max von Laue (1879–1960)发现X-射线在晶体中的衍射效应;

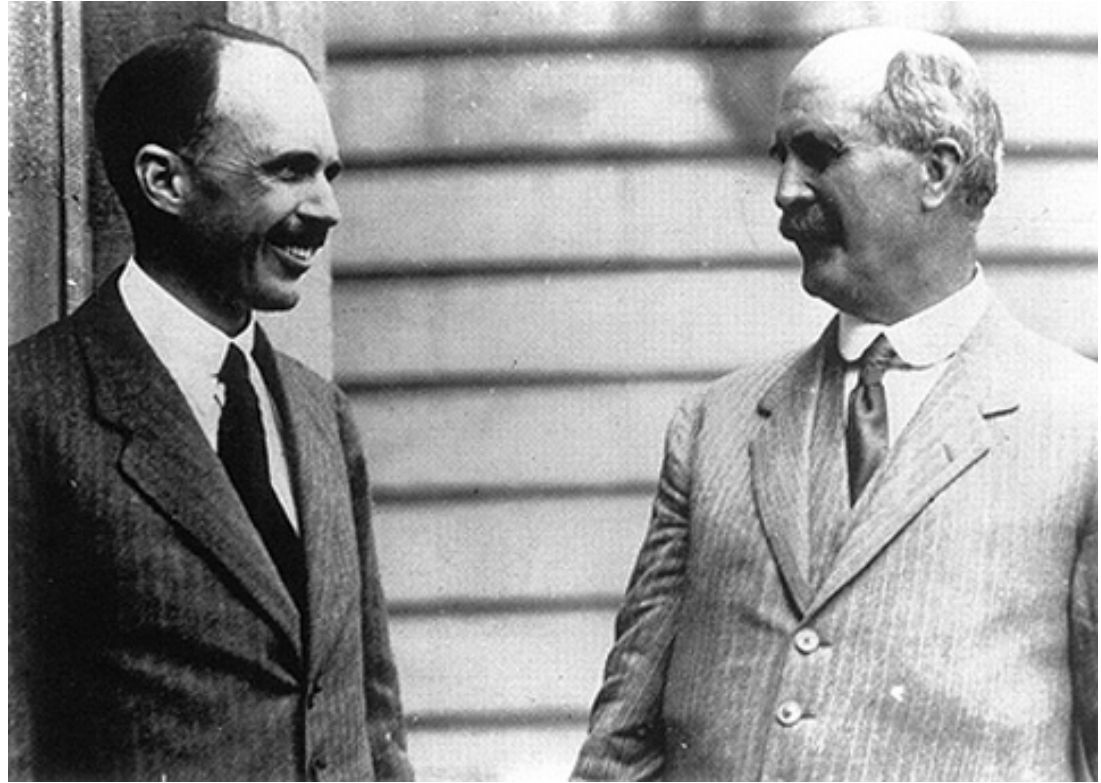
1912年到1913年间, 布拉格父子William H. Bragg (1862–1942), William L. (Lawrence) Bragg (1890–1971)发展了利用X-射线测量晶体中原子排列方式的技术。

利用后来命名为布拉格衍射的方法, 可以比较容易的测量晶体中原子的排列方式--晶体结构, X-光晶体结构分析也成为目前凝聚态物理和材料科学的常规技术。生命科学的前沿。



Bundesarchiv, Bild 183-100206-502  
Foto: G. Pöngl, 1. 1924

Max von Laue



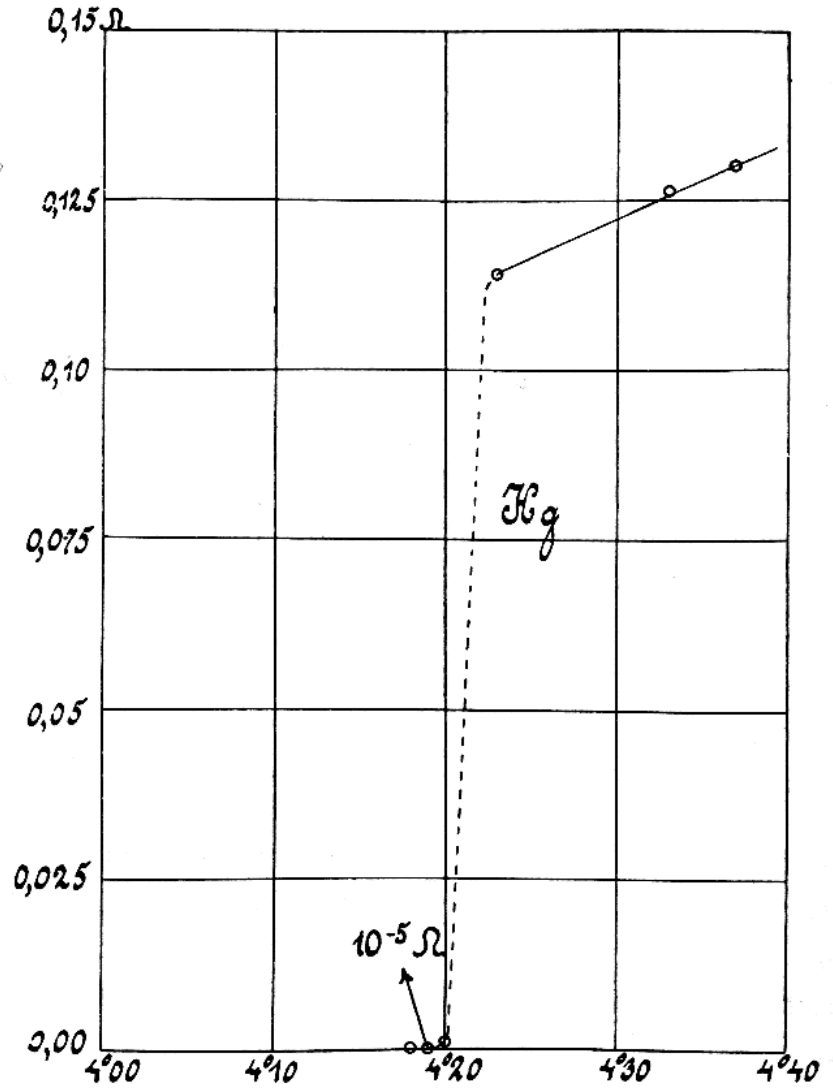
**William Lawrence & Henry Bragg**

1909年，荷兰物理学家昂纳斯 Heike Kamerlingh Onnes(1853–1926) 成功实现了氦的液化，实现了4.2K的低温。

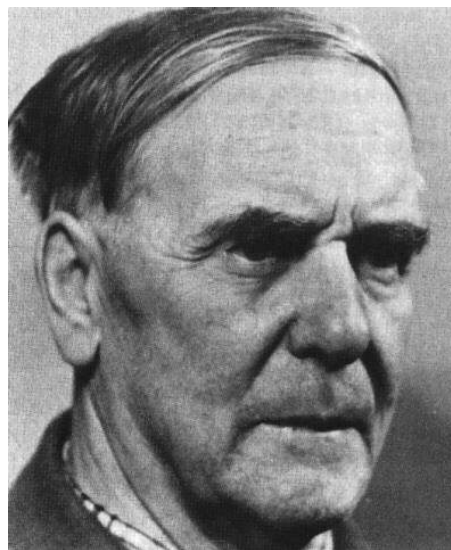
利用这样的低温条件，昂纳斯研究了汞(水银)的电阻随温度的变化，1911年发现在4.2K时汞的电阻从有限值突然变到0，这一现象被昂纳斯命名为超导，它成为20世纪凝聚态物理领域最让人着迷的现象之一。



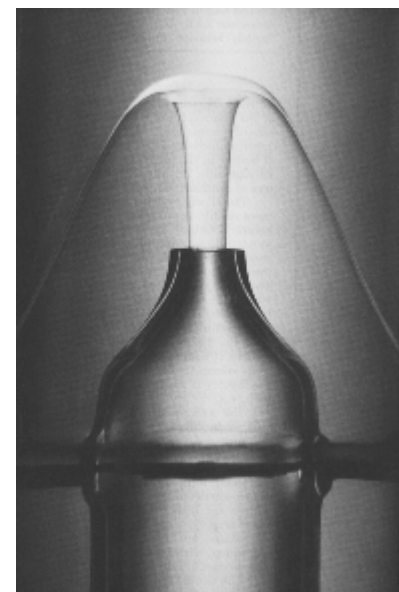
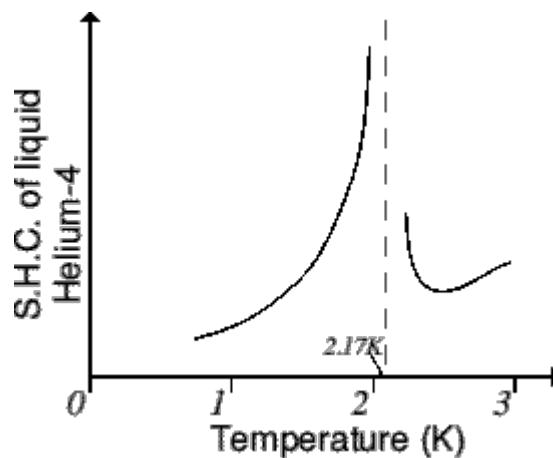
Heike Kamerlingh Onnes



超导相关的一个重要的现象是超流，在1937-1938年期间由俄国物理学家卡皮察 Pyotr Kapitsa (1894–1984) 发现，1978年因这一发现获得诺贝尔奖。

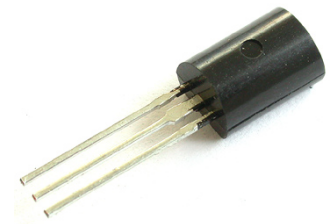
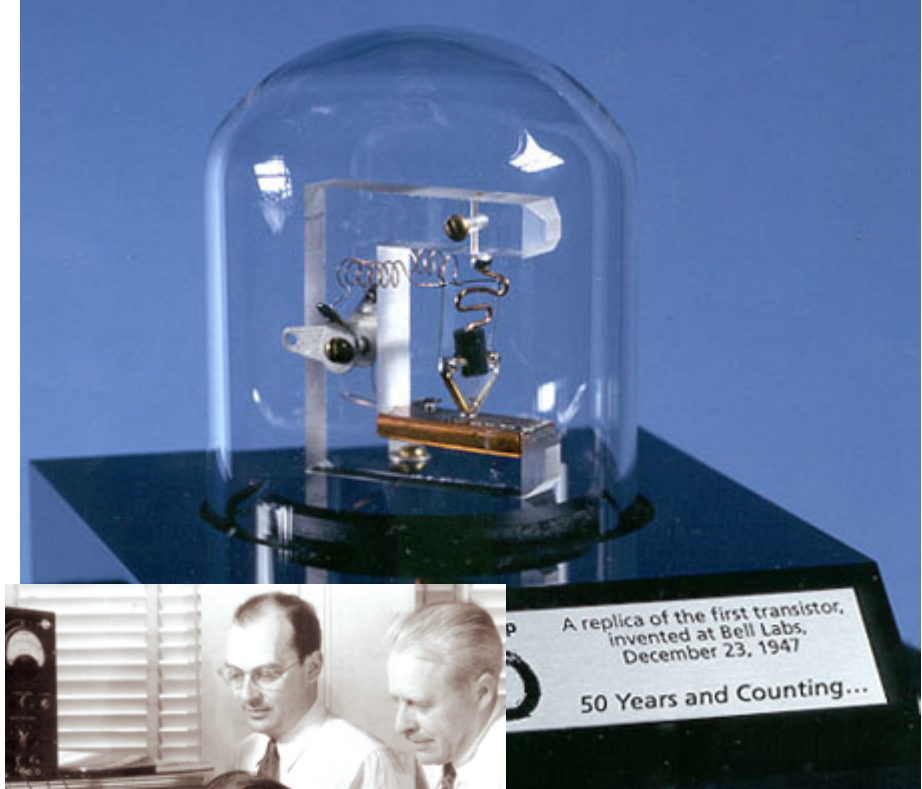


卡皮察发现当温度进一步降低到大约2.2K时，液氦的粘滞性完全消失，可以毫无阻力的流动。这一现象命名为超流动性。



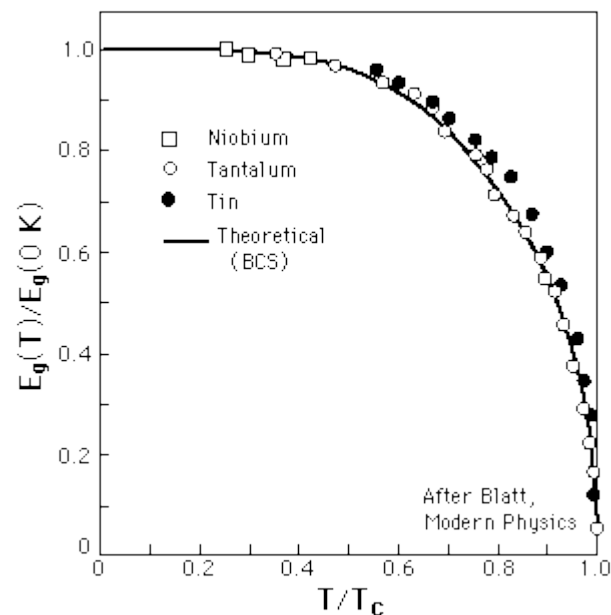
凝聚态物理学的一个革命性的进展是三极管的发现。1948年,三名在贝尔实验室工作的物理学家肖克利 William Shockley (1910–89), 布列顿 Walter H. Brattain (1902–87) 和巴丁 John Bardeen (1908–91) 发明了三极管。这一发明引起了电子学的一次深刻的革命。

1956年获得了诺贝尔物理学奖。



William Shockley (seated), John Bardeen (left) and Walter H. Brattain

1957年，三位理论物理学家，巴丁和他的学生库柏Leon Cooper (1930– ) 和施瑞弗J. Robert Schrieffer (1931– )建立了关于超导的微观理论，在超导发现46年之后给出了完满的解释。这一工作在1972年获得诺贝尔物理学奖。在1950年代前后的两个凝聚态物理的最重要的发现中，有一个共同的名字：巴丁，这位真正的天才物理学家也是到目前为止唯一一个两次获得诺贝尔物理学奖的物理学家。



1940年代到1950年代，利用量子力学理论和电子计算机，凝聚态物理学家通过大量的分析和计算，开始理解了金属，半导体的电子能级结构，获得了关于正常电导的物理图像，对晶体的电学，光学性质有了深入的理解。



*John Callatah*

计算物理的先驱



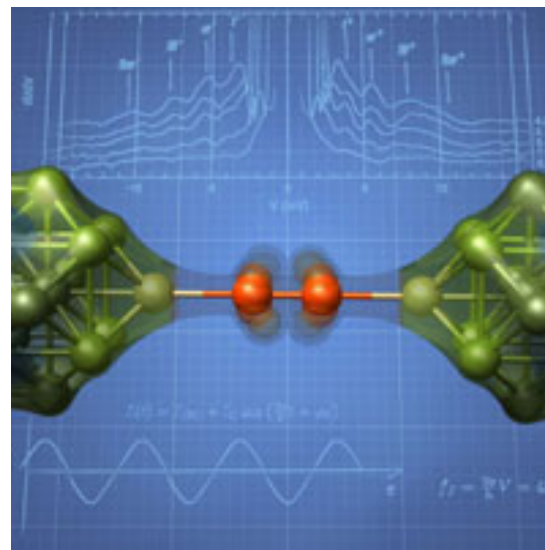
Felix Bloch



沈吕九  
L. J. Sham



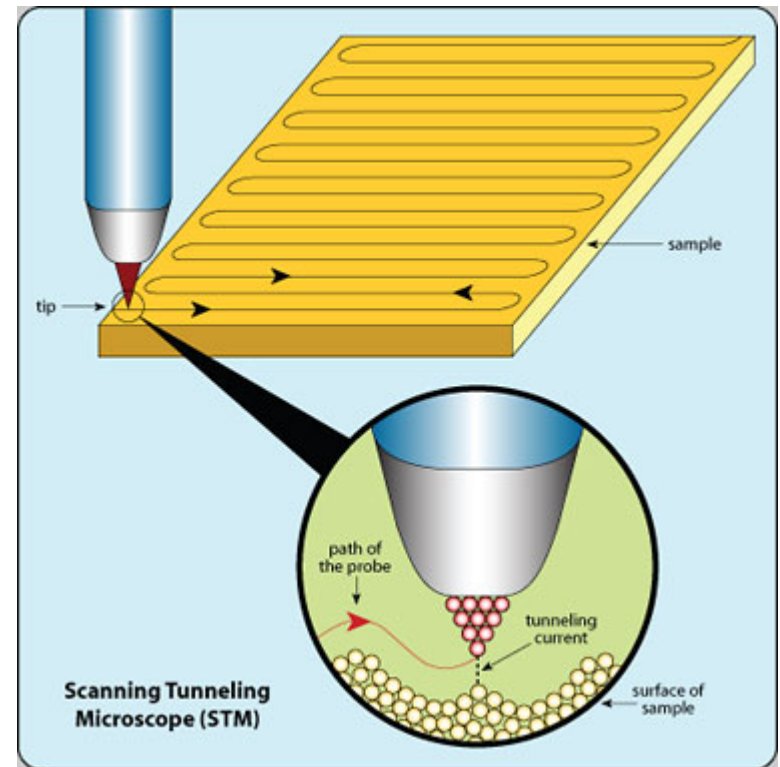
1962年，一位年轻的物理学研究生，约瑟夫森Brian Josephson (1940– ) 通过计算发现了超导结的一个非常新奇的性质并很快得到了实验验证，这一性质被称为约瑟夫森效应. 基于约瑟夫森效应而发展起来的超导量子干涉仪 (SQUID) 成为测量微弱磁场改变的灵敏仪器。约瑟夫森也因此而获得了1973年的诺贝尔物理学奖。

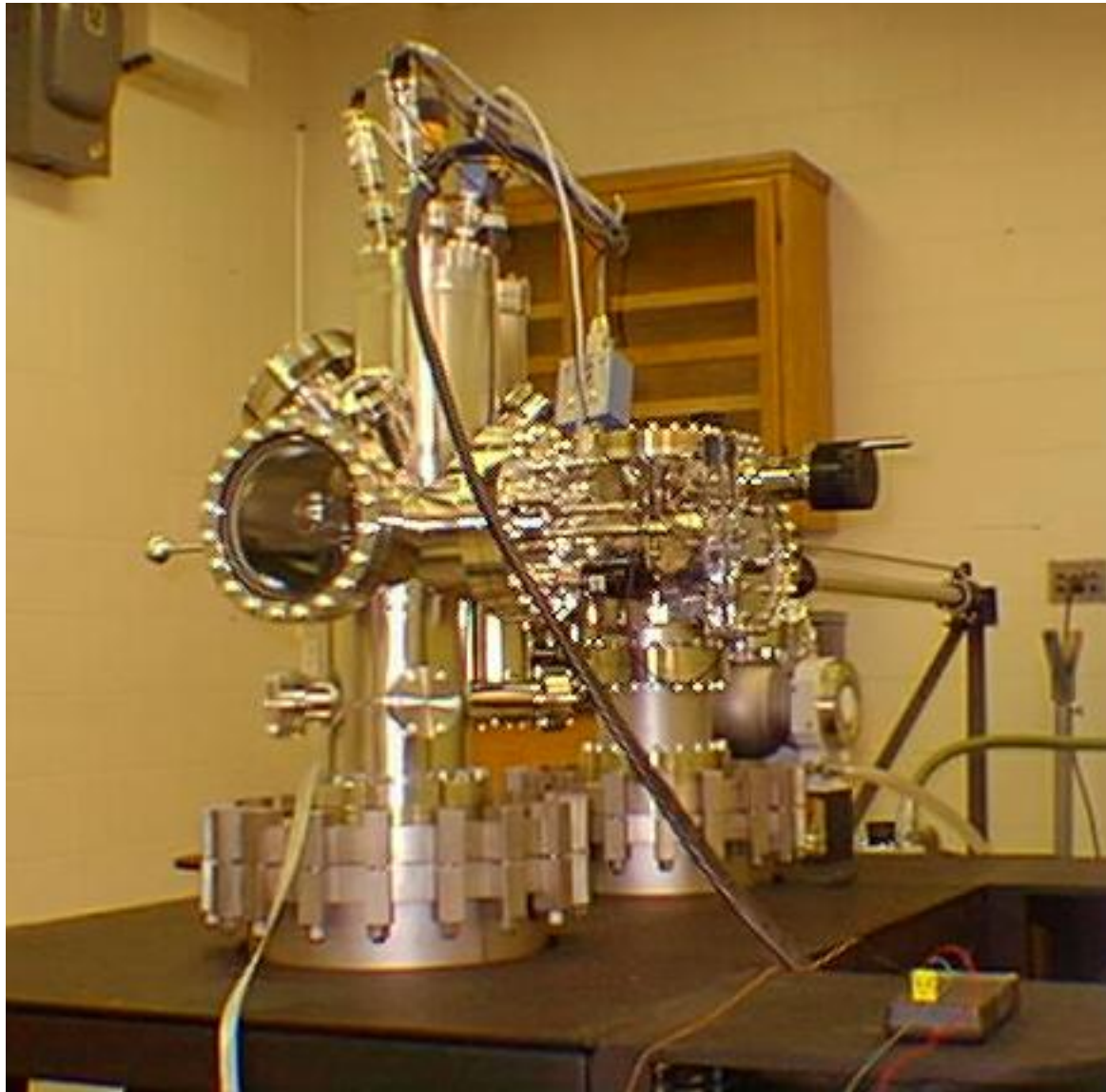


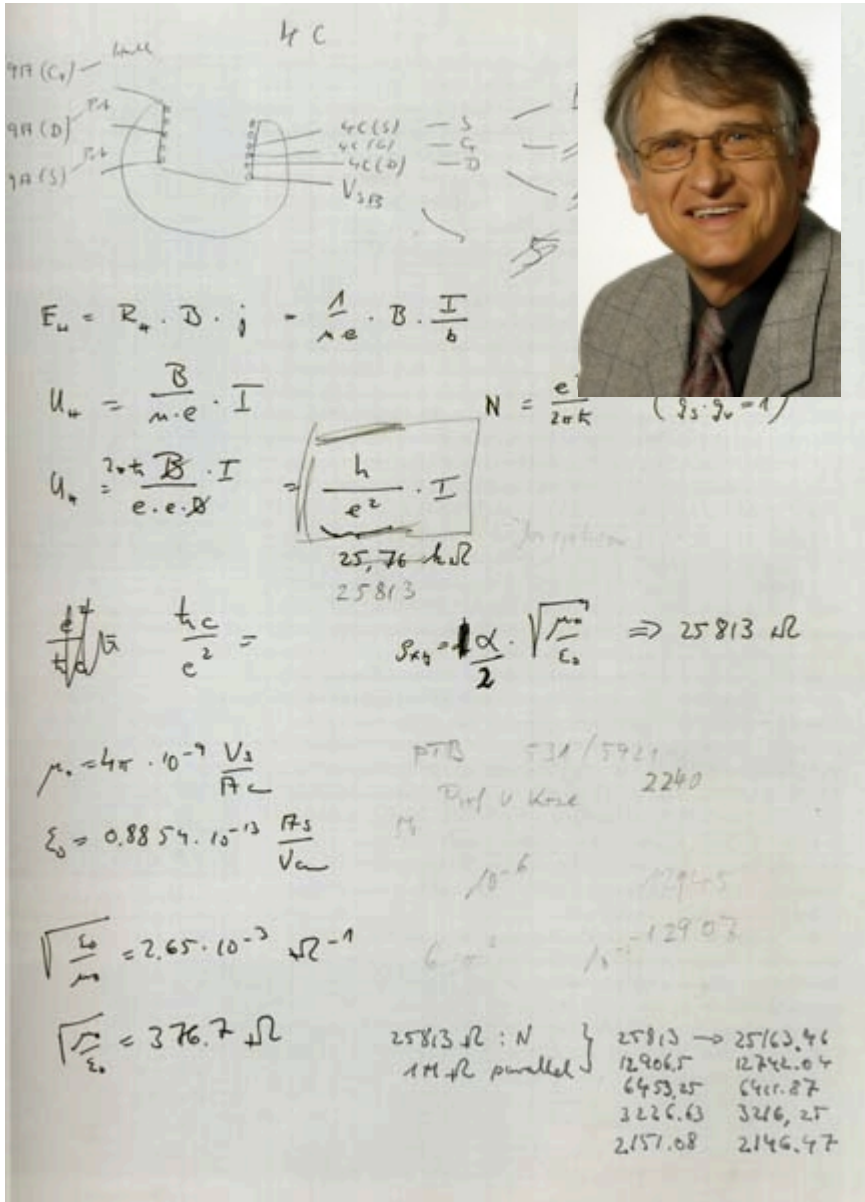
在1970年代到1980年代，凝聚态物理学在深度和广度上都有了非常重要的发展，这里特别要提到的是1981年比尼格 Gerd Binnig (1947– ) 罗瑞尔 Heinrich Rohrer (1933– )发明了扫描隧道显微镜(STM)。这一发明不仅提供了一个观测微观世界的极好手段，同时也提供了操纵原子的合适的方法。



Gerd Binnig(left) and Heinrich Rohrer







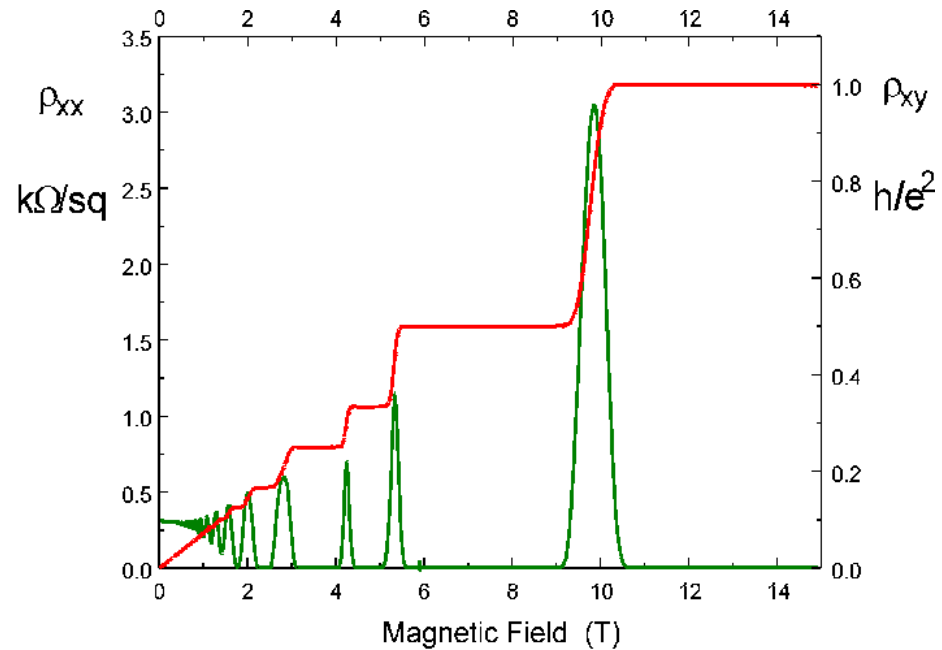
Handwritten notes on the left side of the image include:

- Diagram of a Hall bar with contacts labeled 1A(S), 1A(D), 1A(G), 4C(S), 4C(D), 4C(G).
- Equation:  $E_u = R_u \cdot D \cdot j = \frac{1}{ne} \cdot B \cdot \frac{I}{b}$
- Equation:  $u_u = \frac{B}{m \cdot e} \cdot I$
- Equation:  $u_u = \frac{2 \cdot B \cdot I}{e \cdot e \cdot D} = \frac{h}{e^2} \cdot I$
- Equation:  $N = \frac{e^2}{2\pi k} (g_s \cdot g_v = 4)$
- Equation:  $\frac{d\psi}{dA} \sqrt{A} = \frac{h c}{e^2} = \rho_{xy} = \frac{1}{2} \alpha \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \Rightarrow 25813 \text{ } \Omega$
- Equation:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A \cdot m}$
- Equation:  $\epsilon_0 = 0.8854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
- Equation:  $\sqrt{\frac{h_0}{m}} = 2.65 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega^{-1}$
- Equation:  $\sqrt{\frac{h_0}{\epsilon_0}} = 376.7 \text{ } \Omega$
- Table of values:
 

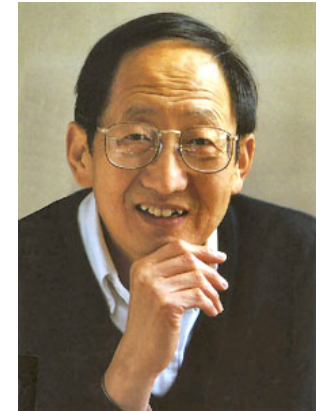
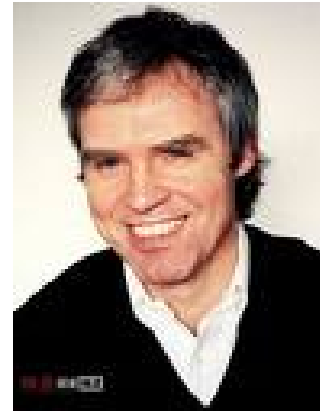
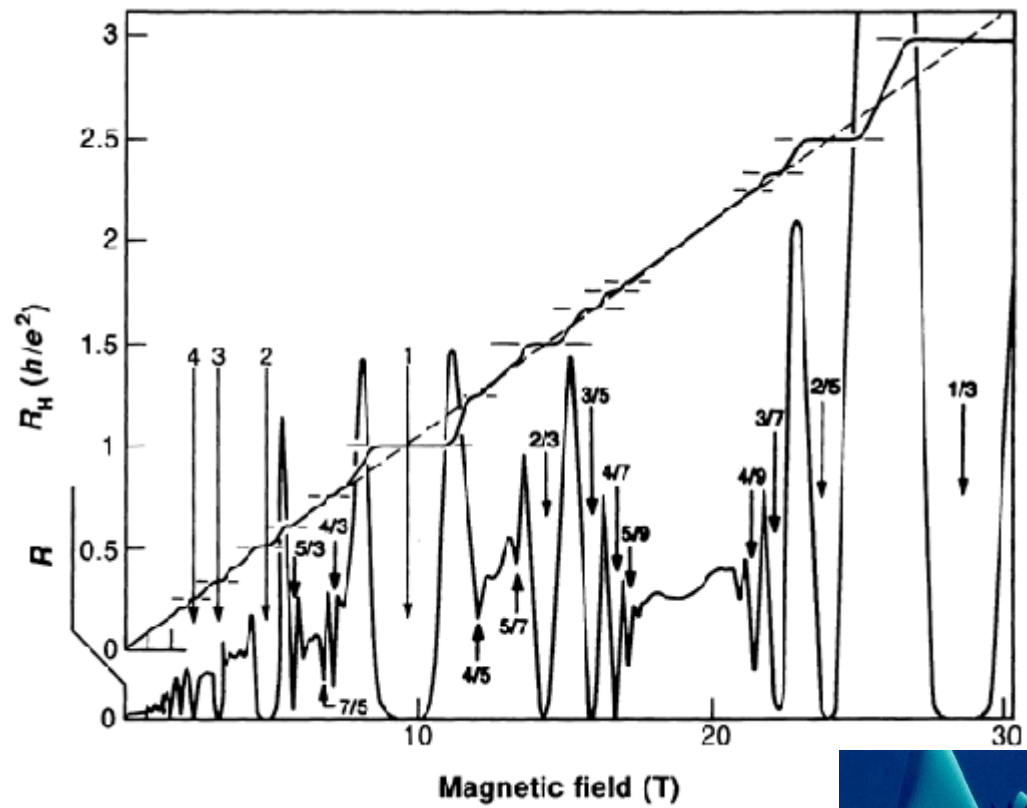
25813 $\Omega$ : N	} 25813 $\rightarrow$ 25163.46	
1H $\Omega$ parallel		12906.5
		6453.25
		3226.63
		2157.08

Portrait of Klaus von Klitzing on the right side of the image.

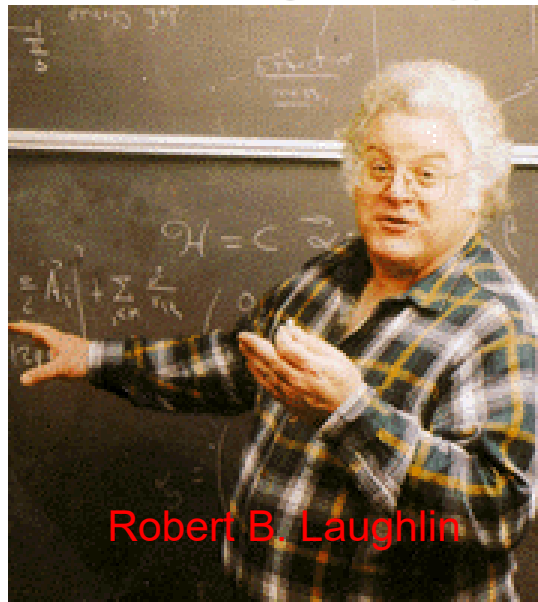
在1984年克里青发现了量子霍尔效应和其后崔琦，斯托莫发现分数量子霍尔效应，克里青的发现为建立电阻的标准提供了一个重要的手段。



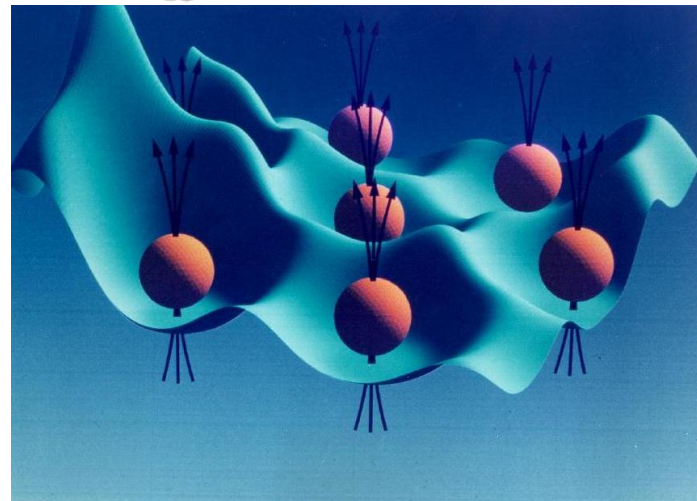
Klaus von Klitzing



Horst Stormer Daniel C. Tsui(崔琦)



Robert B. Laughlin



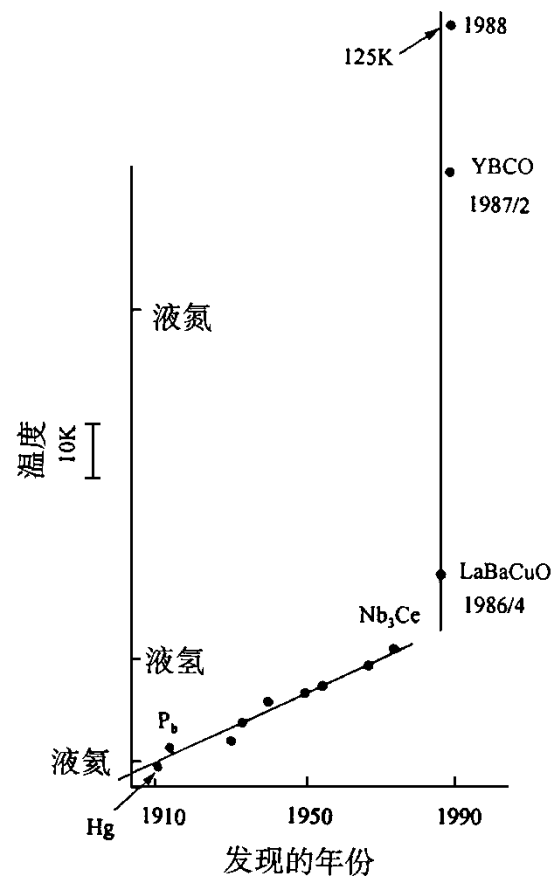
需要特别提出的是米勒K. Alexander Müller (1927– )和柏诺茨 J. Georg Bednorz (1950– )1986年发现氧化物超导体，他们的发现和随后全球范围内的超导研究热潮把超导临界温度提高了一个数量级。这一工作在第二年就获得了诺贝尔物理学奖。



K. Alexander Müller



J. Georg Bednorz



铁基超导体是指化合物中含有铁，在低温时具有超导现象，且铁扮演形成超导的主体的材料。2006年日本东京工业大学Hideo Hosono教授的团队发现第一个以铁为超导主体的化合物 $\text{LaFeOP}$ ，打破以往普遍认定铁元素不利形成超导迷思。

中国科学家在铁基超导研究中站在世界的最前沿。

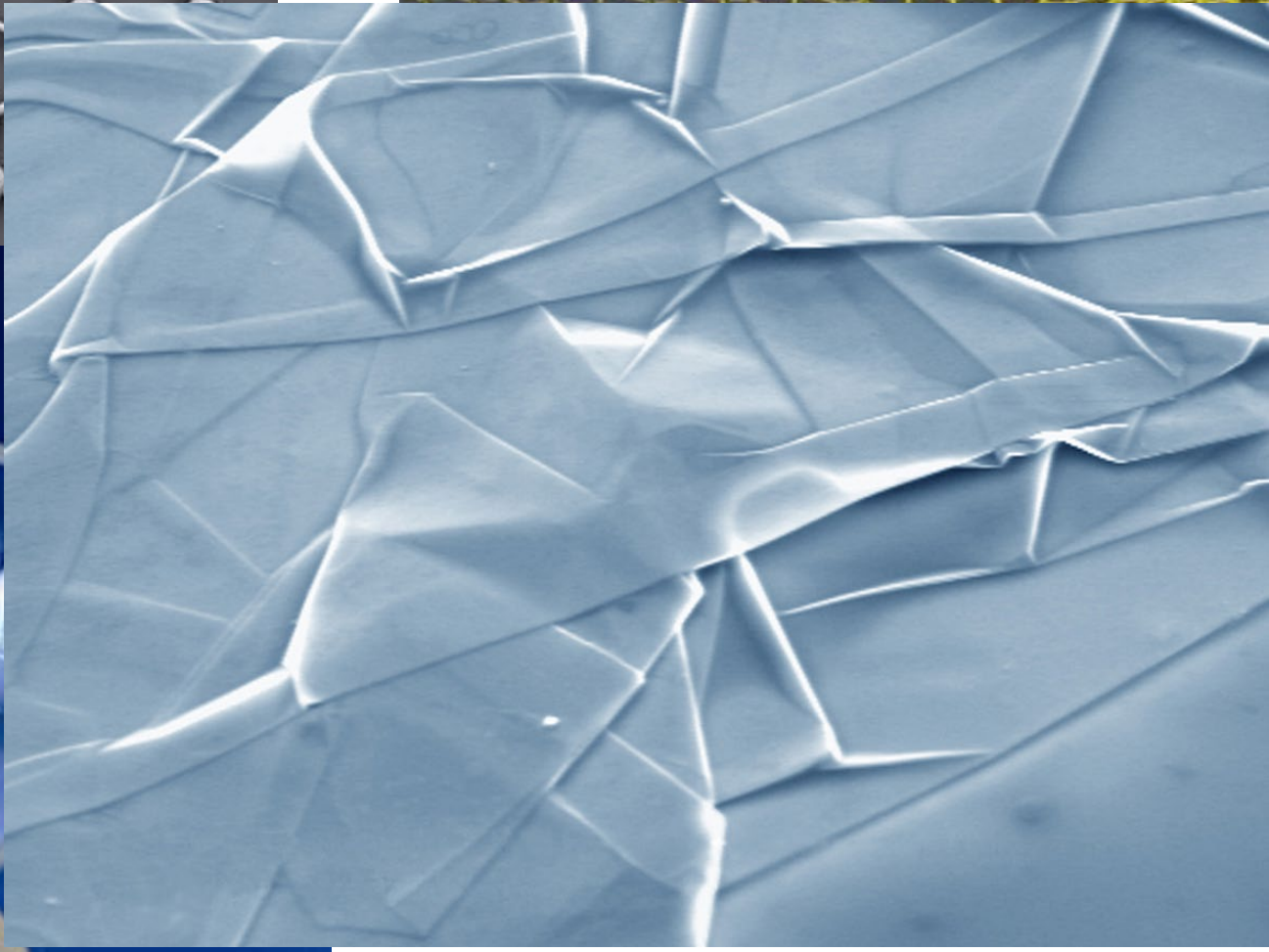
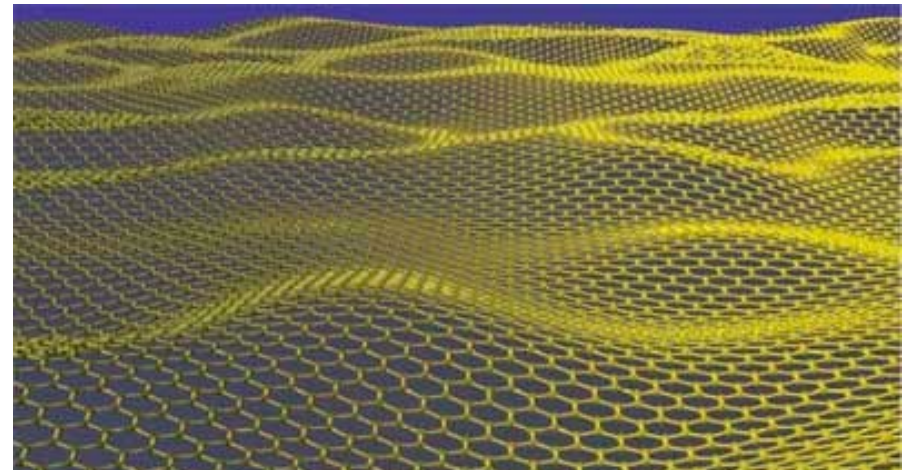
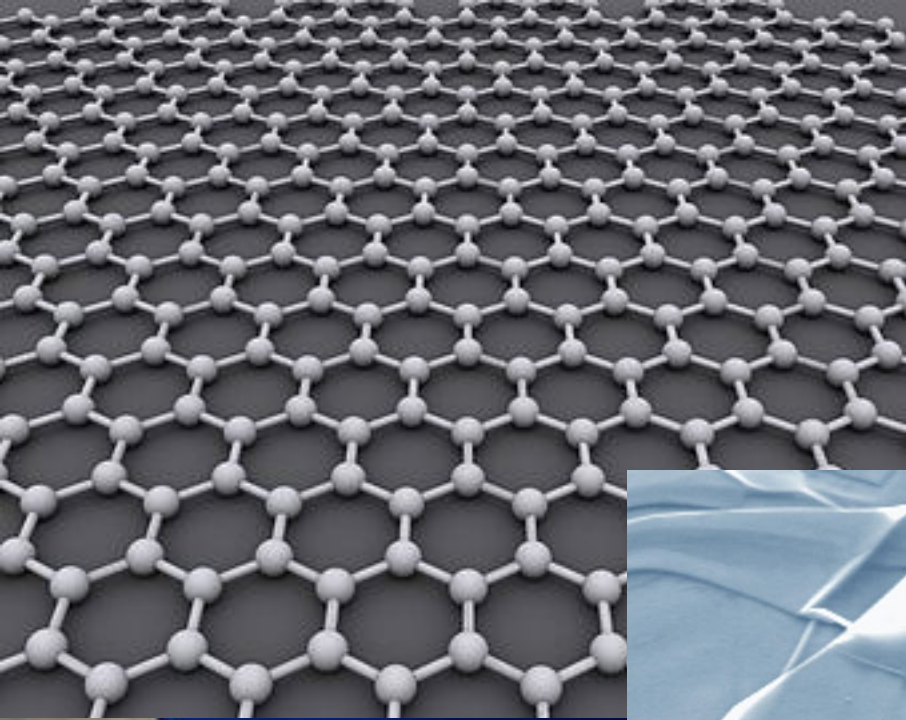
石墨烯（Graphene）是一种由碳原子以 $sp^2$ 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜，只有一个碳原子厚度的二维材料。石墨烯一直被认为是假设性的结构，无法单独稳定存在，直至2004年，英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫，成功地在实验中从石墨中分离出石墨烯，而证实它可以单独存在，两人也因“在二维石墨烯材料的开创性实验”为由，共同获得2010年诺贝尔物理学奖。





安德烈·海姆，

康斯坦丁·诺沃肖洛夫



# 从另一个角度看物理



实验物理

理论物理

物理学

计算物理

比起自然现象来，实验提供了更多的变化和机动。4.2K, nK!

# 物理学中的五大理论

- 牛顿力学 (经典力学)
- 热力学
- 电磁学
- 相对论
- 量子力学

无一会被完全推翻. 无一百分百正确. 没有一个理论是唯一的。

学习普通物理，除了学习事实、定律、方程和解题技巧以外还需

- 努力从整体上掌握物理学，
- 体会基本物理定律的优美、简洁、和谐以及辉煌，
- 欣赏其普适性，
- 要了解各分支间的相互联系和了解其适用范围。

# 要学会区别

- 理论和应用，
- 物理思想和数学工具，
- 一般规律和特殊事实，
- 主要和次要效应，
- 传统的和现代的推理方式。

# 物理学著名教材

普通物理：

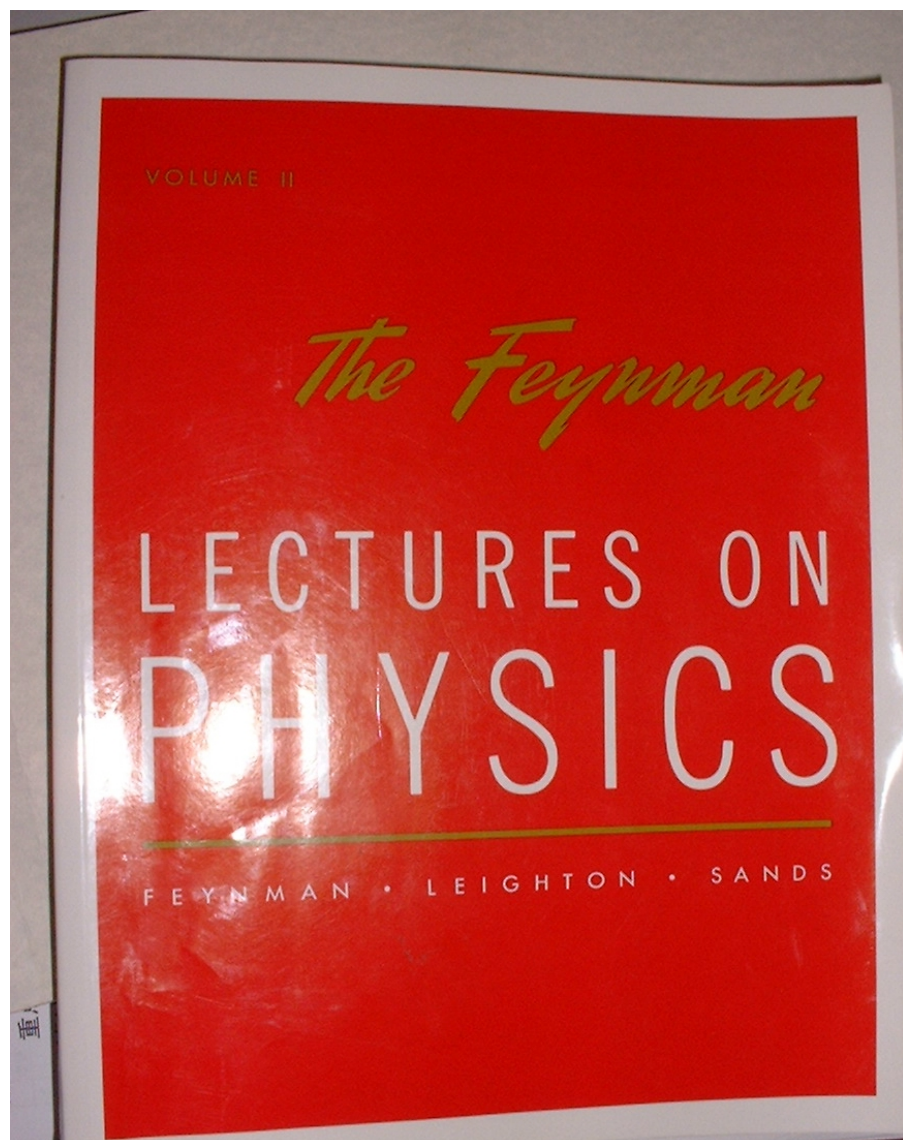
**Feynman Lectures on Physics**

理论物理：**Landau & Lifshitz**

**Course of Theoretical Physics**



费恩曼的三大本物理讲义也许是最适合理科班学习的普通物理教材。虽然有一些最新进展没有收入，个别地方的观点有些陈旧，但它仍然是最好的。值得在今后的几年慢慢阅读和欣赏。





朗道和栗弗席兹的10卷本理论物理教程几乎包含了物理学的所有方面。今后的学习过程中，力学，经典场论毫无疑问将成为最重要的参考书。

# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

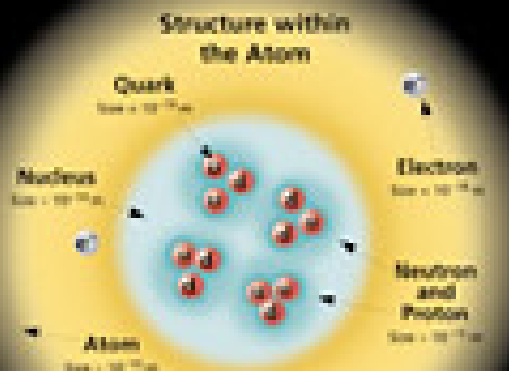
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is excluded for the time because it is one of the fundamental interactions even though not part of the Standard Model.

## FERMIONS

Matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			
Flavor	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Electric charge	
$\nu_e$ electron neutrino	< 1.10 <sup>-6</sup>	0	
$e^-$ electron	0.000511	-1	
$\nu_\mu$ muon neutrino	< 0.00012	0	
$\mu^-$ muon	0.106	-1	
$\nu_\tau$ tau neutrino	< 0.01	0	
$\tau^-$ tau	1.7771	-1	

Quarks spin = 1/2			
Flavor	Approx. Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Electric charge	
$u$ up	0.002	2/3	
$d$ down	0.005	-1/3	
$c$ charm	1.3	2/3	
$s$ strange	0.1	-1/3	
$t$ top	173	2/3	
$b$ bottom	4.2	-1/3	



The protons and neutrons in the nucleus are made of quarks. Each quark and antiquark is made of three smaller particles called gluons. The gluons are the carriers of the strong interaction.

## BOSONS

Force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			
Name	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Electric charge	
$\gamma$ photon	0	0	
$W^-$	80.4	-1	
$W^+$	80.4	+1	
$Z^0$	91.187	0	

Strong (color) spin = 1			
Name	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Electric charge	
$g$ gluon	0	0	

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "color charge," also called "color charge." "Color charge" also refers to the "color charge" of quarks. There are three colors of quarks: red, green, and blue. Each quark has a corresponding anti-color charge. The gluons, which are the carriers of the strong force, have a color charge of their own.

Color-charged particles interact by exchanging photons. The exchange of photons is the strong interaction. The exchange of photons is the strong interaction. The exchange of photons is the strong interaction.

### Quarks Confined in Mesons and Baryons

The current table quarks and gluons, they are confined in color neutral particles called hadrons. The confinement is caused by the strong interaction of quarks among the gluons. The confinement is caused by the strong interaction of quarks among the gluons. The confinement is caused by the strong interaction of quarks among the gluons.

### Unified Strong Interaction

The strong forces of color neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual force that binds atoms that have electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the nucleons.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons (qqq) and Antibaryons (q̄q̄q̄)					
Baryons are fermions (half-integer spin). There are about 100 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark composition	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
$p$	proton	uud	+	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-	0.938	1/2
$n$	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\bar{n}$	anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0	1.000	1/2
$\Delta^+$	delta	uuu	+	1.232	3/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
		Mass + Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing	All	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles mediating	Graviton (not yet observed)	$W^+, W^-, Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength (compared to gravity)	10 <sup>38</sup> to 10 <sup>41</sup> times stronger than gravity	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-5</sup>	1	10
		10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-6</sup>	1	Not applicable to quarks
		10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	Not applicable to hadrons

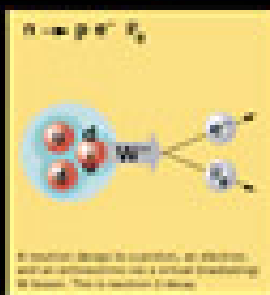
Mesons (q̄q)					
Mesons are bosons (integer spin). There are about 100 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark composition	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+	0.140	0
$\pi^-$	pion	$d\bar{u}$	-	0.140	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+	0.770	1
$\rho^-$	rho	$d\bar{u}$	-	0.770	1
$\eta$	eta	$u\bar{u} + d\bar{d}$	0	0.548	0

### Matter and Antimatter

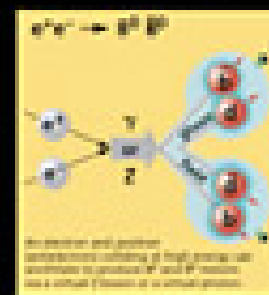
For every particle type there is a corresponding antiparticle type. Matter and antimatter have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons like  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta$ , but not  $\pi^0$  are their own antiparticles.

### Figures

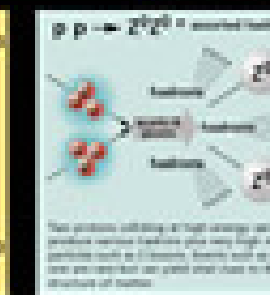
These diagrams are an artistic representation of physical processes. They are not meant to represent the mathematical equations. Green shaded areas represent the cloud of gluons in the gluon field, and red lines the quark paths.



A quark-antiquark annihilation, or creation, of a gluon. The gluon then splits into a quark-antiquark pair.



Annihilation and creation of a photon. The photon then splits into a quark-antiquark pair.



The annihilation of a quark-antiquark pair into a Z boson. The Z boson then splits into a quark-antiquark pair.

### The Particle Adventure

Visit the Particle Adventure and Science The Particle Adventure at [http://pdg.lbl.gov/pag\\_adventure.html](http://pdg.lbl.gov/pag_adventure.html)

**Support:**  
This effort has been made possible by the generous support of a U.S. Department of Energy Laboratory including National Laboratories, Brookhaven National Laboratory, Cornell University, Fermilab, SLAC National Accelerator Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Los Angeles, and the University of Wisconsin.

**DOE** (Department of Energy) is a non-profit organization. For more information, please contact the Particle Adventure at [http://pdg.lbl.gov/pag\\_adventure.html](http://pdg.lbl.gov/pag_adventure.html)

- 原子核的组成，1932年前认为质子+电子



- 1932年，查德威克发现了中子，原子核的模型成为质子+中子  
汤川秀树提出核子通过交换  $\pi$ -介子而相互作用.



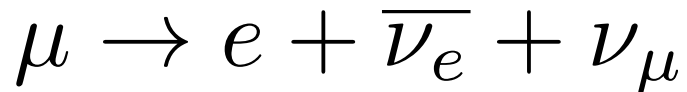
# muon 的发现

□ muon 1937 由 J. C. Street 和 C. Stevenson 在云室中发现

□ muon 和电子的性质完全相同

除了其质量是电子的200余倍

寿命大约是  $2 \times 10^{-6} \text{ [s]} = 2 \mu\text{s}$



□ muon 能够从大气上层到达地面，相对论效应 !!!



PHYSICS AT THE FARM:  
Discovery of the Muon.

# Discovery of the Pion



Cecil Powell  
1903-1969  
1950 Nobel  
Prize winner

□ Bristol 大学的 Cecil Powell 及其同事 利用泡室研究带电粒子的轨迹.

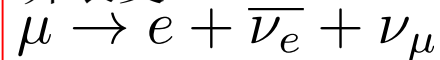
□ 1947年发现了 $\pi$ -介子 ( $\pi$ ).

Pion 在此停止  
并衰变

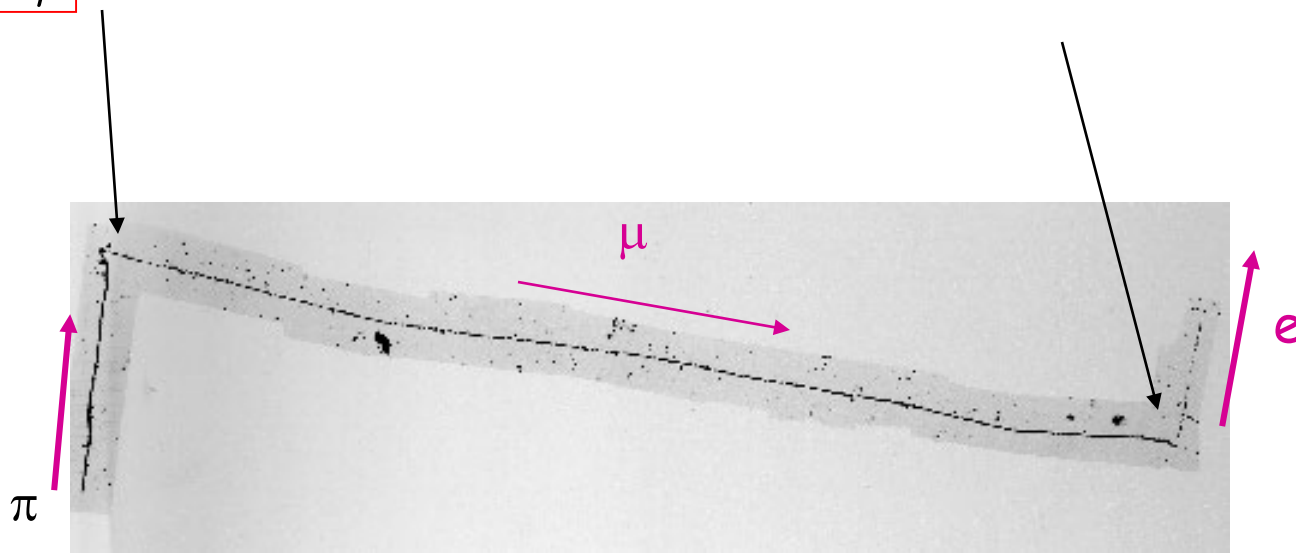


中微子发出

Muon ( $\mu$ )在此停止  
并衰变:



两个中微子发出



# 太多的基本粒子

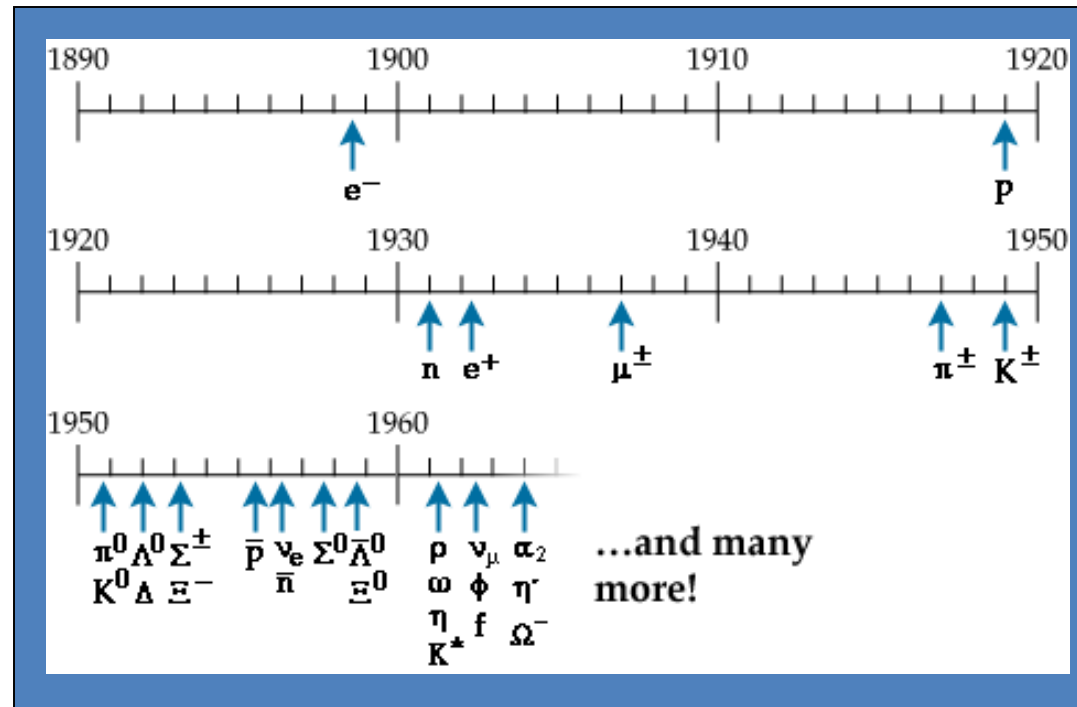


由于不能控制宇宙线，科学家建造加速器加速粒子，使之碰撞，产生大量其他粒子。

1950年代，加速器产生了大量的粒子。

很多这种粒子不稳定，很快衰变。

1955年，发现反质子！





# 物质的基本结构?



"Particles, particles, particles."



# 简单 → 复杂 → 简单

- 1930年代, 世界是简单的
- 质子, 中子, 电子. 构成原子 → 分子 → DNA → 人!
- 宇宙简单而优雅...

大量基本粒子的发现, 基本粒子“基本”吗?

I. I. Rabi's 在发现muon时的名言:

Who ordered that" ?

太多的基本粒子, 太复杂?



1994 Nobel Prize  
Winner in Physics

# 夸克 (Quarks) ?

The name of the game

Murray Gell-Mann 正在阅读 James Joyce 的 *Finnegan's Wake* 一书，书中有“*three quarks for Muster Mark*”这样一个短语。他决定更基本的粒子称为夸克

1964年, Murray Gell-mann 和 George Zweig (分别独立) 提出了夸克的概念.



Murray Gell-Mann



George Zweig

Flavor	Q/e
u	+2/3
d	-1/3
s	-1/3

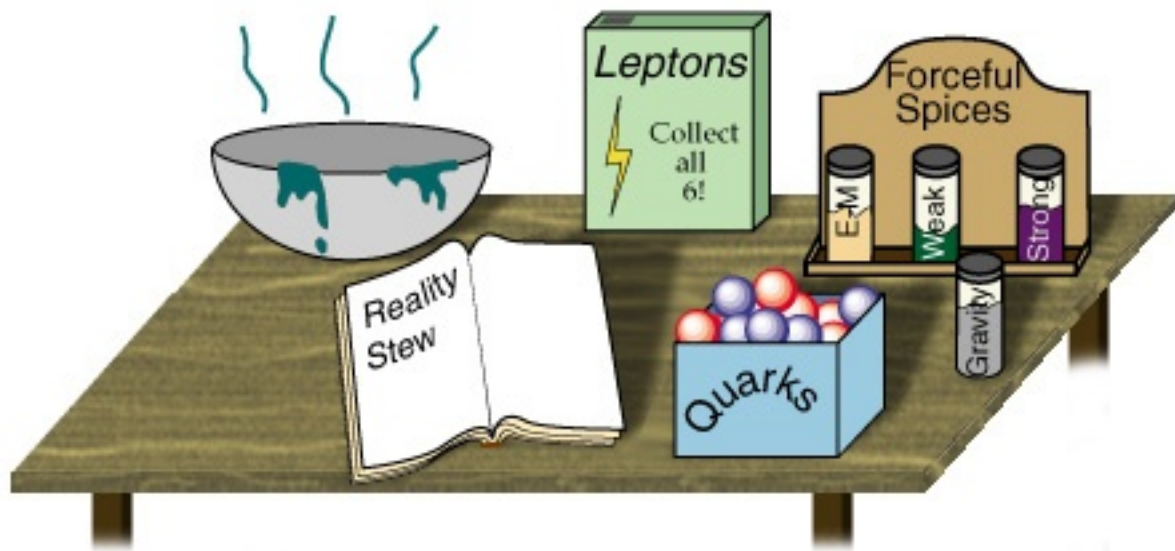
# 标准模型

- 世界由什么组成？如何组成？
- -----标准模型

6 种轻子

6 种夸克

传递力的粒子



# 夸克



$\left(\frac{2}{3}\right)$   
up



$\left(\frac{2}{3}\right)$   
charm



$\left(\frac{2}{3}\right)$   
top



$\left(-\frac{1}{3}\right)$

down



$\left(-\frac{1}{3}\right)$

strange



$\left(-\frac{1}{3}\right)$

bottom



up  $\frac{2}{3}$



charm  $\frac{2}{3}$



top  $\frac{2}{3}$



down  $-\frac{1}{3}$



strange  $-\frac{1}{3}$



bottom  $-\frac{1}{3}$

# 强子（重子、介子）

正如群居的大象，夸克也群居，从不单独存在，  
他们群居所形成的复合粒子叫“强子”

虽然夸克带有分数电荷，但强子的电荷是整数

虽然夸克带有颜色，但强子没有颜色

强子（Hadron）有两类：

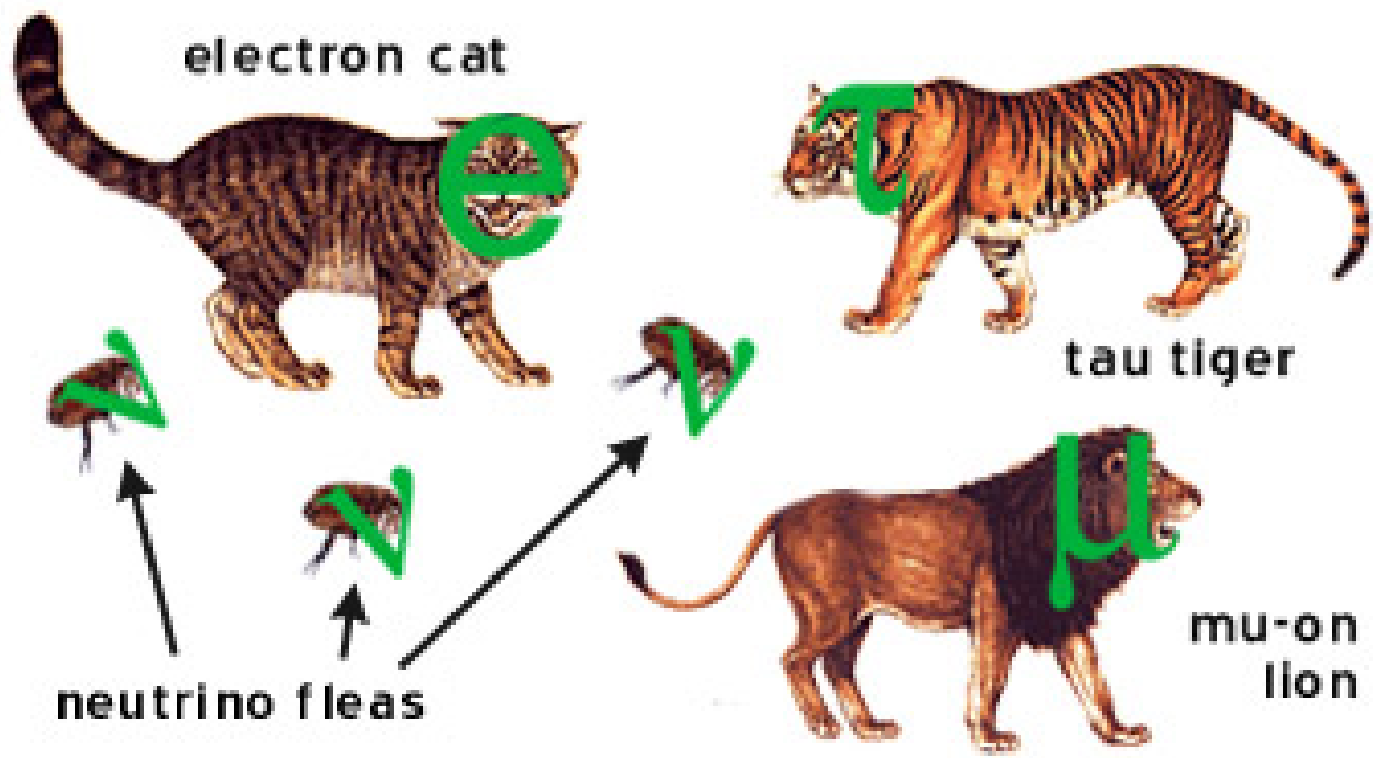


重子（Baryon）

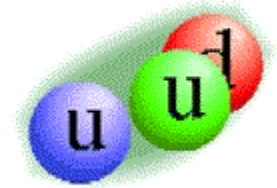


介子（Meson）

# 轻子 (Lepton)



夸克总是群居而以束缚态形式存在；



轻子则单个存在 带电轻子象猫科动物，易看到；

而不带电的轻子（中微子）象附着在这些动物身上的跳骚，难以看到。

# 物质的“代”

Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III
The Generations of Matter			



第二、三代的费米子衰变很快，我们周围的物质中没有它们。为什么它们还存在呢？当 $\mu$ 轻子被发现时，I. I. Rabi 叹道：“Who odered that ?”

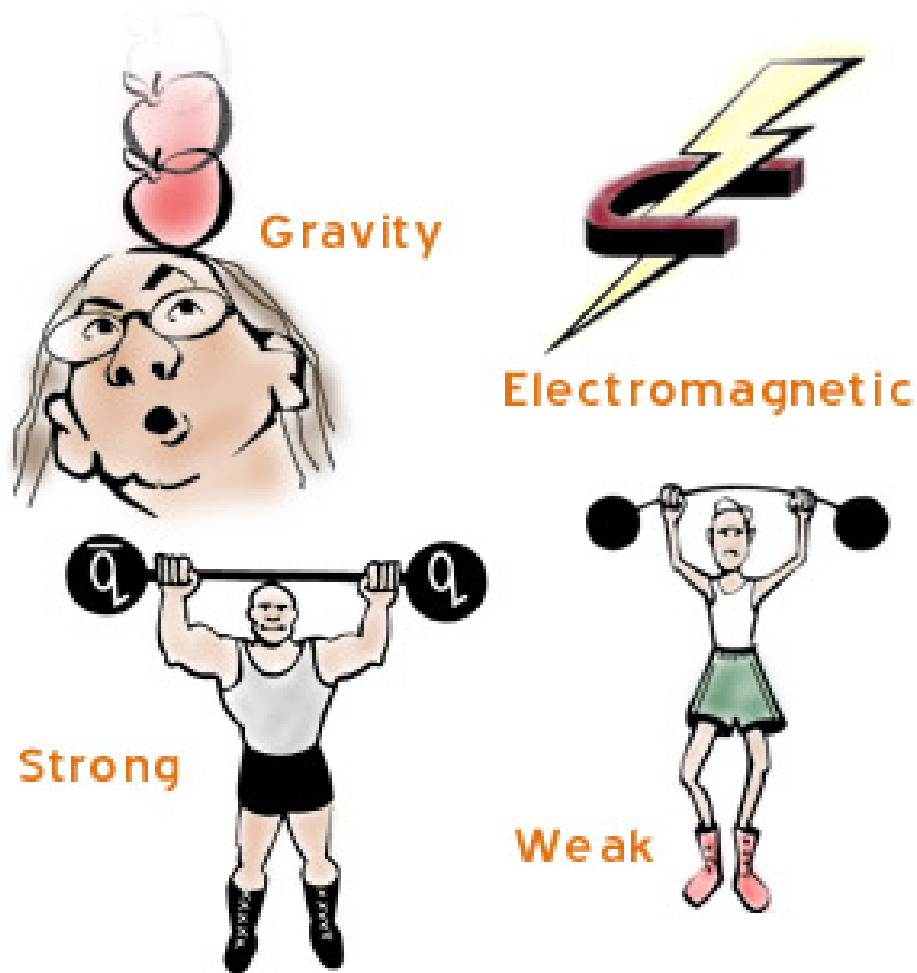


# 世界如何组成？

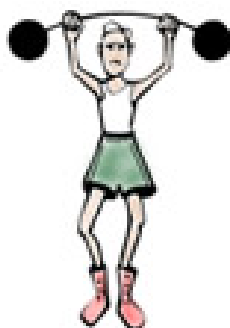
世界由夸克和轻子组成。

是什么把夸克和轻子组合成物质？

→ 四种作用！

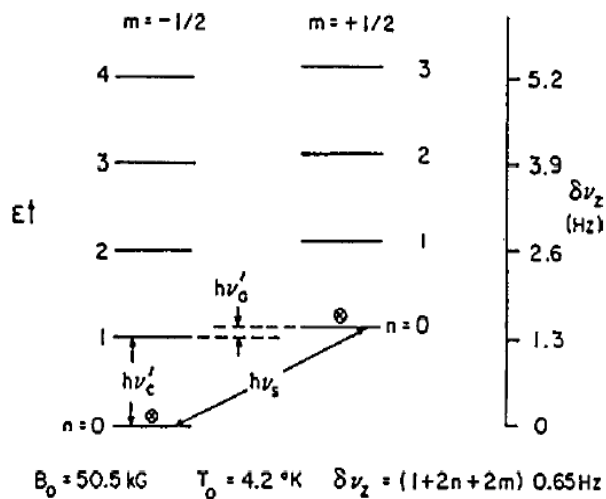


# 自然界基本作用力的总结



	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

# 量子电动力学：电子的反常磁矩



$$a_{e-}(\text{expt}) = 1\,159\,652\,188.4(4.3) \times 10^{-12} \quad (4 \text{ ppb}),$$

$$a_{e+}(\text{expt}) = 1\,159\,652\,187.9(4.3) \times 10^{-12} \quad (4 \text{ ppb}).$$

$$a_e(\text{q. Hall}) = 1\,159\,652\,153.5(1.2) \quad (28.0) \times 10^{-12},$$

$$a_e(\text{ac J}) = 1\,159\,652\,379.1(1.2) \quad (65.3) \times 10^{-12},$$

$$a_e(\text{M}) = 1\,159\,652\,216.0(1.2) \quad (67.8) \times 10^{-12},$$

$$a_e(h/m_n) = 1\,159\,652\,095.0(1.2) \quad (42.7) \times 10^{-12},$$

$$a_e(\text{th}) = 0.5 \left( \frac{\alpha}{\pi} \right) - 0.328\,478\,965 \dots \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2$$

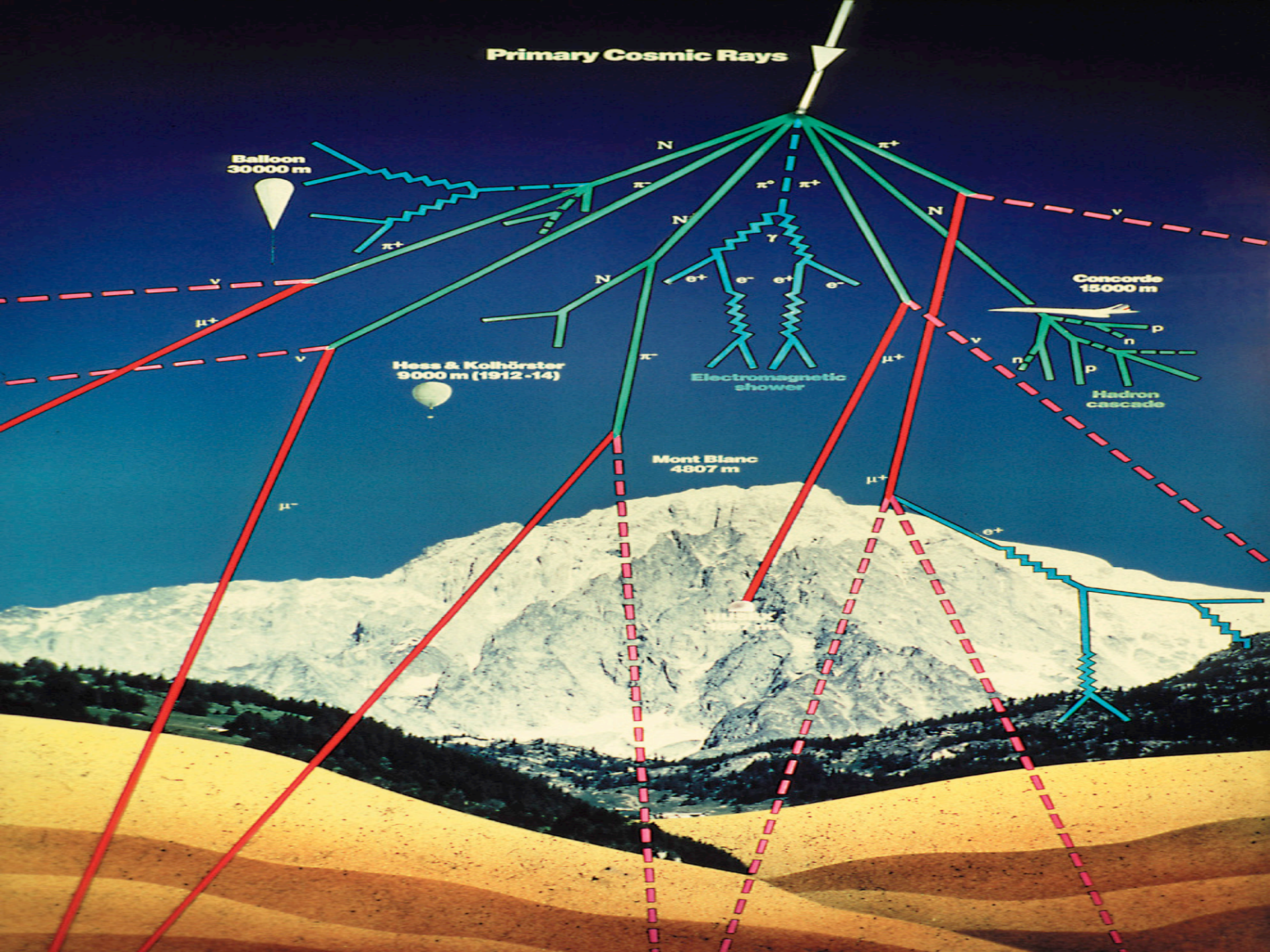
$$+ 1.181\,241\,456 \dots \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^3$$

$$- 1.509\,8(384) \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^4$$

$$+ 4.393(27) \times 10^{-12}.$$

[返回](#)

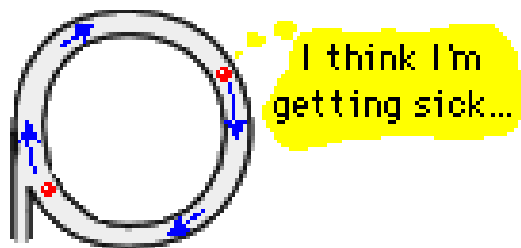
# Primary Cosmic Rays



# 对撞机（加速器）



直线加速



回旋加速



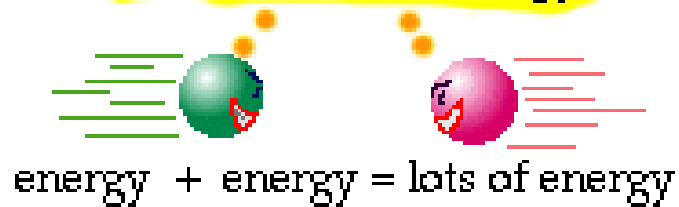
固定靶



对撞机

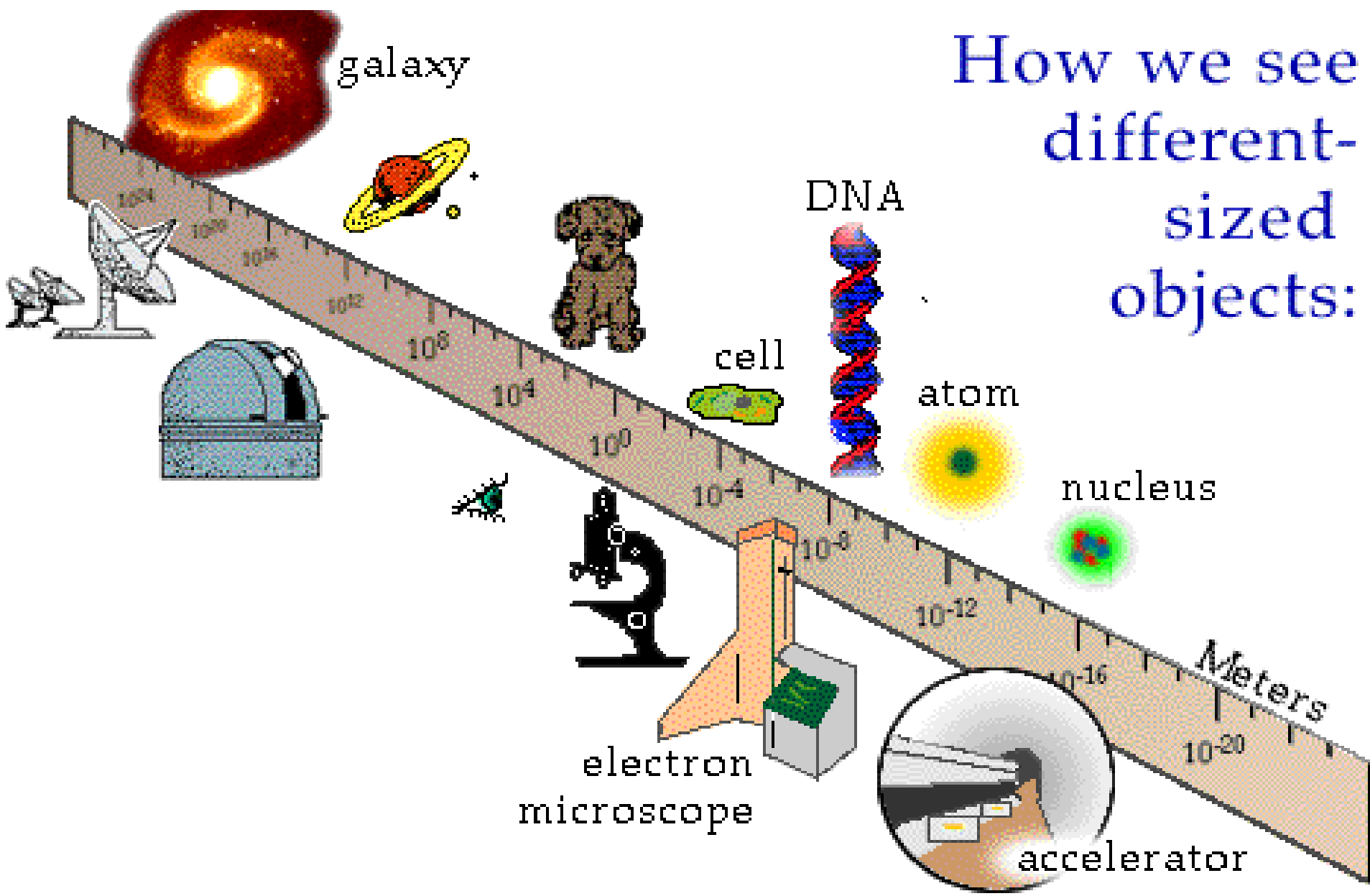


Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!



# 观测世界的手段：总结

How we see  
different-  
sized  
objects:



# 理论未解之谜

标准模型取得了巨大成功，但它仍不是一个基本的理论，有一些理论问题无法解释：

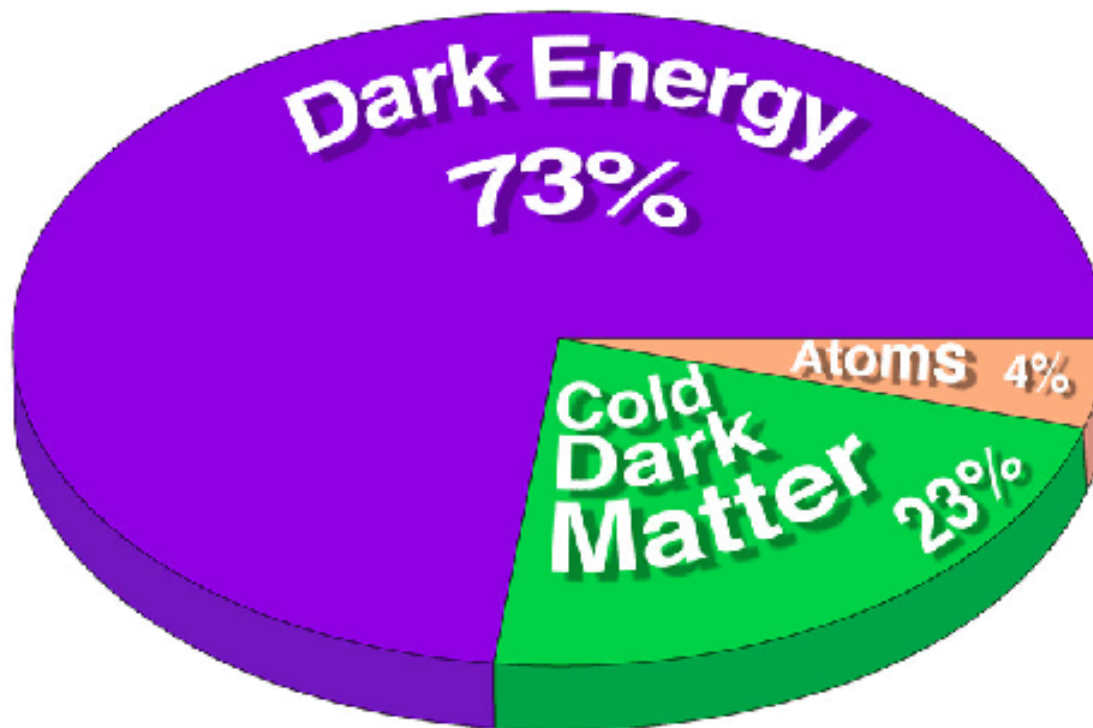
水平方向的：夸克费米子“代”和“味道”的问题

垂直方向的：“统一”和更小尺度的物理

来自天上的：“暗物质”和“暗能量”

来自地狱的：希格斯粒子的本质

# “暗物质”和“暗能量”

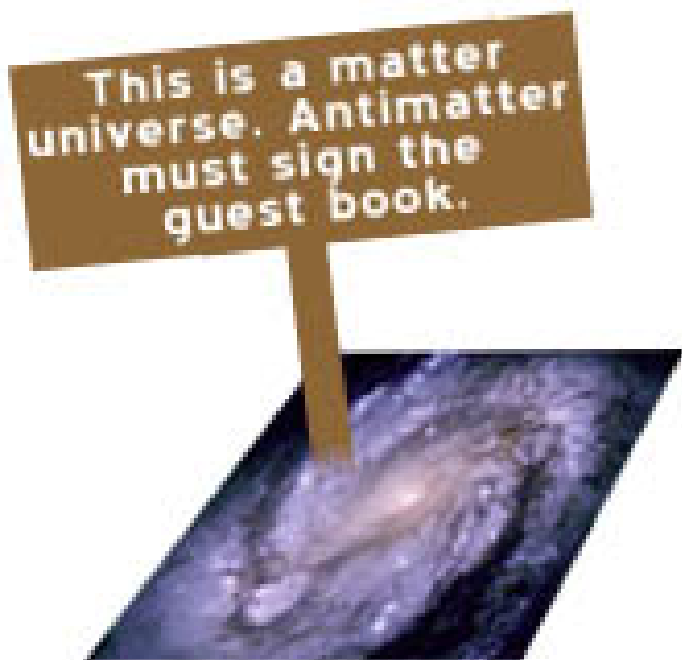


标准模型无法解释

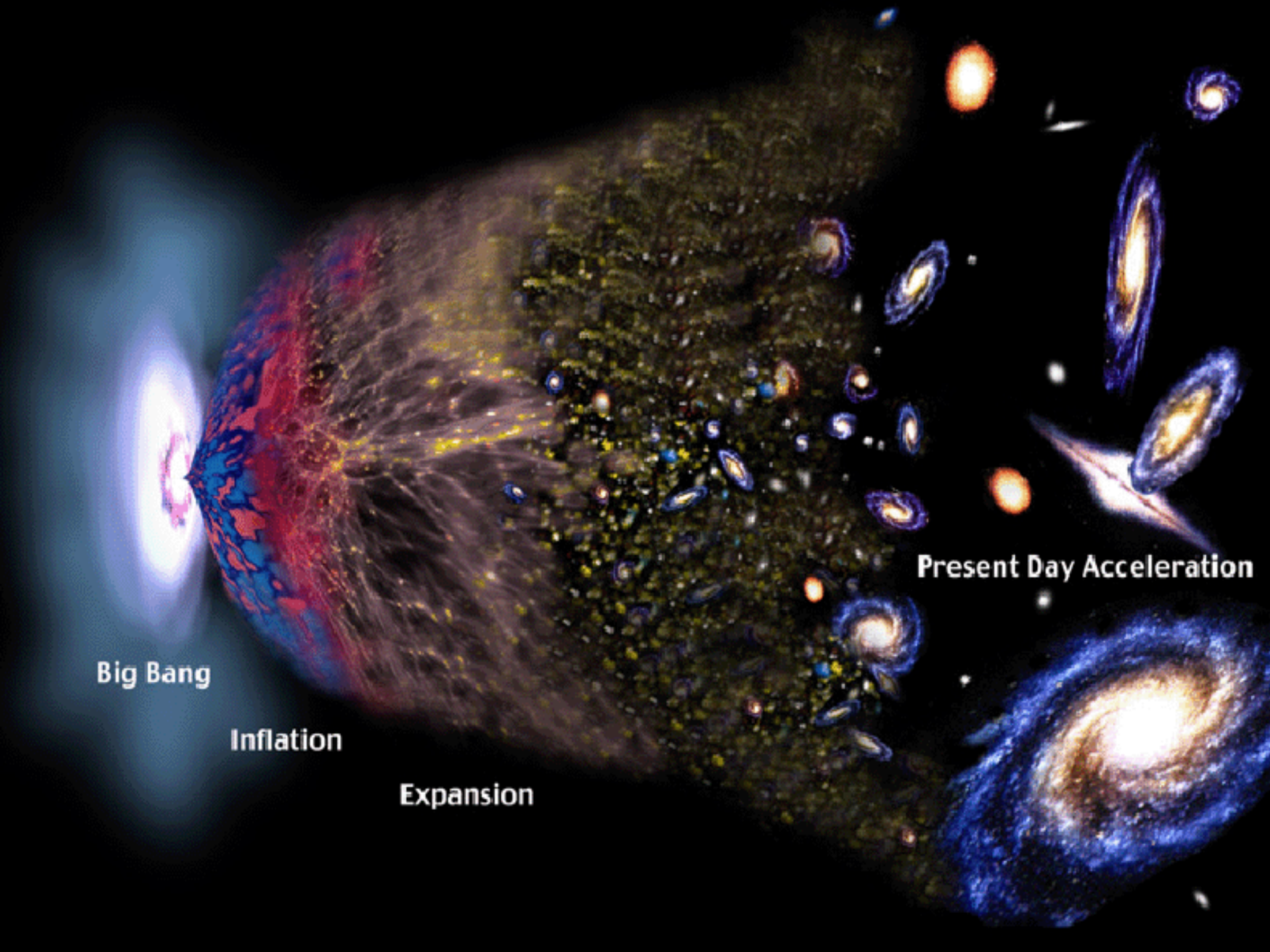


# 费米子“代”和“味道”之谜

为什么恰好有三代？  
为什么有不同的质量？  
CP 破坏问题？  
物质和反物质不对称



Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		



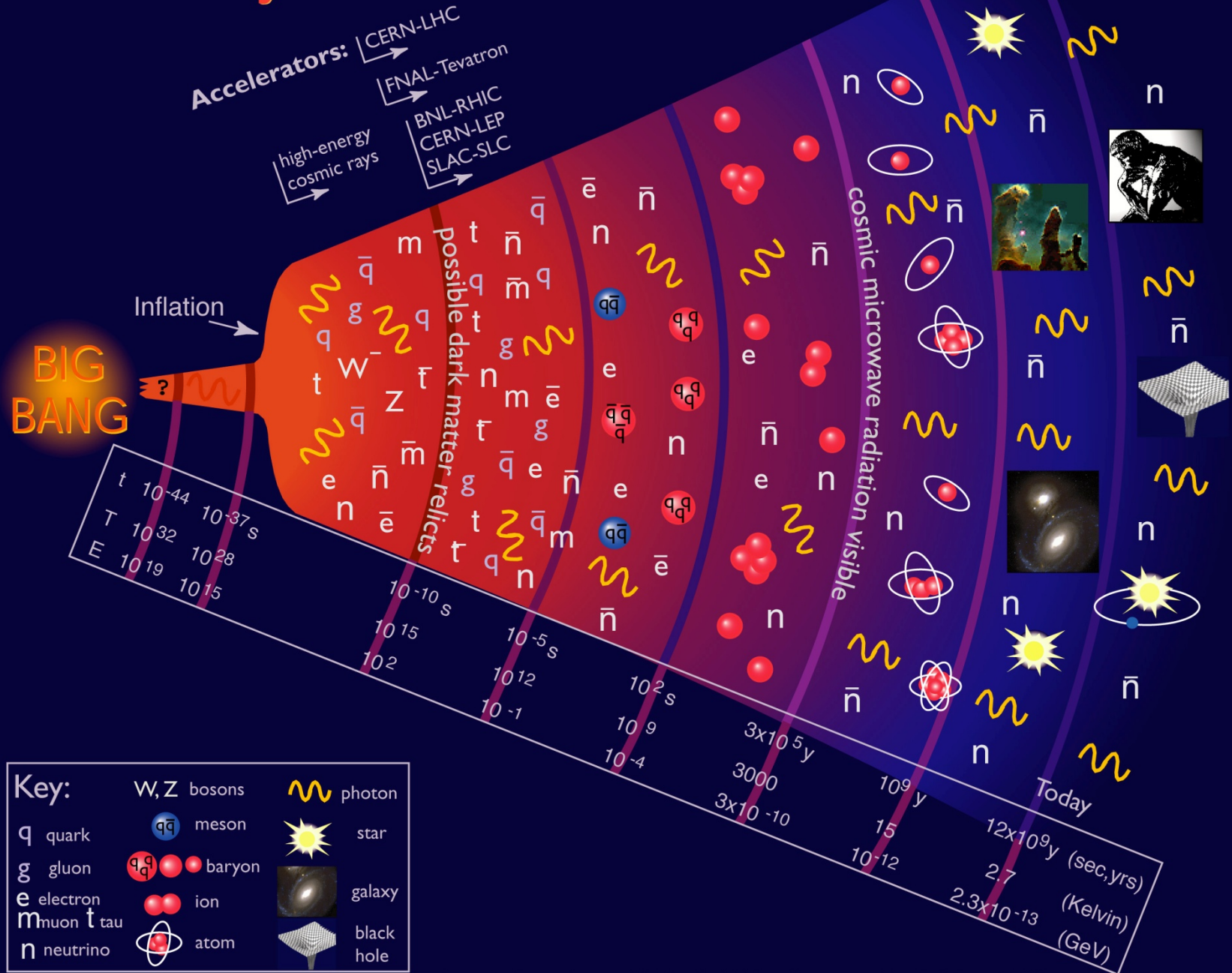
Big Bang

Inflation

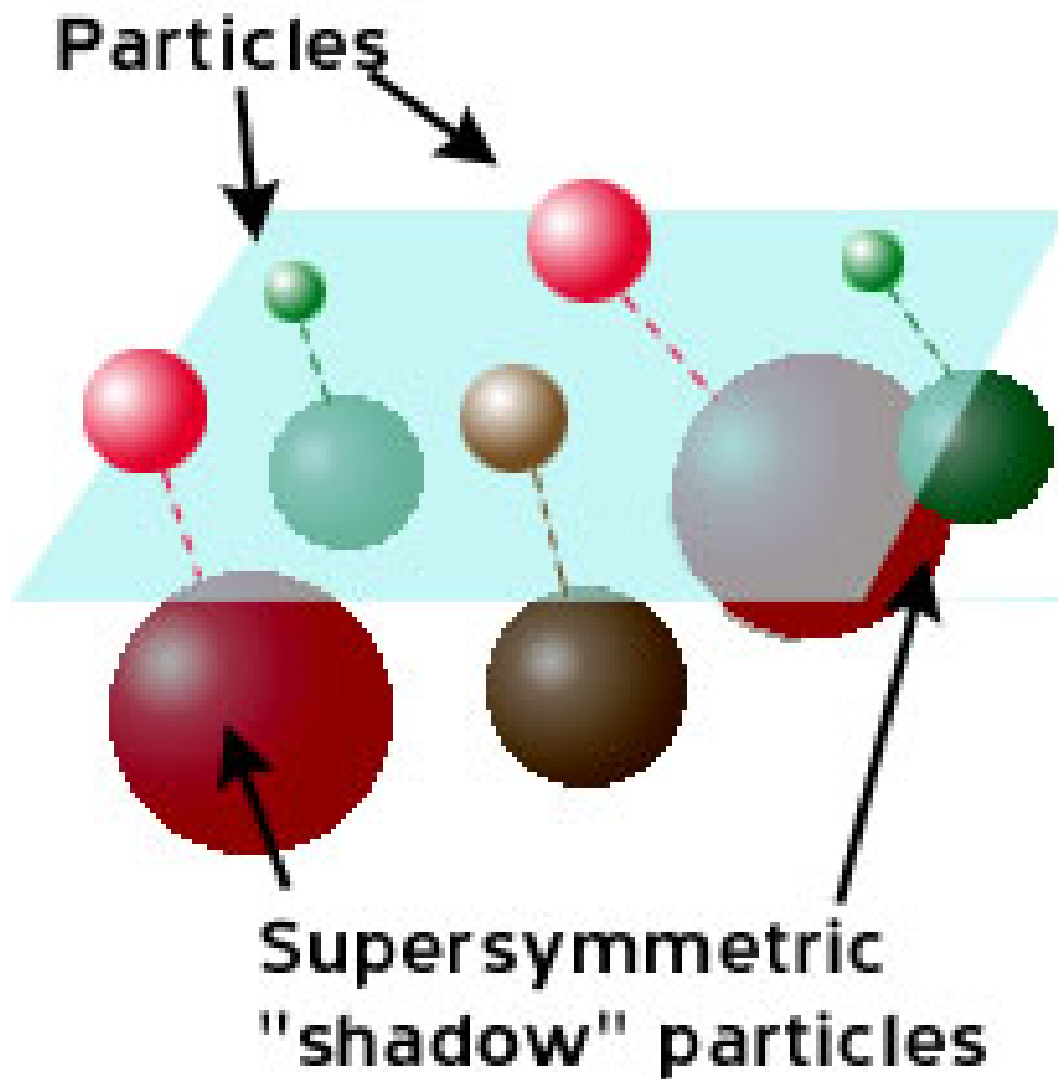
Expansion

Present Day Acceleration

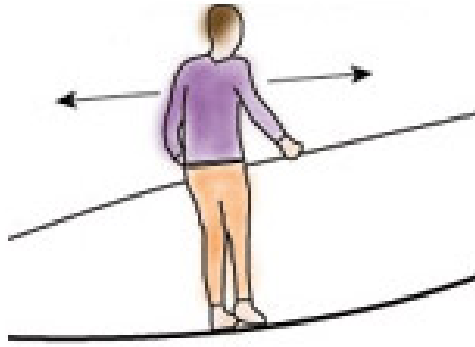
# History of the Universe



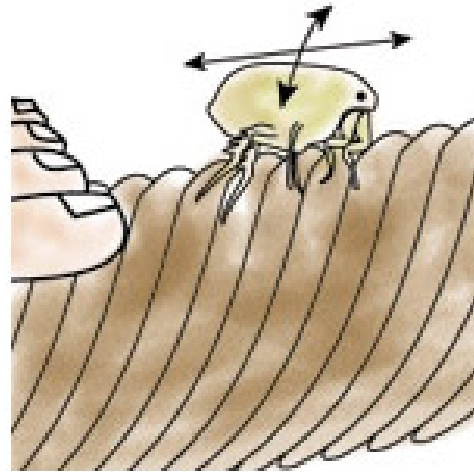
# 新物理方向 I: 超对称



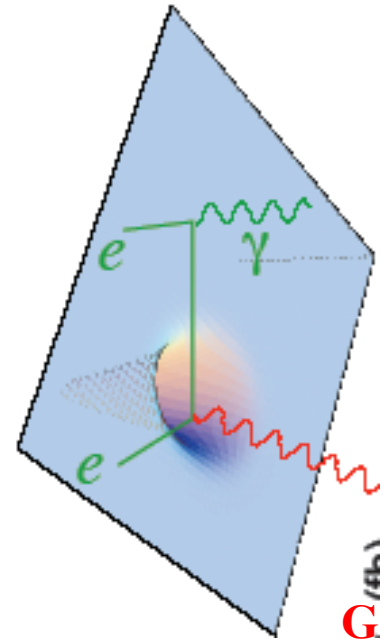
# 新物理方向 II：额外维空间



An acrobat can only move in one dimension along a rope..

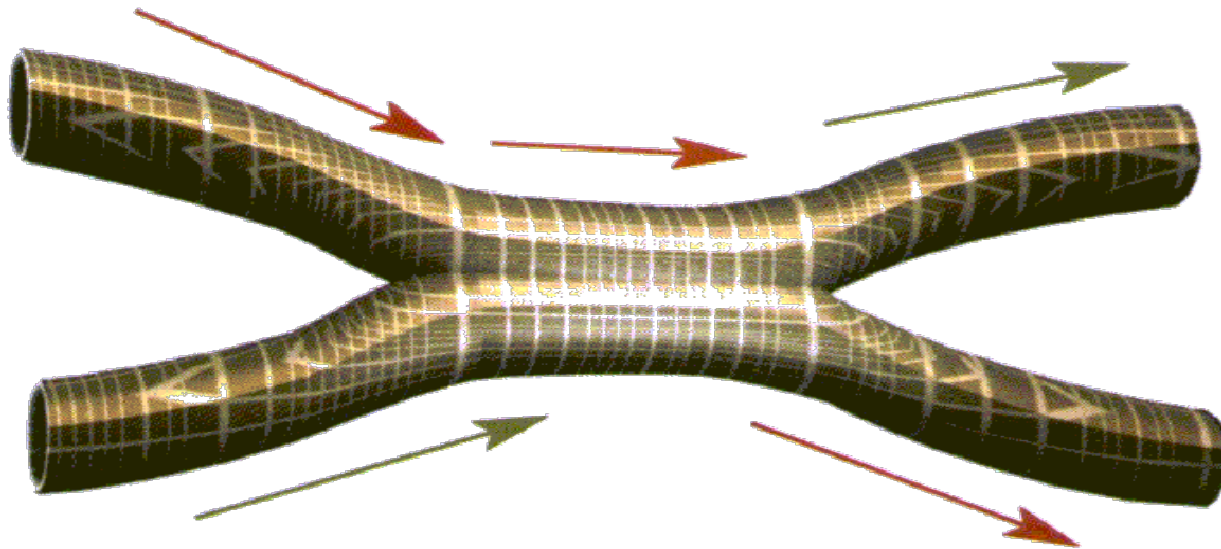


...but a flea can move in two dimensions.



# 统一引力：超弦理论

 string theory



“统一”



“统一”



atoms

planets apple

electric

magnetic

electromagnetism

Quantum mechanics

gravity mechanics



Special relativity

$\gamma$ -decay

GR

Quantum ElectroDynamics

$\beta$ -decay

Electroweak theory

Weak force

$\alpha$ -decay

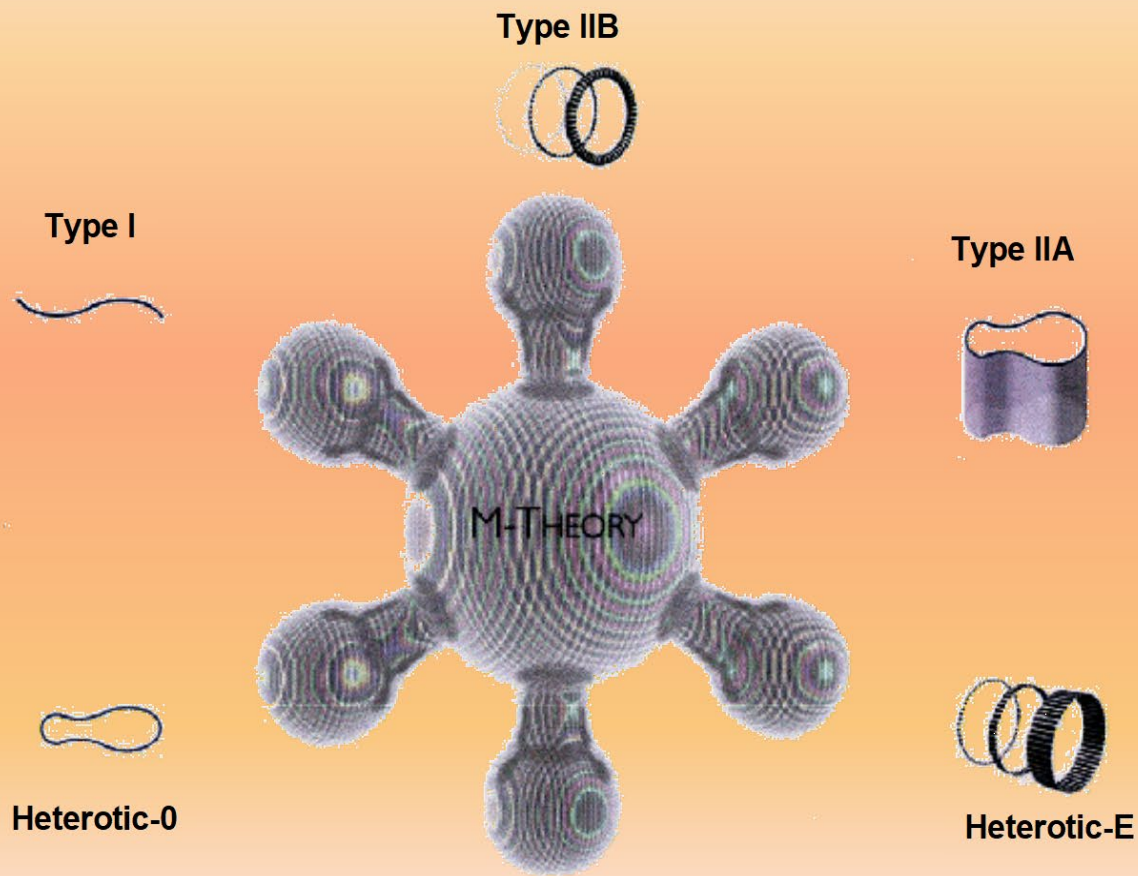
String theory?

Grand Unification?

Strong Force

# 最终理论:

# M theory



11 dimensional supergravity

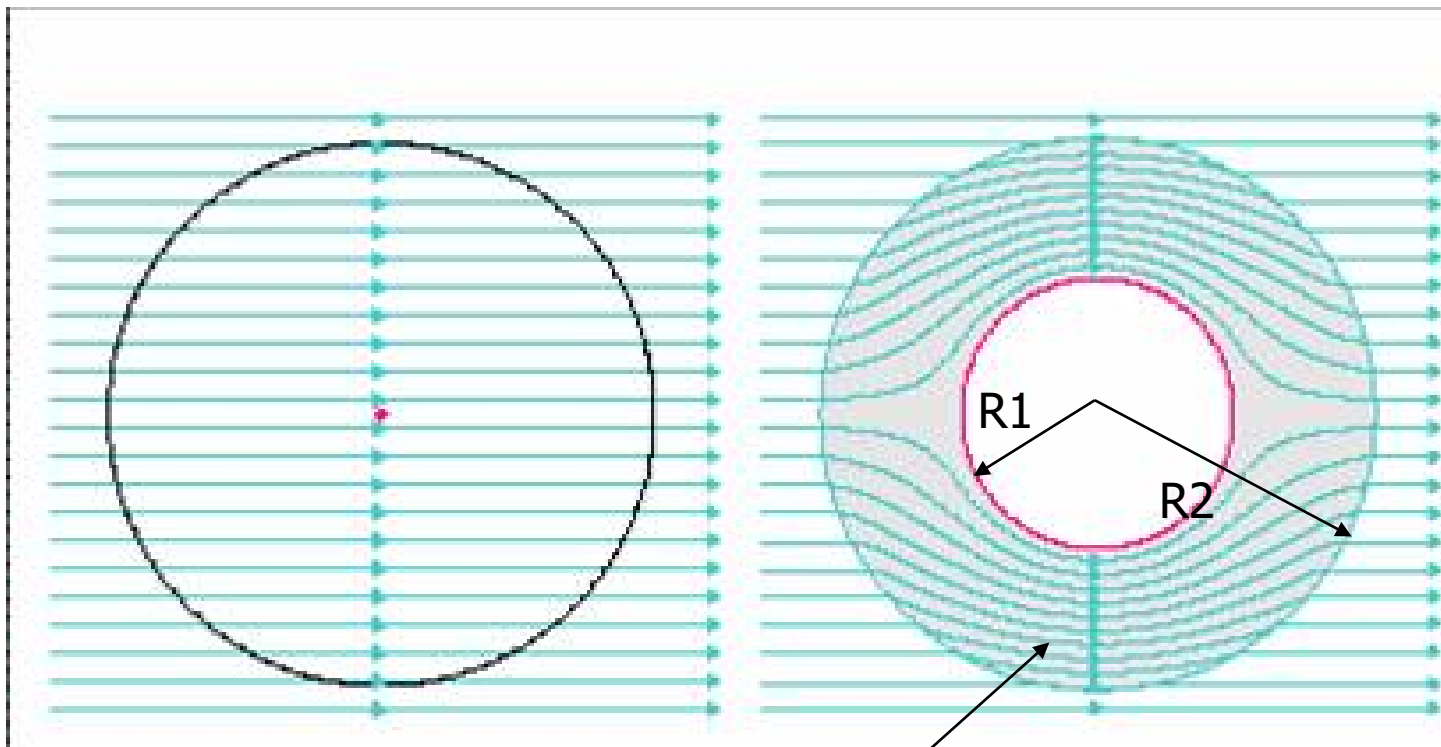




做不完的物理！

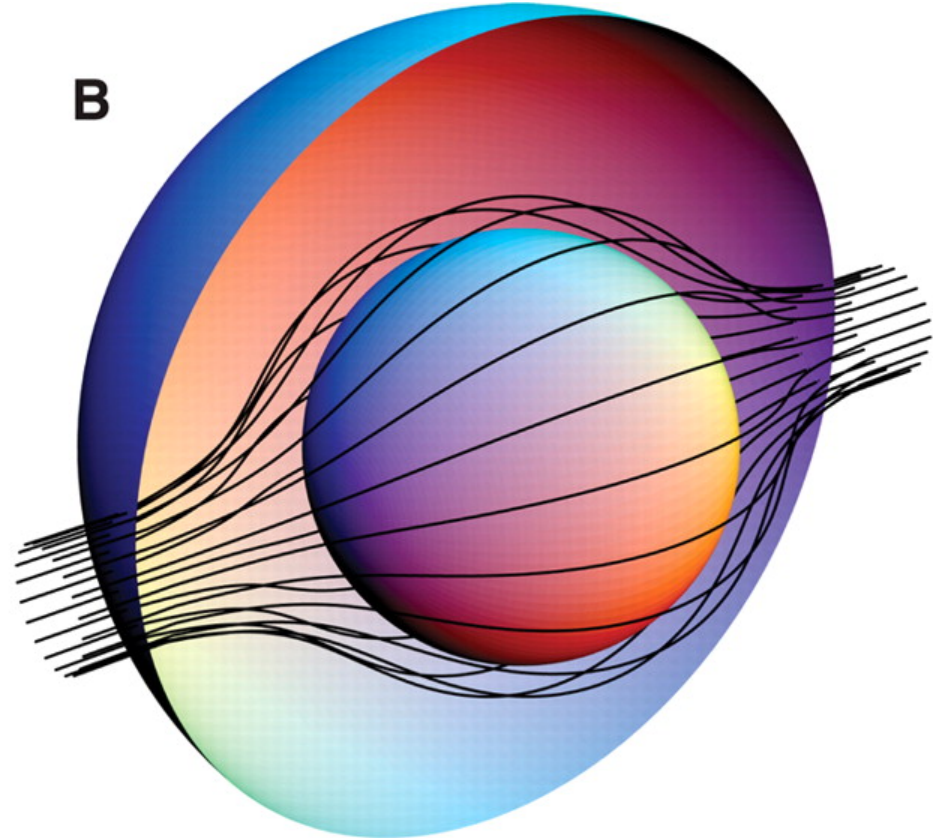
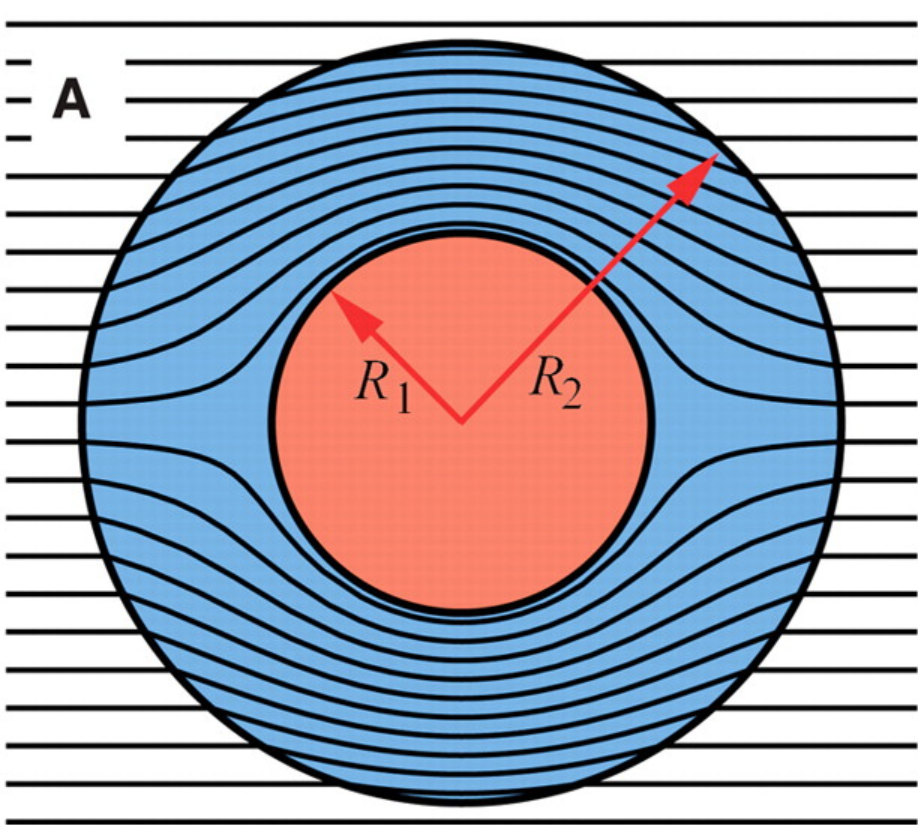


这是真的吗？



$$\varepsilon(\vec{r}), \mu(\vec{r})$$

从一点扩展到一个区域



$$r' = R_1 + \frac{R_2 - R_1}{R_2} r$$

$$\theta' = \theta$$

$$\phi' = \phi$$

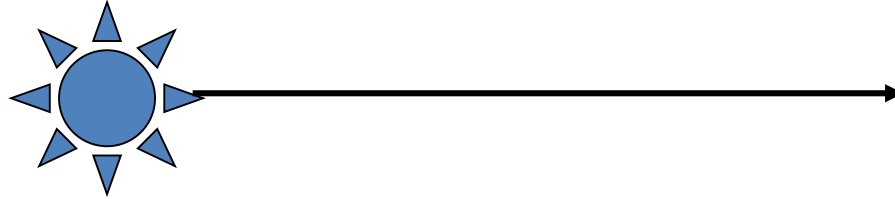
$$\epsilon'_{r'} = \mu'_{r'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \frac{(r' - R_1)^2}{r'^2}$$

$$\epsilon'_{\theta'} = \mu'_{\theta'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$

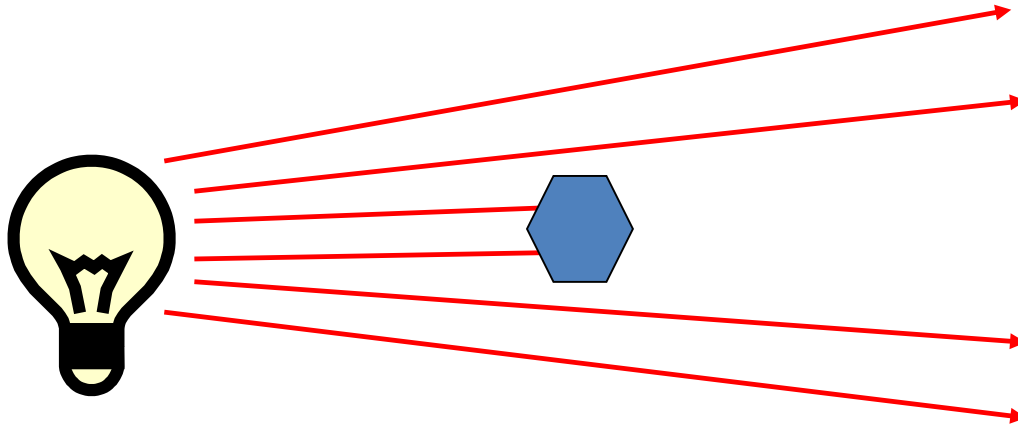
$$\epsilon'_{\phi'} = \mu'_{\phi'} = \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$

“看到”是指

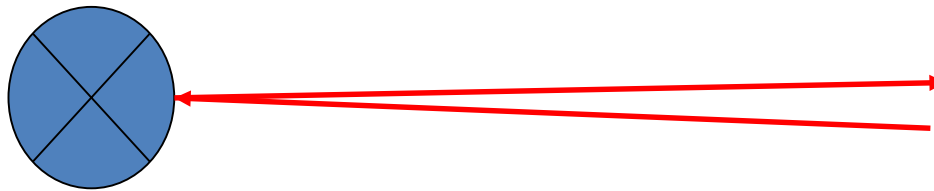
发光体



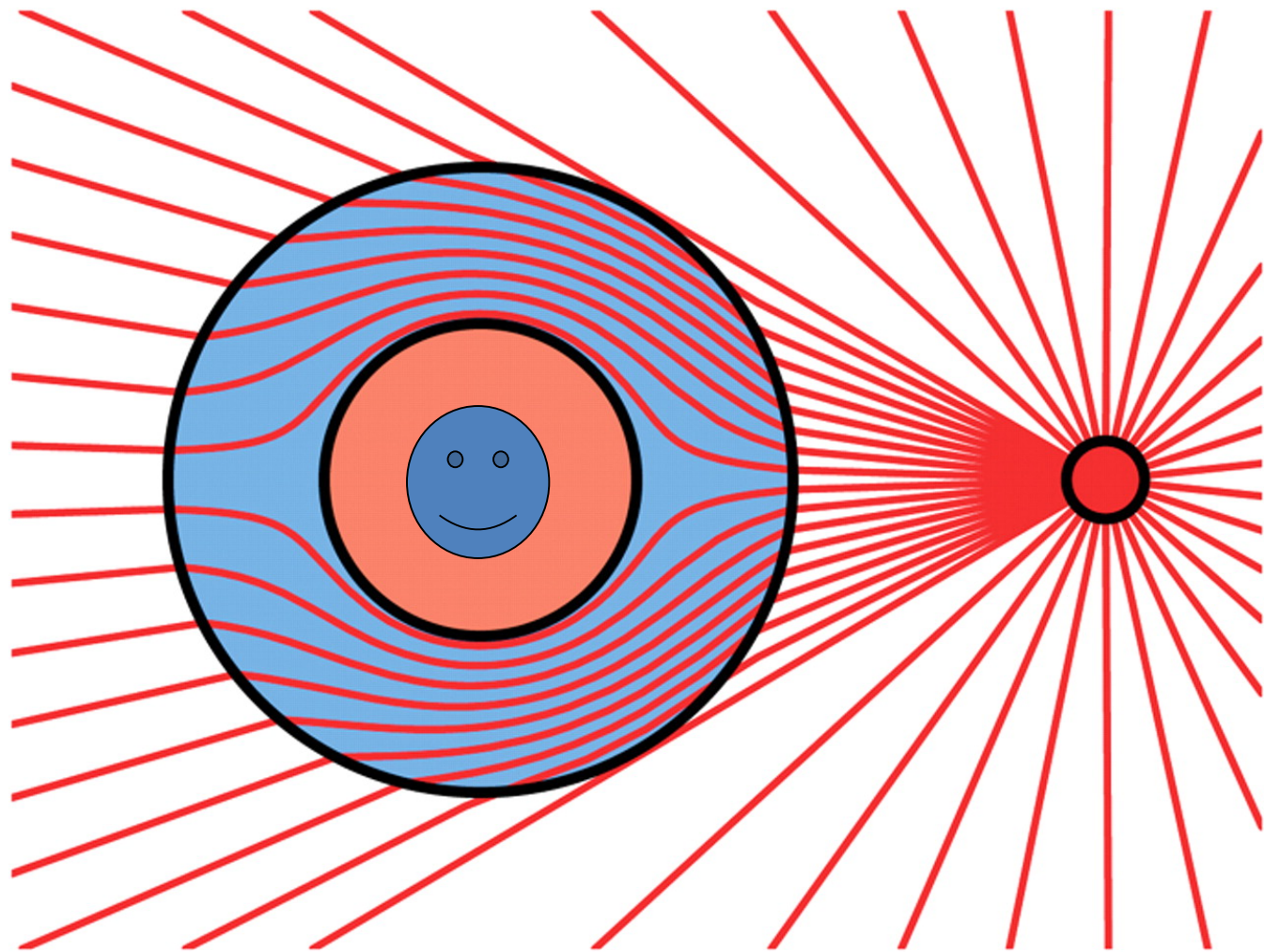
影子



反射

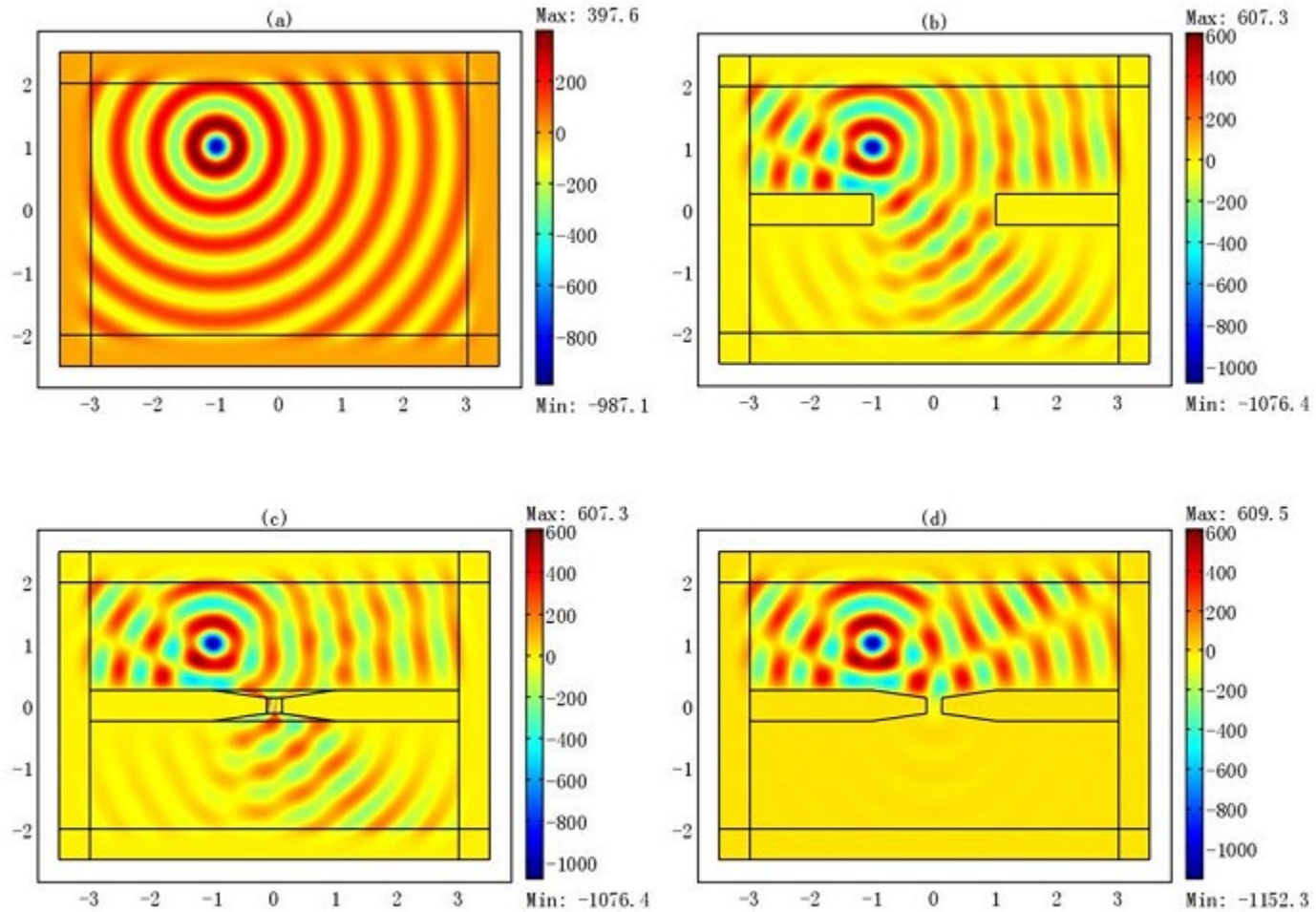


对于三种情况  
都能起到隐形  
作用

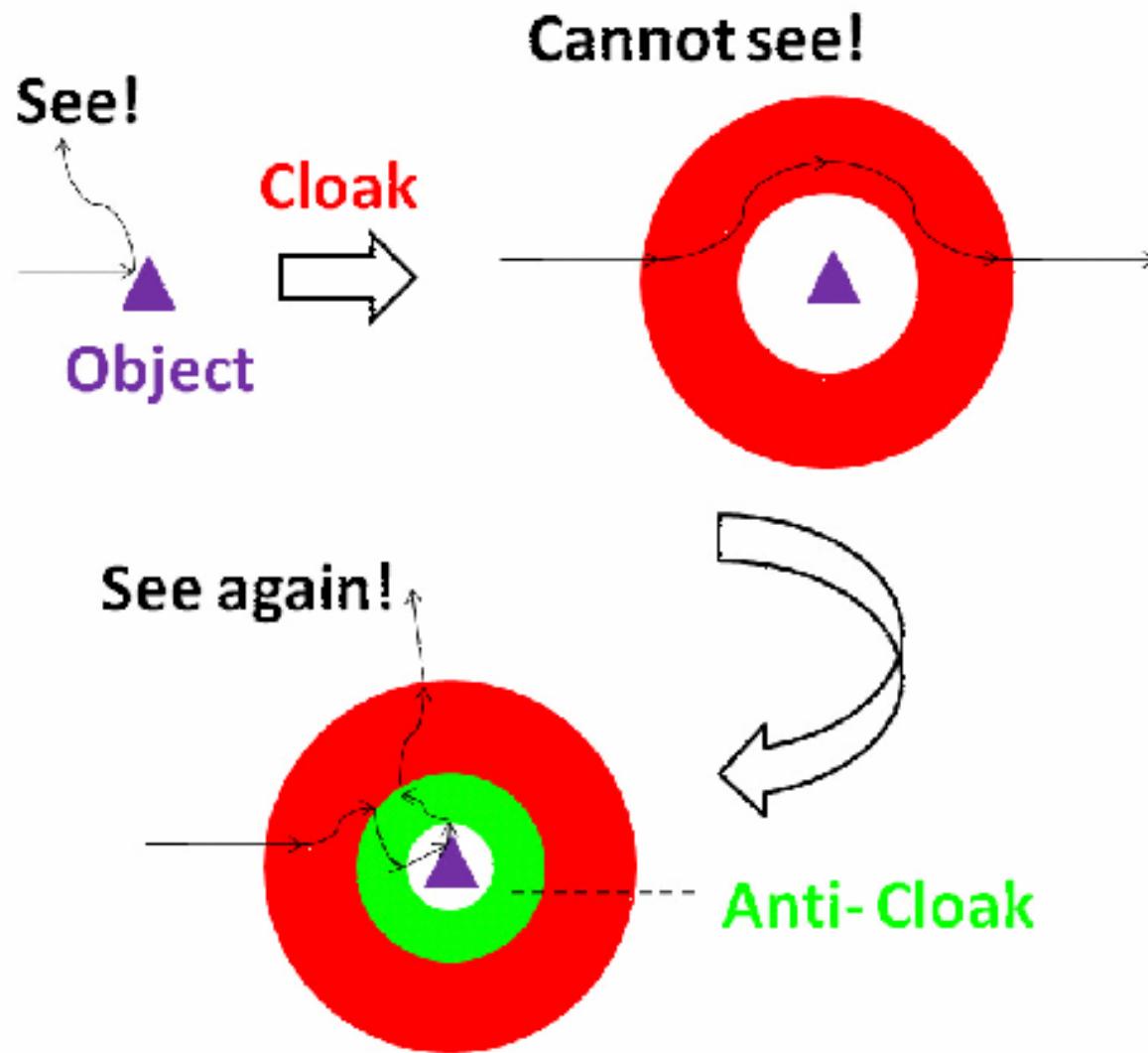


能否实现？

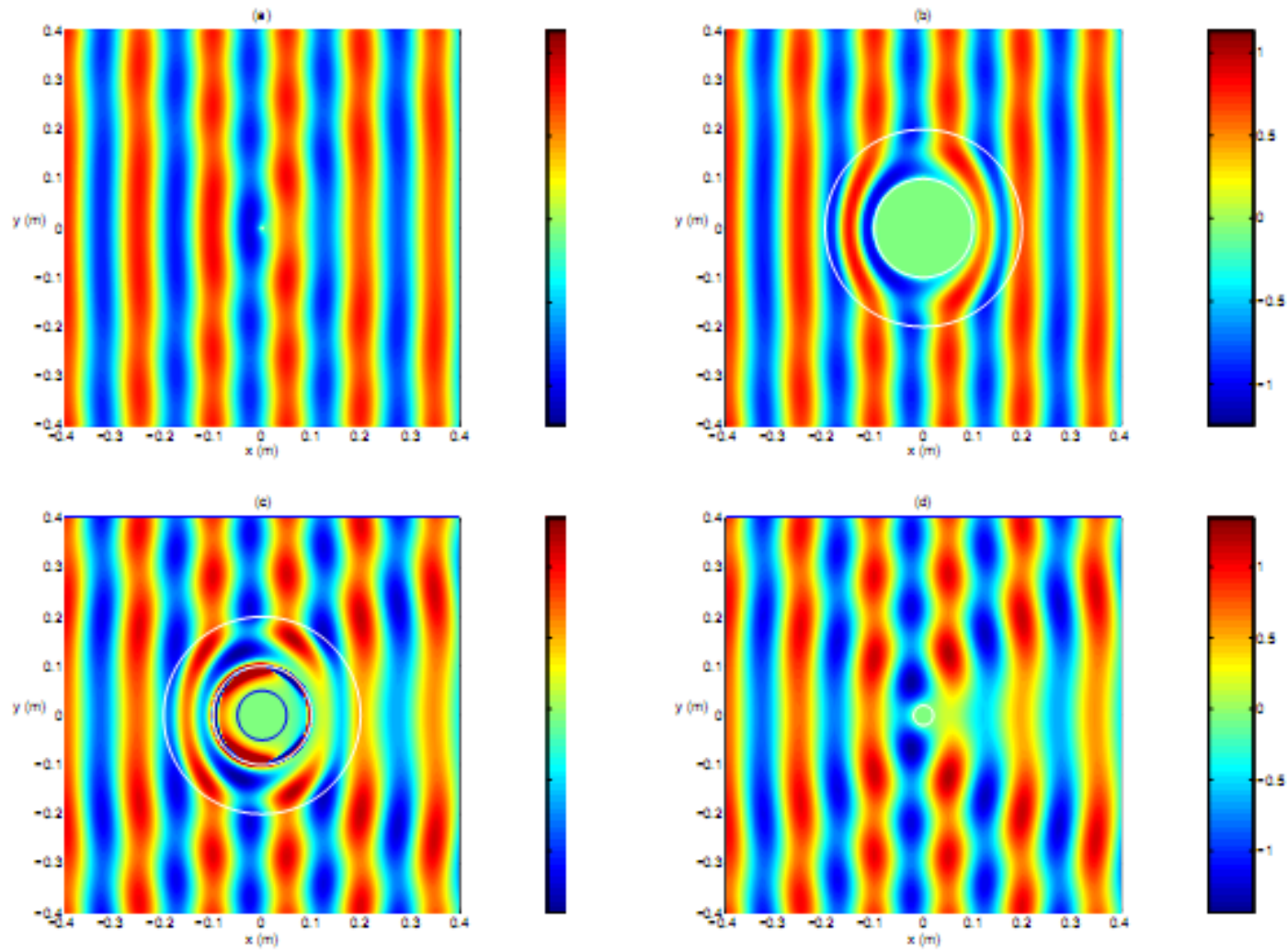
# 各种应用： 超级窗户



# 反隐身（反斗篷）

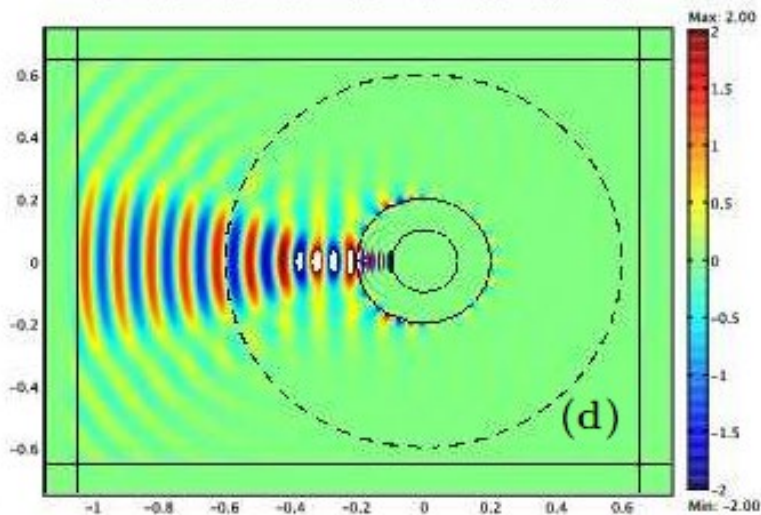
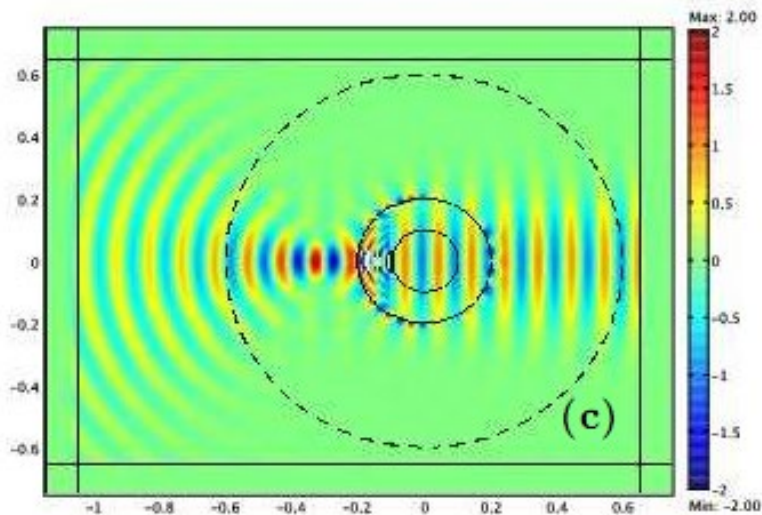
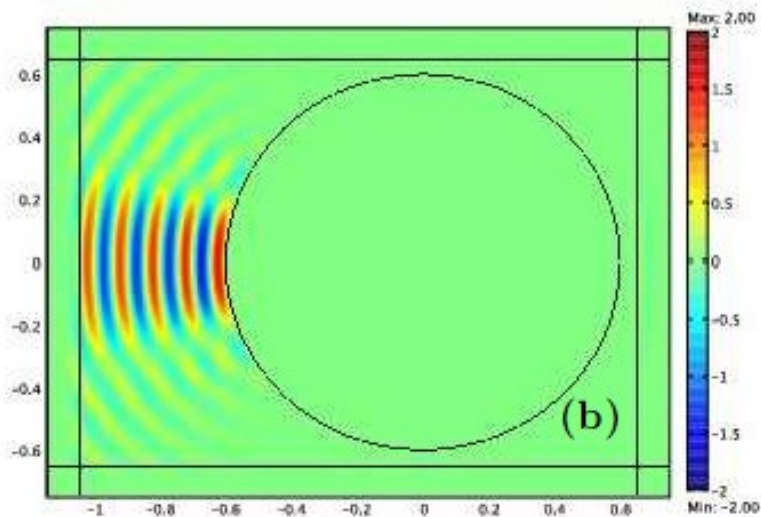
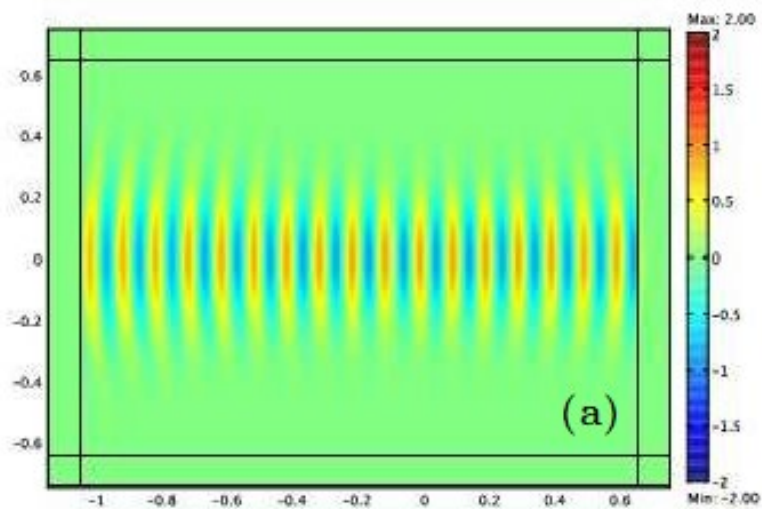








# 高斯光束



- 陈焕阳
- 苏州大学特聘教授

