



# 粒子物理和核物理实验方法 (1)

---

胡涛

高能物理研究所

Tel: 13520931678  
email: hut@ihep.ac.cn



# 本课主要内容

---

- 以核物理与粒子物理实验为背景，介绍各种探测器的基本概念和基础知识，包括：微观粒子与物质的相互作用和它们的探测原理。
- 介绍各种微观粒子探测器：气体探测器、半导体探测器、闪烁探测器、契伦柯夫探测器、气体多丝室、粒子探测系统、各种磁谱仪（高能磁谱仪和重离子磁谱仪）等的基本结构、工作原理、主要特性、种类和应用等。
- 探测器触发、刻度、重建、物理分析、物理结果诠释将在粒子物理和核物理实验方法（2）及相应课程中介绍



# 学习目的和意义

---

- 培养掌握各种粒子探测技术的专门人才。
- 了解掌握粒子与物质相互作用的物理过程和基本规律，会使用各种探测器。
- 掌握粒子测试系统的原理及组建。
- 掌握大型高能粒子探测谱仪的构成和工作原理。
- 会设计研发新的粒子探测器。



# 基本要求及评分标准

---

## 基本要求：

- 掌握核与粒子物理实验的基本概念，掌握粒子与物质相互作用的基本规律，各种粒子被探测的基本原理。
- 根据实验要求，会选择粒子探测器。
- 确定采用的探测方法和技术，设计粒子探测系统，并给出探测系统原理方框图。

## 评分标准

- 平时作业 30%
- 期末考试（闭卷） 70%



# 课程网站

---

- <http://www.ucas.ac.cn/>
- 课件下载
- 课程相关的通知



# 参考书目和学术刊物

---

- 汪晓莲等编：《粒子探测技术》 中国科大出版社
- 谢一冈等著：《粒子探测器与数据获取》，教育出版社
- 唐孝威主编：《粒子物理实验方法》，人民教育出版社
- **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**
- Chinese Physics C （高能物理与核物理）
- 核电子学与探测技术



# Online resources

---

Word-Wide-Web (WWW) (**invented at CERN!** )

- Particle Data Group: <http://pdg.lbl.gov/>
- The Particle Adventure:  
<http://www.particleadventure.org/>
- Archives: <http://xxx.lanl.gov/archive/>
- HEP search (spires database):  
<http://www.slac.stanford.edu/spires/>
- Wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Particle\\_physics](http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Particle_physics)

# 你问过这些问题吗？

---

- ◆ “世界是由什么构成的？”
- ◆ “是什么把这些基本元素绑在一起的？”
- ◆ “为什么这些基本元素能够稳定存在？”
- ◆ “是什么把最小的基本粒子与最大的宇宙给联系起来的？”
- ◆ “宇宙是有起源吗？如果有，它的归宿又是怎样？”



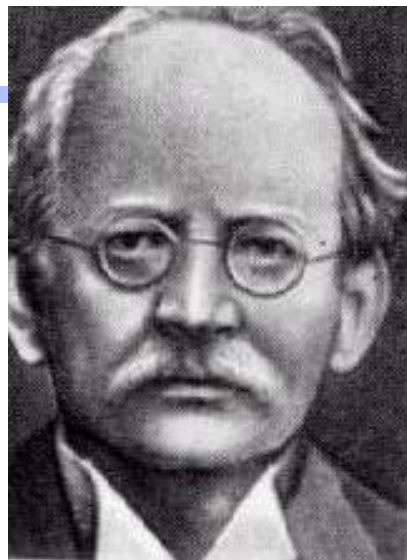
# 历史回顾

---

# 历史：电子的发现

## ◆ 1897年：真空管阴极射线实验：

- ◆ 带电粒子在电场以及磁场中运动都受到偏转  $\Rightarrow$  一种粒子的质量约为  $1/1700$  的原子质量、带负电荷：电子



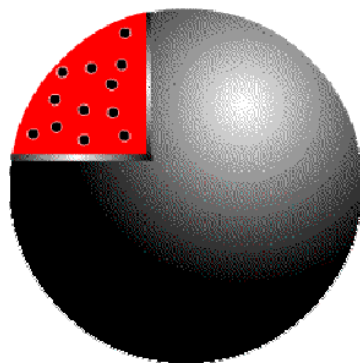
汤姆逊

J. J. Thomson

(英国)

## ◆ 原子结构：

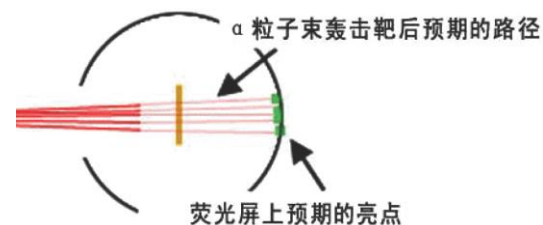
- ◆ 原子通常情况下不带电
- ◆ 电子是怎么待在原子里的？
- ◆ “葡萄干面包”的模型？



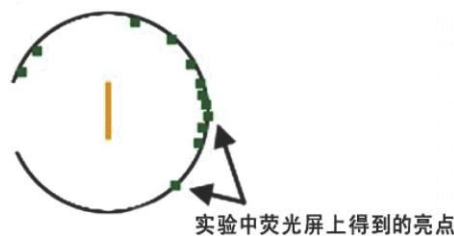
# 历史：原子核的发现

原子到底长什么样？

◆ 1911年：阿尔法粒子 ( $\alpha$ ) 轰击金箔的实验 “葡萄干面包” 的模



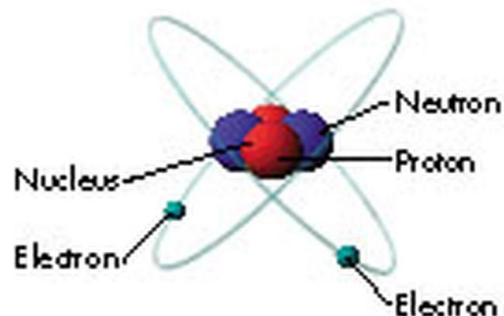
实验结果：



卢瑟福

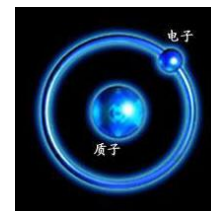
E. Rutherford  
(英国)

◆ 卢瑟福的原子核式模型



# 历史：质子与中子的发现

## 原子核到底长什么样？



卢瑟福

E. Rutherford

(英国)

◆1914年： $\alpha$  轰击的氢原子  
实验  $\Rightarrow$  质子

◆1932年：先用  $\alpha$  粒子轰击  
铍，再用铍产生的穿透力极  
强的射线轰击氢、氮

◆只有假定从铍中放出的射线  
是一种质量跟质子差不多的  
中性粒子，才能解释  $\Rightarrow$  中子



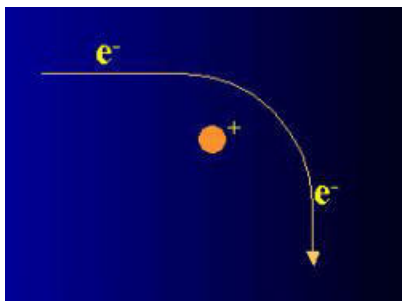
查德威克

J. Chadwick

(英国)

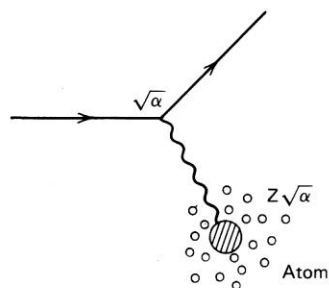
# 历史：质子与中子的内部结构

◆ 1957年：高能电子轰击质子实验



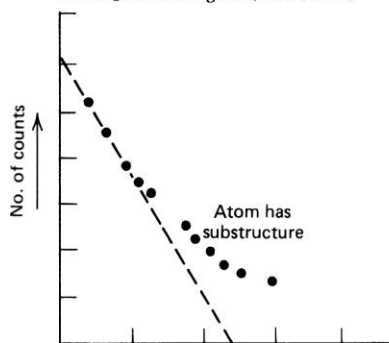
◆ 结论：质子的内部结构，它由更小的东西组成

◆ 夸克

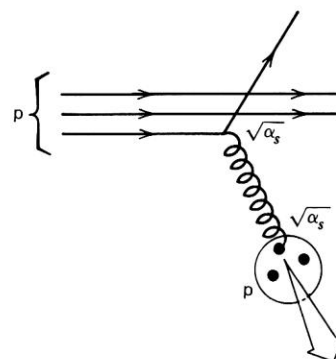


Probability  $Z^2 \alpha^2$   
(a)

Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)

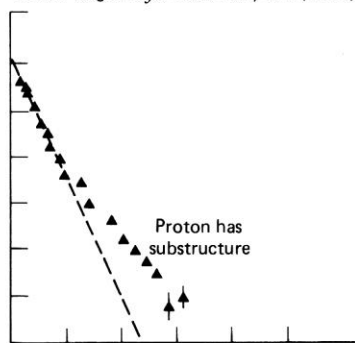


Atom has substructure



Probability  $\alpha_s^2$   
(b)

Proton target *Phys. Lett.* 46B, 471 (1973)



Proton has substructure

Transverse momentum  
or scattering angle

(c)

Fig. 1.10 (a) Inelastically scattered charged particle beam reveals the substructure of the atom. (b) Inelastically scattered proton beam reveals the quark structure of the proton target. (c) Experimental results.



霍夫斯塔特

R. Hofstadter

(美国)

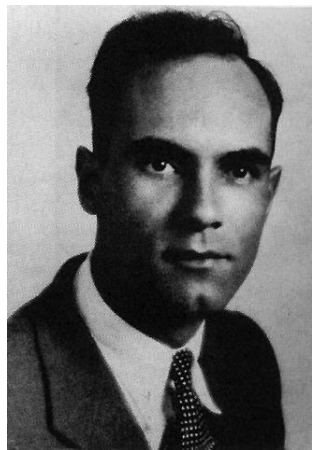


盖尔曼

Murray Gell-Mann

(美国)

# 历史：正电子的发现



安德森

C.D. Anderson

(美国)



◆ 1932年：发现了一个新粒子

◆ 质量与性质同电子几乎完全相同

◆ 电荷符号与电子相反

◆ 与电子成对产生

◆ 与电子相遇湮灭成光子

◆ 电子的反粒子：正电子

◆ 1928年：理论上曾预言



狄拉克

Paul Dirac

(英国)

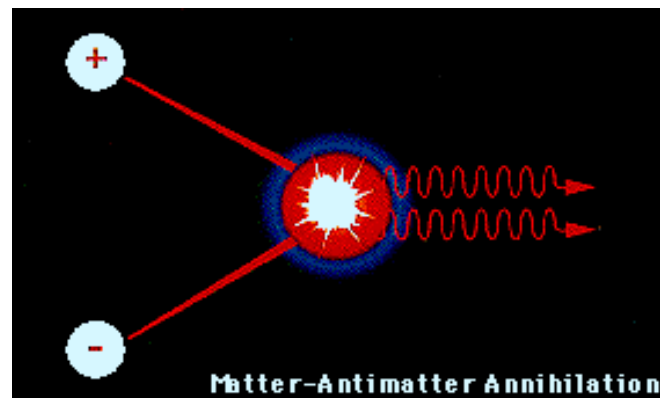


赵忠尧

(中国)

# 反物质

- ◆ 反质子、反中子、反夸克等反粒子相继在实验室中发现
- ◆ 1995年：欧洲核子研究中心（CERN）在实验室中合成了反氢原子：正电子 + 反质子
- ◆ 正反物质湮灭
  - ◆  $E=mc^2$
- ◆ 解决能源问题的终极方案？





# 历史：其它方面的发现

◆ 电子自旋的发现



◆ 原子核内的相互作用—强相互作用



◆ 更多夸克种类的发发现（夸克模型）



◆ 更多轻子的发现



◆ 弱相互作用理论



◆ 弱电统一理论



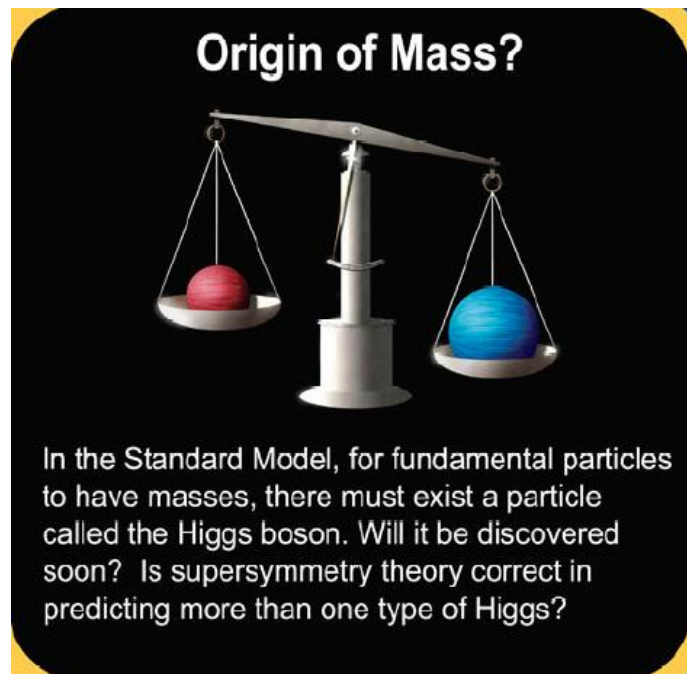
◆ 强相互作用理论—量子色动力学





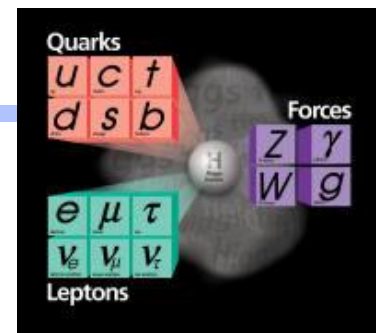
# Higgs粒子

- ◆ 物质的质量来源于基本粒子的质量及粒子之间的结合能
- ◆ 标准模型：
  - ◆ 基本粒子没有质量
  - ◆ 质量来源于该粒子与希格斯粒子的相互作用
- ◆ 大型强子对撞机已经发现，标准模型希格斯粒子？
- ◆ 对称性自发破缺机制 $\Rightarrow$ 基本粒子质量



希格斯  
Peter Higgs  
(英国)

# 标准模型



- ◆ 创建于上世纪60年代
- ◆ 描述了物质的基本组成单元及之间的相互作用
- ◆ 在非常高的精度内，包容了目前几乎所有观测到的实验现象
- ◆ 许多预言已经被实验所验证
- ◆ 是一个非常成功的理论

# 小结

## ◆ 物质结构的基本组成

### ◆ 12种基本组成单元 (12种粒子及其反粒子)

◆ 3代6种夸克 (顶夸克、底夸克)

◆ 3代6种轻子 (没有强相互作用)

## ◆ 基本粒子之间的相互作用

◆ 强相互作用—核力 (胶子 $g$ , QCD)

◆ 弱相互作用—斥力 ( $W, Z$ )  $\Rightarrow$  宇宙的多样性, 正反物质的不对称性...

◆ 电磁相互作用 (光子 $\gamma$ )

◆ 引力

## ◆ 基本粒子的描述

◆ 四动量 $\Rightarrow$ 运动学特性

◆ 位置坐标、时间

◆ 对称性 $\Rightarrow$ 电荷、自旋、宇称、同位旋...

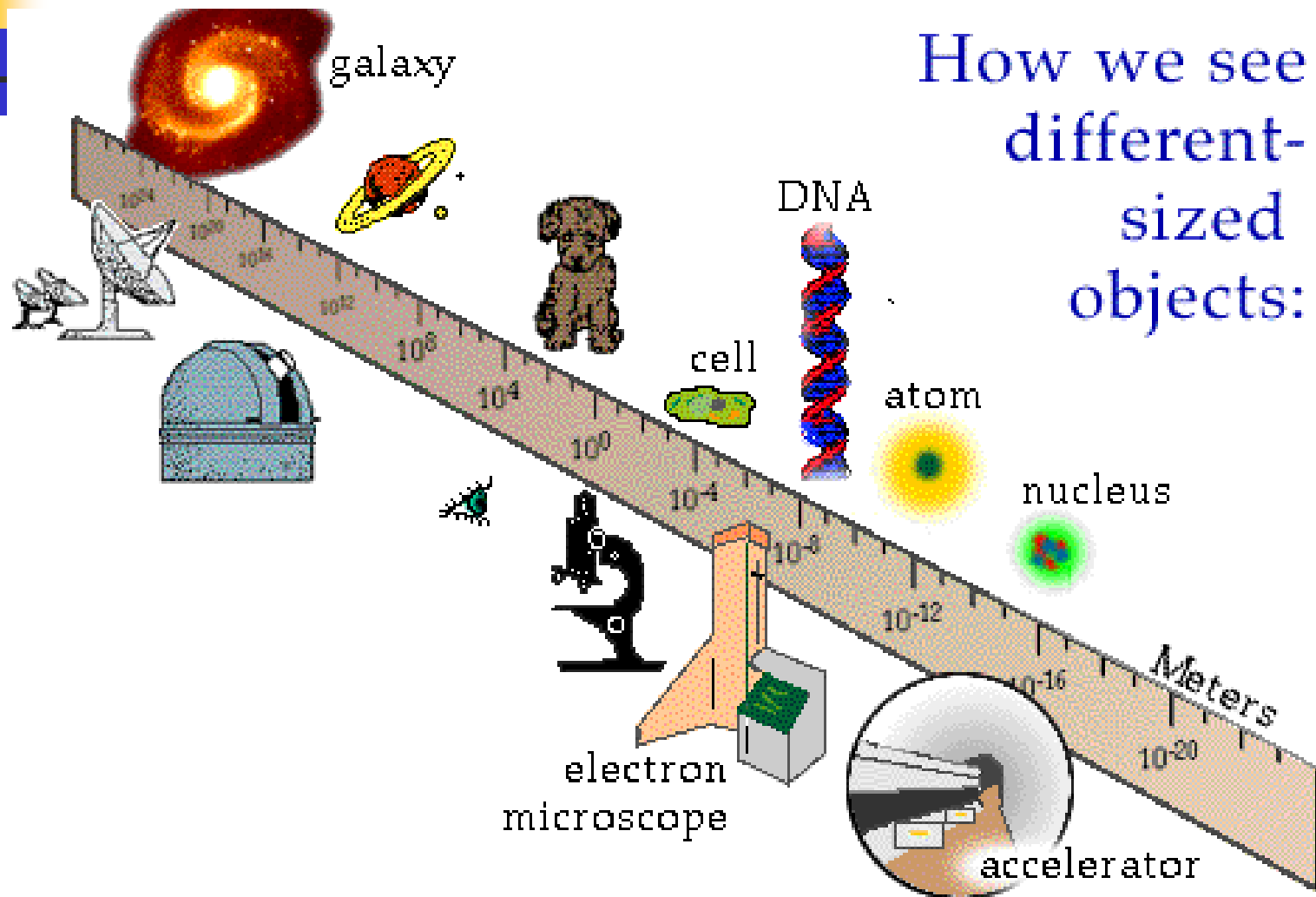


# “小宇宙”和“大宇宙”

---

- 近百年来，人类的认识逐渐达到原子、原子核、核子、夸克这几个层次，对其观测的尺度已从 $10^{-8}$ 到 $10^{-15}$ 厘米。作为人类周围星体世界的大宇宙，从太阳系、银河系、直到河外系，人们观测的尺度已大到 $6 \times 10^7$ 光年距离。在地球上观察到宇宙中存在高能基本粒子，也包括能量范围极宽的电磁辐射光子，其能量由 $10^{-4}$ 电子伏特（宇宙背景辐射）到 $10^{20}$ 电子伏特的硬 $\gamma$ 射线，而可见光光子只在大约1.6-3.2电子伏特的很小的一段范围内。宇宙本身已逐步成为研究粒子物理的实验室。人类对无限小和无限大世界的研究也已经逐步有机地结合起来。

# 客体尺度与观测手段





# 粒子物理实验

---

- 粒子物理实验包括：
  1. 粒子源（加速器/对撞机，宇宙线）
  2. 探测器
    - ✓ 探测器本体
    - ✓ （前端、后端）电子学
  3. 数据分析

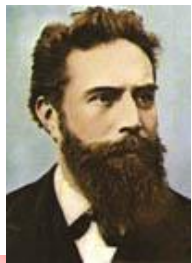


# 粒子探测器

我们生活的宏观世界被大量的微观粒子所包围：

- 来自地球表面的各种放射性，如  $^{40}\text{K}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{235}\text{U}$
  - 来自宇宙（太阳、银河系）的宇宙线（ $\mu$ 、 $\nu$ ）
  - 来自加速器和人工放射源的各种能量、不同种类的粒子和射线
- 
- 为了测量粒子和射线的基本性质，研究这些粒子之间的相互作用以及它们与宏观物质的相互作用
  - 为了将这些粒子与射线作为微小的探针来研究微观和亚微观结构，如：晶体结构、物质的表面结构、分子原子及核结构等
  - 为了通过这些粒子或射线来研究我们达不到的各种天体，如地球的深处、太阳的内部、月亮或银河以外、更遥远的天体
  - 为了使粒子和射线在工业、农业、矿山、地质、医疗、环保、航天等领域被广泛地应用，不可替代地获得对宏观物质的形态、结构、成分的测量和研究

发明和发展了各种辐射和粒子探测器，并由此产生了新的学科、新的技术、新的产业。



# 粒子探测器的发展史

- 高能物理实验研究需要粒子加速器和探测器及其它设备。加速器将微小带电粒子加速到非常高的能量，速度接近光速，然后打到固定的靶上或彼此对撞，以研究物质深层次的结构。探测器用来探测碰撞产生的微小粒子，记录各种信息，如粒子径迹、衰变产物、飞行时间、粒子动量、能量、质量等。粒子探测器的发展史正是人类对物质世界的认识不断深化和实验同理论不断相互促进的历史。
- **1590年**和**1609年**先后出现的**显微镜**和**望远镜**使人们得以在两个尺度方面超出了肉眼范围，它们正是人类首先使用的可见光探测器，它们开始使人类对“小宇宙”和大宇宙的探索逐步走上现代实验科学的轨道。
- **1895年**德国物理学家伦琴在无可见光条件下发现胶片感光从而发现**X射线**和**1896年**法国物理学家贝克勒尔由钾铀硫酸盐使感光片变黑的现象发现了 **$\beta$ 射线**可以作为粒子探测器历史的开端。



# 粒子探测器的发展史



- **1911**年英籍新西兰物理学家卢瑟福借助显微镜观察到单个 $\alpha$ 粒子在硫化锌上引起发光。这正是闪烁计数器的雏形。**1919**年他用类似的荧光屏探测器第一次观察到用 $\alpha$ 粒子轰击氮产生氧和质子的人工核反应，由此核物理迅速发展起来。
- 核物理和宇宙线的发展反过来又带动了各种探测器的发展。本世纪二十年代到六十年代出现了核乳胶，云雾室，火花室，流光室等径迹探测器以及电离室，正比与盖格计数管和闪烁计数器等电子学探测器。新粒子的发现往往借助于当时的新型探测器，例如**1932**年和**1936**年用云雾室先后发现了正电子和 $\mu$ 介子，**1939**年用电离室发现核裂变现象，**1954**年用气泡室发现 $\Sigma^0$ 超子，**1961**年用火花室发现 $\mu$ 中微子等。值得提出的是以我国科学家为主于**20**世纪**50**年代利用气泡室发现了反 $\Sigma$ -超子。



# 粒子探测器的发展史

**20世纪50年代**以来，由于研究进入核子夸克层次，要求轰击粒子的能量更高，这时期逐渐从原子核物理发展出高能物理(粒子物理)，它也包括不用加速器的宇宙线物理。利用高能量和高粒子束流强度的加速器（或对撞机），高能物理实验要求快速地记录愈来愈复杂的高事例率事例。由于径迹探测器记录事例速度慢且后处理需要大量人工，例如用云雾室记录一次需要几分钟，而电子学探测器如有机闪烁体计数器单粒子计数率可高达 $10^9$ 次/秒，这样，在粒子发现史上起过重要作用的径迹探测器就逐渐让位于电子学探测器。

- **60年代末至80年代初**，同多路电子学配合使用的多丝正比室、漂移室、多种电磁和强子量能器和标准快电子学插件**NIM**系统及**CAMAC**总线系统迅速发展起来。加以电子学技术和计算机的飞速发展，数据获取和事例重建和显示的速度大大提高，出现了各种用于固定靶和对撞机的大型综合多粒子谱仪及非加速器宇宙线实验的大型电子学探测器阵列。许多新粒子和新现象的发现都是利用它们得到的。例如，**1974**年发现的 **$J/\psi$** 粒子和**1976**年发现的 **$\tau$** 粒子以及**1983**年发现的中间玻色子**W**和**Z<sup>0</sup>**等。
- 这些年来在这一领域有多位科学家获得了诺贝尔奖，有力地说明了粒子探测器对科学发展所起的重要作用以及理论的发展基于实验这一基本观点。



# 六位获诺贝尔奖的粒子探测器大师

---

- **C.T.R.Wilson** 发明云室，一种观测带电粒子径迹的方法和技术（**1927年**）
- **P.M.S.Blackett** 发展**Wilson**云室技术，在核物理与宇宙线研究中做出贡献（**1948年**）
- **C.F.Powell** 发明乳胶技术，在宇宙线中 $\pi$ 介子（**1950年**）
- **D.A.Glaser** 发明气泡室（**1960年**）
- **L.W.Alvarez** 发展气泡室及数据处理技术，发现大量共振态（**1968年**）
- **G.Charpak**发明多丝正比室并发展气体丝室技术（**1992年**）



# 粒子探测器大家族

---

- 粒子探测器是核物理、粒子物理研究及辐射应用中不可缺少的工具和手段。当粒子和探测器内的物质相互作用而产生某种信息（如电、光脉冲或材料结构的变化），经放大后被记录、分析，以确定粒子的数目、位置、能量、动量、飞行时间、速度、质量等物理量。
- 按照记录方式，粒子探测器大体上分为
  - ✓ 计数器类：以电脉冲的形式记录、分析辐射产生的某种信息。
  - ✓ 径迹室类：通过记录、分析辐射产生的径迹图象测量核辐射。



# 计数器类探测器

- 气体电离探测器——通过收集射线在气体中产生的电离电荷来测量核辐射。主要类型有电离室、正比计数器和盖革计数器。它们的结构相似，一般都是具有两个电极的圆筒状容器，充有某种气体，电极间加电压，差别是工作电压范围不同。电离室工作电压较低，直接收集射线在气体中原始产生的离子对。其输出脉冲幅度较小，上升时间较快，可用于辐射剂量测量和能谱测量。正比计数器的工作电压较高，能使在电场中高速运动的原始离子产生更多的离子对，在电极上收集到比原始离子对要多得多的离子对（即气体放大作用），从而得到较高的输出脉冲。脉冲幅度正比于入射粒子损失的能量，适于作能谱测量。盖革计数器又称盖革-弥勒计数器或**G-M**计数器，它的工作电压更高，出现多次电离过程，因此输出脉冲的幅度很高，已不再正比于原始电离的离子对数，可以不经放大直接被记录。它只能测量粒子数目而不能测量能量，完成一次脉冲计数的时间较长。



# 计数器类探测器

- 多丝室和漂移室——是正比计数器的变型。既有计数功能，还可以分辨带电粒子经过的区域。多丝室有许多平行的电极丝，处于正比计数器的工作状态。每一根丝及其邻近空间相当于一个探测器，后面与一个记录仪器连接。因此只有当被探测的粒子进入该丝邻近的空间，与此相关的记录仪器才记录一次事件。为了减少电极丝的数目，可从测量离子漂移到丝的时间来确定离子产生的部位，这就要有另一探测器给出一起始信号并大致规定了事件发生的部位，根据这种原理制成的计数装置称为漂移室，它具有更好的位置分辨率（达**50**微米），但允许的计数率不如多丝室高。
- 半导体探测器——辐射在半导体中产生的载流子（电子和空穴），在反向偏压电场下被收集，由产生的电脉冲信号来测量核辐射。常用硅、锗做半导体材料。

高纯锗探测器有较高的能量分辨率，对 $\gamma$ 辐射探测效率高，可在室温下保存，应用广泛。砷化镓、碲化镉、碘化汞等材料也有应用。



# 计数器类探测器

- **闪烁计数器**——通过带电粒子打在闪烁体上，使原子（分子）电离、激发，在退激过程中发光，经过光电器件（如光电倍增管）将光信号变成可测的电信号来测量核辐射。闪烁计数器分辨时间短、效率高，还可根据电信号的大小测定粒子的能量。闪烁体可分为三大类：
  - 无机闪烁体，常见的有用铊(**Tl**)激活的碘化钠**NaI(Tl)**和碘化铯**CsI(Tl)**晶体，它们对电子、 $\gamma$ 辐射灵敏，发光效率高，有较好的能量分辨率，但光衰减时间较长；锗酸铋晶体密度大，发光效率高，因而对高能电子、 $\gamma$ 辐射探测十分有效。其他如用银 (**Ag**)激活的硫化锌**ZnS(Ag)**主要用来探测 $\alpha$ 粒子；玻璃闪烁体可以测量 $\alpha$ 粒子、低能 $X$ 辐射，加入载体后可测量中子；氟化钡(**BaF<sub>2</sub>**)密度大，有荧光成分，既适合于能量测量，又适合于时间测量。
  - 有机闪烁体，包括塑料、液体和晶体(如蒽、芪等)，前两种使用普遍。由于它们的光衰减时间短（**2~3**纳秒，快塑料闪烁体可小于**1**纳秒），常用在时间测量中。它们对带电粒子的探测效率将近百分之百。
  - 气体闪烁体，包括氙、氦等惰性气体，发光效率不高，但光衰减时间较短（<**10**纳秒）。





# 计数器类探测器

---

- **切伦科夫计数器**——高速带电粒子在透明介质中的运动速度超过光在该介质中的运动速度时，则会产生切伦科夫辐射，其辐射角与粒子速度有关，因此提供了一种测量带电粒子速度的探测器。此类探测器常和光电倍增管配合使用；可分为阈式(只记录大于某一速度的粒子)和微分式(只选择某一确定速度的粒子)两种。
- **穿越辐射计数器**——高速带电粒子穿过两种介质的界面会产生穿越辐射，其辐射能量与粒子能量成正比。在粒子速度极高，十分接近光速时，用飞行时间和契伦科夫计数器都无法通过分辨速度来鉴别粒子，而穿越辐射计数器提供了鉴别该能区高能粒子的新方法。





# 计数器类探测器

- **电磁量能器**（或簇射计数器）——高能电子或 $\gamma$ 光子在介质中会产生电磁簇射，其次级粒子总能量损失与入射粒子总能量成正比。因此，一旦收集到总能量损失即可确定粒子的总能量。电磁量能器分为全吸收型如碘化钠（铯）、锗酸铋、铅玻璃等和取样型两种。后者由取样计数器与铅板交迭而成。取样计数器可以是液氩电离室、塑料闪烁计数器和多丝室。
- **强子量能器**——高能强子在介质中会产生强子簇射。收集到总电离电荷即可确定强子总能量，通常采用闪烁计数器或多丝室与铁（铀）板交迭而成。
- 此外，还有**RPC**、**GEM**等新型的气体探测器



# 径迹室类探测器

- **核乳胶**——能记录带电粒子单个径迹的照相乳胶。入射粒子在乳胶中形成潜影中心，经过化学处理后记录下粒子径迹，可在显微镜下观察。它有极佳的位置分辨本领（**1微米**），阻止本领大，功用连续而灵敏。
- **云室和泡室**——使入射粒子产生的离子集团在过饱和蒸气中形成冷凝中心而结成液滴（云室），在过热液体中形成气化中心而变成气泡（泡室），用照相方法记录，使带电粒子的径迹可见。泡室有较好的位置分辨率（好的可达**10微米**），本身又是靶，目前常以泡室为顶点探测器配合计数器一起使用。
- **火花室和流光室**——这些装置都需要较高的电压，当粒子进入装置产生电离时，离子在强电场下运动，形成多次电离，增殖很快，多次电离过程中先产生流光，后产生火花，使带电粒子的径迹成为可见。流光室具有较好的时间特性。它们都具有较好的空间分辨率（约**200微米**）。除了可用照相记录粒子径迹外，还可记录电脉冲信号，作为计数器用。
- **固体径迹探测器**——重带电粒子打在诸如云母、塑料一类材料上，沿路径产生损伤，经过化学处理（蚀刻）后，将损伤扩大成可在显微镜下观察的空洞，适于探测重核。



# 粒子探测器的发展前景

## ■ 大型磁谱仪

- ✓ 随着加速器能量的增长，产生的粒子数目越来越多，随着粒子物理研究的发展，需要测量粒子的参数也越来越多，单个探测器已经无法满足这些需要。**20** 世纪**60**年代末，固定靶实验和对撞机实验相继出现了由多种探测器组成的大型磁谱仪。
- ✓ 大型磁谱仪可以同时测量粒子的多种性能（如电荷、质量、自旋、宇称、衰变宽度/寿命等）；可测量粒子的多种运动学参量（如能量、动量、速度等）；具有较好的粒子分辨本领。
- ✓ 大型磁谱仪一般由顶点探测器、中心径迹室、飞行时间计数器、切伦科夫计数器、穿越辐射探测器、电磁量能器、强子量能器、 $\mu$ 子计数器、亮度监测器、常规及超导磁铁等子探测器构成。



# 粒子探测器的发展前景

- 在探测器方面出现了**新型探测器**如闪烁光纤、自猝灭流光管、阻性板探测器、时间投影室、平行板雪崩室、硅微条探测器、微条气体室等。
- 粒子探测器的**电子学及数据获取**方面也有了很大发展，以适应更高能量的更复杂的事例测量，如高精度的位置和能量分辨、快时间响应的探测器；高集成度、快响应电子学；快速大规模数据处理系统。
- 先后出现了智能和集成度高的**VME**总线和快总线（**FASTBUS**），专用集成电路器件（**ASIC**），硅条探测器同前级电子学组合在一起的集成系统，高速模拟-数字转换插件（**Flash ADC**），无死时间的时间-数字转换（**TDC**）电路，大群微处理器组成的前级信号采集处理系统，流水线及在线事例过滤机群**FARM**，智能触发逻辑系统以及**10—10**秒快时间响应电路等。



# 大型磁谱仪

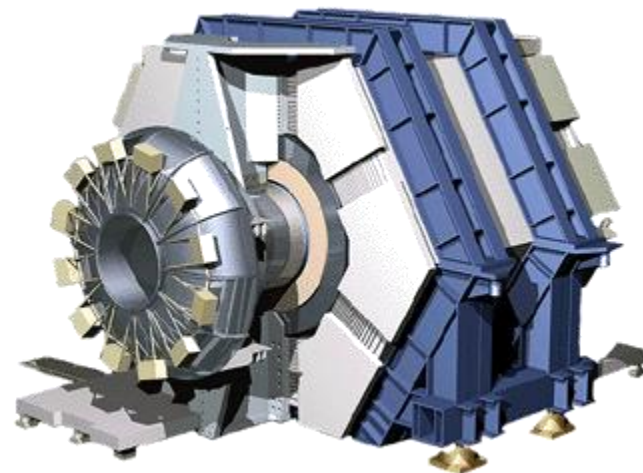
---

- 大型磁谱仪自诞生那一天起，在粒子物理探测方面就显示出综合性能的优势，且规模越来越大，精度越来越高，三十年来做出了许多重要的高能物理实验成果。如：一些重要粒子的发现（ $J/\psi$ 、 $Y$ 、 $W^\pm$ 、 $Z^0$ 和顶夸克等），电弱统一模型的精确测定以及量子色动力学（**QCD**）模型的检验等。可以预言，新世纪中它的技术会得到进一步发展，以适应高能物理研究发展的需要。
- 欧洲核子研究中心**CERN**于**1989**年建成的**90-200 GeV**正负电子对撞机**LEP** 的周长为**27**公里。其上的四个大型实验装置的三维尺度大约都在**15**米左右，而对撞点周围的顶点探测器的位置精度达十微米左右。每个装置参加实验的科学家规模都达到**500**人左右。

# B介子工厂

- 几个粒子工厂如**B**粒子工厂属高亮度加速器，亮度都达 $L \sim 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，比同能区一般对撞机的亮度高**100**倍以上。
  - 美国 **3.1-9 GeV** 正负电子对撞机 **PEPII/ BABAR**
  - 日本 **3.5-8 GeV** 正负电子对撞机 **KEKB/ BELLE**

对上述**B**工厂的探测器主要要求包括高计数率、高分辨率、高抗辐射强度等。





# CERN的LHC

- **CERN**已建造完毕的新一代质子-质子对撞机**LHC**属于高能加速器，其能量高达 **$8 \sim 20 \text{ TeV}$** /束，亮度约为 **$10^{33} \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$** 。**LHC**有很高的多束团束流对撞频率（即束团周期小到 **$25 \text{ ns}$** ）和很大的**P-P**强作用截面（ **$\sigma \sim 100 \text{ mb}$** ）。这些都对粒子探测技术提出了极具挑战性的要求，**LHC**的探测器有以下特点：
  - 具有足够快的时间响应以提供严格触发与避免事例堆积；
  - 具有极高的空间分辨率、多径迹分辨率与粒子识别能力； 具有庞大的体积以便对大能量范围的粒子进行精密测量和有很强的磁场以便进行高动量测量。其典型的尺寸为直径 **$15\text{-}20$** 米，长 **$20\text{-}40$** 米，读出电子学道数以 **$10^7 \sim 10^8$** 计。数据获取率高达 **$10^{11}$**  字节/秒（**Byte/s**）；
  - 具有接受粒子的密封性，即探测器尽可能覆盖 **$4\pi$** 立体角；
  - 具有极高的抗辐射能力。



# 可能的长远规划项目

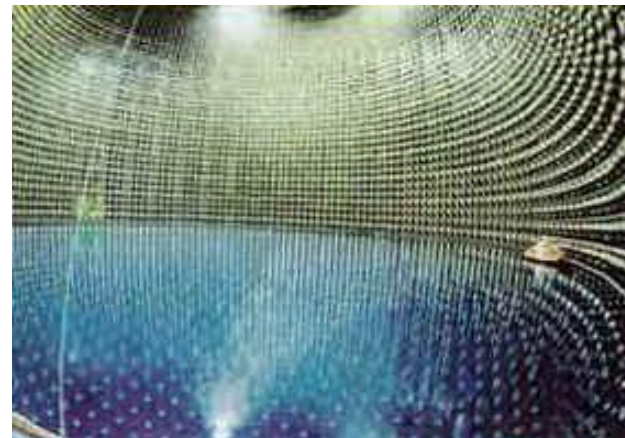
---

- 极高能强子对撞机 (**VLHC**)
- 电子直线对撞机 (**ILC**)
- 环形电子对撞机 (**CEPC、TLEP**)
- **muon**对撞机
- 中微子工厂



# 大型非加速器物理

- 在寻找新物理的大型非加速器物理（粒子天体物理）实验前沿方面,其探测器体积均在数千至数万吨之间,以高灵敏度、低本底与低噪声的特点探测低事例率的物理现象,如宇宙线或天体过程中的中微子、宇宙暗物质粒子等。测量精度也由较粗放转向精密。
  - 日本**Superkamiokande** 实验用了**5**万吨水切伦科夫计数器（图示为水切伦科夫计数器内部）。
  - 意大利**Gran Sasso** 实验室的**MACRO** 实验用了一千吨液体闪烁体,一万吨径迹探测器。设在该实验室的**ICARUS** 实验计划使用近万吨全新探测器-液氩时间投影室（**LArTPC**）。



# 中国在粒子探测器领域的成果



- **20世纪50年代**以来低能核物理和高能宇宙线研究：  
如在云南高山站建成当时世界上规模最大的云室组之一
- **70年代到80年代初**研制成功一系列粒子探测器，如小型多丝正比室、漂移室、阈式切伦科夫计数器、闪烁计数器描迹仪、流光室等及与其相配合的电子学系统与**NIM**、**CAMAC**插件等。
- **1988** 建成的北京正负电子对撞机（**BEPC**）上的北京谱仪（**BES**）  
它的建造成功标志着中国的粒子探测器技术已达到国际水平。十几年来，通过**BES**运行获得了以**T**轻子质量精确测量为代表的一系列国际瞩目的**T**-粲物理成果，实现了邓小平同志的“中国必须在世界高科技领域占有一席之地”的号召。
- 在宇宙线天体物理实验方面合作建成了用于研究**γ**天文的西藏羊八井大面积广延大气簇射阵列**ARGO**及球载空间硬**X**射线望远镜等。

# 中国在粒子探测器领域的成果



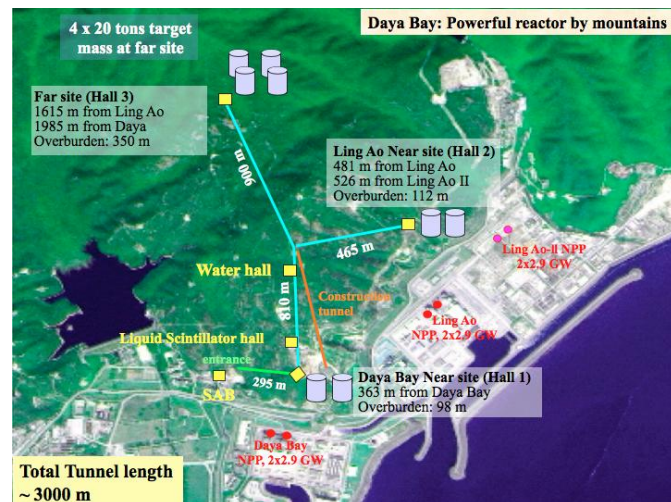
## ■ **BESIII**

大大提高了探测器的分辨率和粒子识别能力，减少...  
**BEPCII**的高亮度提供的高统计精度相匹配，同时还增加接收度，并适应**BEPCII**高计数率的要求。它的主要建设内容是新建**1 Tesla**的超导磁铁，采用**CsI**晶体电磁量能器、小单元氦基气体主漂移室、飞行时间计数器等，同时更新读出电子学系统、触发判选和数据获取系统，以适应在**BEPCII**多束团和高亮度条件下的运行要求

## ■ **Dayabay**

**3 sites:**  
**8ADs:** 掺钎液闪  
**water cherenkov**  
**RPC**

## ■ **JUNO**





# 积极参加国际合作

---

- 我国先后参加了多项国际高能物理的合作实验，并在探测器方面作出了相应贡献，如德国**DESY**的**MARKJ**、欧洲核子研究中心（**CERN**）正负电子对撞机**LEP**上的**L3**和**ALEPH**、意大利 **Gran Sasso**实验室的**LVD**和**ICARUS**以及**Frascati** 实验室的**KLOE**、美国**SLAC**的 **B**介子工厂**BABAR**、费米实验室**FNAL**的**DO**、**E745**、**E761**、**E781**、日本**KEK**的**AMY**和**BELLE**，以及目前参加的**CERN**的**LHC**上的**CMS**和**ATLAS**以及宇航方面的**AMS**等。



# 粒子探测器技术的广泛应用

- 粒子探测器技术对基础学科-物质结构的研究有着极大的促进作用，在国计民生方面的应用也是极其广泛的。
  - ✓ 早在**1897**年汤姆生发现电子用的称为“亚原子微粒子探测器”装置和电视机显象管极其相似。
  - ✓ **1939**年利用电离室探测器发现的核裂变
  - ✓ 同步辐射实验站
  - ✓ 近年来人工放射性和粒子束流在工农医等方面的应用也离不开粒子探测技术和数据获取。如工业探伤、海关集装箱检测、石油探井、无接触测量（核子秤，测厚仪等）、食品保鲜、种子变异、用于诊断和治疗癌症的 $\gamma$ 、**X**射线断层照相（**CT**）、正电子断层照相**PET**和 $\gamma$ 刀、质子治癌等。
- 近年来发展迅速的粒子探测器和数据获取技术，将进一步促进粒子物理实验和理论的发展，也将进一步得到多方面应用，并与相关学科相互促进。



# X光工业CT 与 PET

