

中国科学院高能物理研究所“小粒子 大宇宙”系列课程

第一讲：粒子对撞机历史回顾与展望

高杰

大家好！

欢迎来到“小粒子 大宇宙”系列课程。这里是中国科学院高能物理研究所。我是高杰。

今天我们讲的这一堂课，题目是《粒子对撞机历史回顾与展望》。

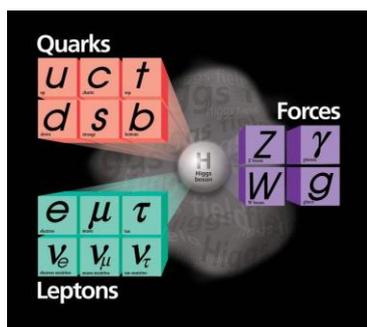
大家知道宇宙的构成有三大部分，它是由物质、暗物质和暗能量构成。其中物质大约占百分之五，暗物质占百分之二十七，还有接近百分之七十是暗能量。



宇宙的构成

那么物质的构成，大家都知道，分子，比如像水分子，它是由氢和氧构成的。那么氢和氧又是什么呢？我们管它叫元素。或者说，大家非常熟悉的门捷列夫化学元素表，表里面就是分子、原子的一个基本的构成。原子是由原子核和核外电子构成的，原子核是原子的很小的一个内部结构，外层有外部电子。原子核的结构又是由基本粒子构成的，比如像质子、中子，都是由夸克构成的。

目前在物质深层，或者说物质结构的深层次研究当中，最重要的是什么呢？我们要研究的就是构成物质深层结构的、也就是我们从科学角度上讲的“标准模型”。它有点像门捷列夫表，门捷列夫表是在原子层面的，标准模型是在基本粒子层面的。标准模型当中有个希格斯粒子。希格斯粒子是在2012年7月4号发现的，我们自从那时候就进入了希格斯时代。也就是说希格斯粒子使人类找到了一个通向未知世界、探索未知世界的一个最为重要的新窗口。

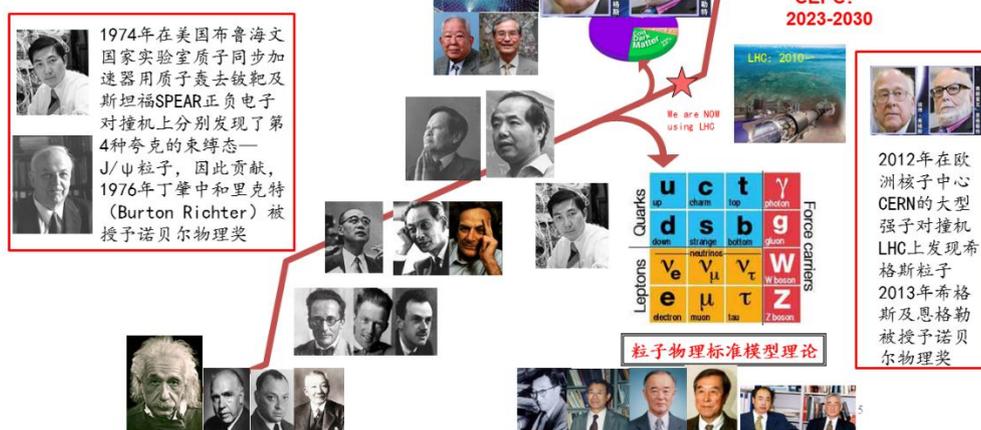


标准模型中的粒子

人类在探索宇宙奥秘的过程当中努力是不停息的，探索宇宙奥秘是全世界的科学家们不懈的努力。

人类探索宇宙奥秘的探索并造福人类生活的努力会永不停息

探索微观物质世界科学理论的先驱们



从这张图大家能够看到，我们有很多的知名科学家，从爱因斯坦到杨振宁、李政道、丁肇中，最后到希格斯——希格斯粒子的理论的创始人。在整个过程当中是一代接着一代的不懈的努力。但是在这个过程当中，科学的理论必须经过实验的检验。在我们今天讨论的课程当中，粒子物理实验需要通过什么来完成呢？需要通过加速器和对撞机。待会我会给大家仔细地来介绍。

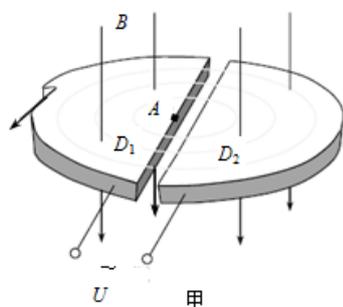
什么是加速器？什么是对撞机？举两个例子。比如说在 70 年代，1974 年发现的 J/ψ 粒子，就是在布鲁克海文的质子同步加速器和在美国斯坦福的 SPEAR 正负电子对撞机上发现的。还有刚才我提到的 2012 年的 7 月在欧洲核子中心发现的希格斯粒子，我们简称叫“上帝粒子”，是在大型强子对撞机（LHC）上面发现的。科学的理论发现都离不开检验，而检验也离不开科学设备、科学实验。科学设备、科学实验除了有加速器，还有不需要加速器的一些其他的科学手段，比如说我国的大亚湾中微子实验，王贻芳院士带队的中微子实验发现的 θ_{13} 不等于 0，精确测出 θ_{13} 的数值。这在对于物质的基本的理论上面是有实验贡献的。



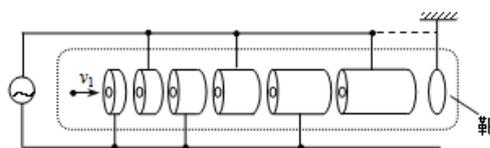
因带领团队首次探测到中微子的第三种振荡模式，王贻芳院士获得 2019 年未来科学大奖

那么什么是加速器呢？大家非常好奇。实际上简单地说，就是带电粒子通过电场增加能量，通过具有能量的带电粒子进行科学研究，比如说去打靶或者进行对撞。比如说，比较容易理解的就是我们家庭的电视机，它就是一个最简单的直线加速器。它的能量是什么呢？你加的电压叫伏特。电子经过电视机的加速就会得到一定的能量，我们用一个能量单位就叫做电子伏特。电场是用来加速带电粒子的，也就是给它提供能量，速度增加。那么它拐弯、改变运动方向怎么办？通过磁场。比如说我们要做一个圆形的加速器，你就会用磁场来偏转，使它绕一圈再回来。所以电场是加速，磁场是偏转。磁场并不提供能量，它只是改变运动方向。

加速器可以粗略地分成两类：一类叫做直线加速器，一类是环形加速器。直线加速器就是粒子走直线，环形加速器就是粒子通过磁场一圈一圈的在里面进行运转。但是环形加速器当中，因为它也需要提供能量，所以里面也是要加电场的。

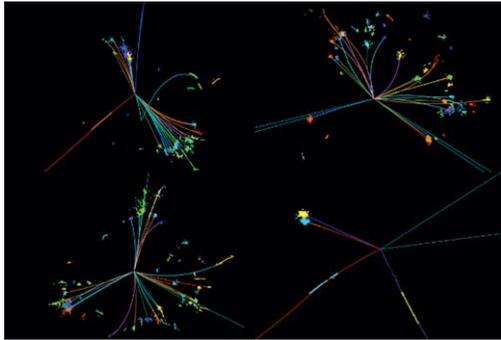


环形加速器

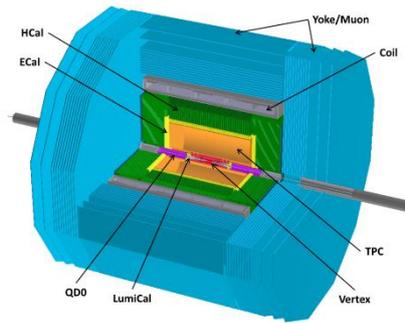


直线加速器

有了加速器，我要使用它进行科学研究，那么就要用带电粒子去打原子核或者对撞。大家知道爱因斯坦的质能公式，也就是能量跟质量是可以相互转换的。举个例子，正负电子对撞机中，正负电子在对撞的那一时刻，电子所带的能量就转化成一个新的能量，粒子性消失掉，紧接着再通过这个能量产生新的粒子。但是这个粒子是人眼看不见的，因此我们会需要用探测器，相当于代替人眼来看到对撞之后粒子的产生的种类、多少、特性。

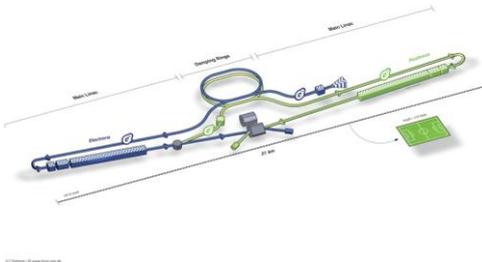


对撞后产生新的粒子

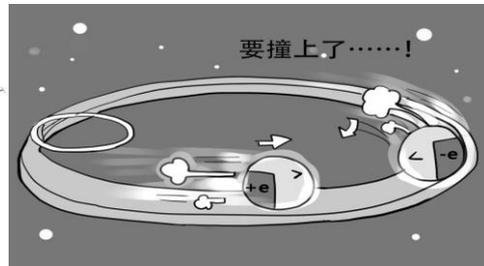


探测器

对撞机也分两类：一个是直线对撞机，粒子相向运动，在一个对撞点对撞，那地方有个探测器，用来研究它的物理现象；还有环形对撞机，正负电子是相对而行，不停地一圈一圈运转，再进行对撞。



直线对撞机



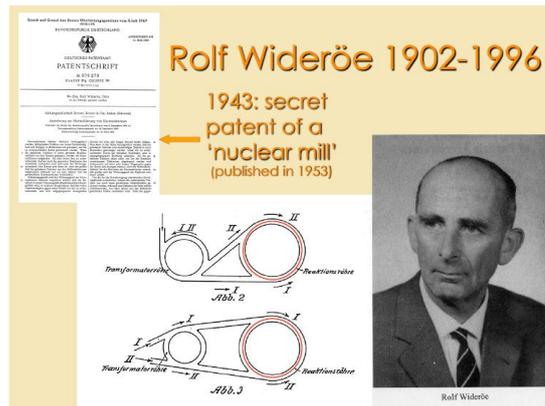
环形对撞机

全世界有不同种类的对撞机和加速器。我这张图给大家非常简要的展示一下，在不同的地方，比如说像在美国、在瑞士、在德国、在日本、在意大利、在法国、在中国，都有过这样的对撞机。



加速器它既是物理，也是一门科学，同时加速器还是技术与工程，这是粒子加速器的一个非常重要的特点。

粒子**对撞机**的这个想法首次提出是在 1943 年的时候，由一位挪威的科学家叫 Rolf Videröe 提出的。他把他这个对撞的想法放在一个专利里面，在当时 1943 年了解这个专利的人并不是很多。



1943 挪威科学家 Rolf Wideröe 将粒子对撞机的想法发表在一个专利中

在五几年的时候人类才开始对撞机的探索。世界上第一台正负电子对撞机，名字叫 AdA，是一位意大利科学家叫 Touschek 提出来的，在 1961 年在意大利的 Frascati 建成。大家看这是一个很小的机器。之后在 1962 年这个机器被运到了法国的 Orsay，在 LAL 实验室第一次证明了正负电子对撞机是可行的。



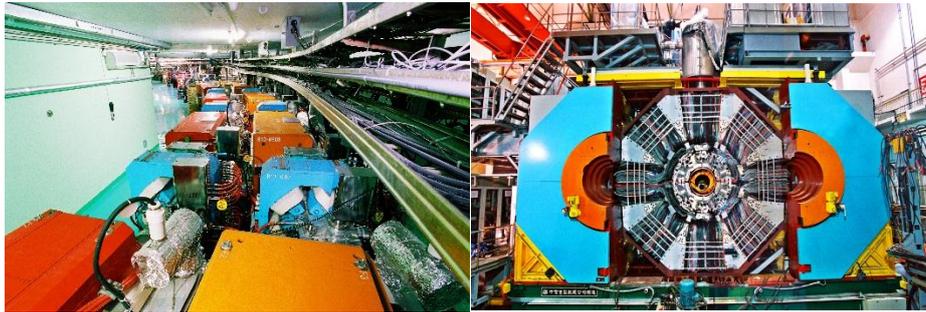
世界上第一台正负电子对撞机 AdA

那么世界上最大的正负电子对撞机和质子对撞机是哪些呢？正负电子对撞机，世界最大的叫做 LEP，在日内瓦的欧洲核子中心。那么世界上最大的质子对撞机 LHC 在哪？还是在欧洲核子中心，就在 LEP 的隧道里面，同样周长是 27 公里。LEP 跟 LHC 都在一个隧道里，只不过把 LEP 拆掉了，后来在 2000 年又开始安装大型强子对撞机（LHC）。正是在大型强子对撞机上，2012 年 7 月 4 号发现了希格斯粒子。

世界上目前还有其他的还没有建成的、未来的对撞机计划，比如说欧洲核子中心（CERN），它也有一个计划，是再做一个周长 100 公里的环形对撞机。日本也希望在日本的岩手县承建国际直线对撞机，它的能量也是起步是希格斯粒子的能量，长度是 21 公里左右，它是直线对撞机。

那么我们中国的正负电子对撞机历史是如何呢？我们是在 1984 年开始建造中国的第一台高能物理的正负电子对撞机。当年邓小平先生代表党中央到高能所来奠基。2009 年北京正负电子对撞机完成升级改造。这是一个改进型的对撞机，在同一个隧道里面，叫 BEPCII，一直运行到现在。这个机器是一机两用，既可做高能物理，同时又可以做物理实验。在 2011 年谢家麟院士获得国家最高

科学技术奖，是高能人的代表。BEPCII 是个双环结构的高亮度的正负电子对撞机。它里面有两个环，有探测器，又同时可以进行同步辐射研究。

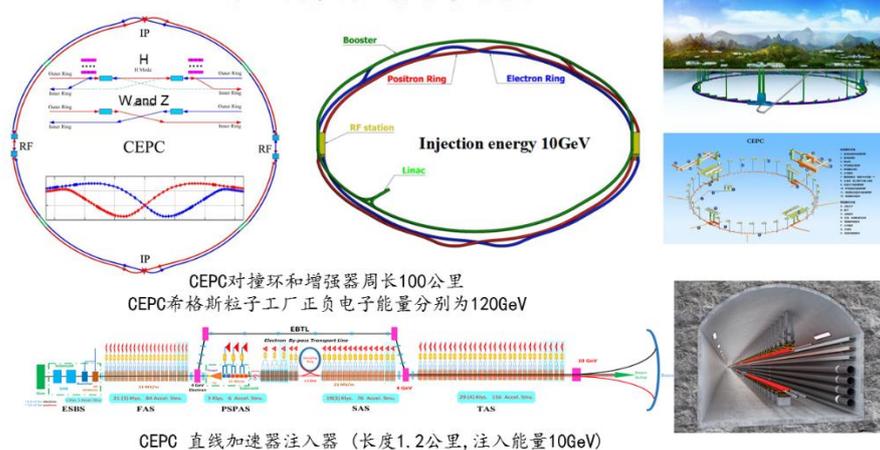


北京正负电子对撞机的双储存环

北京谱仪

那么中国下一代对撞机的计划是怎么样呢？这就不得不提到 2012 年 7 月 4 号发现的希格斯粒子。刚才从一开始我就讲到这个是人类在物质深层研究的珠穆朗玛峰，这是皇冠上的明珠，这是科学的前沿，这是最重要的一个研究的题目。所以中国科学家在 2012 年的 9 月就提出要在中国建造下一代的环形正负电子对撞机来研究希格斯粒子。那时中国的科学家就动员起来，自 2012 年的 9 月到现在不断的在往前推进。环形正负电子对撞机我们管它叫 CEPC。那么在 CEPC 运行之后，我们还期待着，就像 CERN 一样，在同样一个隧道将来还可以有更大的发展潜力，还可以考虑在隧道当中安装一台超级质子质子对撞机，叫做 SppC。下一代的环形正负电子对撞机，正负电子是由一个直线的注入器（大概一公里多）注入到一个增强器当中，从增强器再注入到对撞环，再进行对撞。

下一代中国正负电子对撞机-CEPC



大家从这个图上可以看见，增强器是挂在房顶上的，地下的环是对撞环，整个周长是 100 公里，这是人类在地球上所规划的、所要建设的最大的科学实验装置。

那么为什么对撞机会越做越大呢？刚才我讲，第一台正负电子对撞机的直径就一点几米。现在我们规划的有 30 多公里了。为什么会越做越大？那是因为我们探索的物质最深层的尺寸越来越小。大家知道，物质粒子，实际上除了有粒子性还有波动性。也就是说你要看清楚小的物体，你就需要一种“**光线**”去

看到这么小，它的波长必须得跟你所看到的东西的波长尺寸在一个量级上。

$$\lambda=h/p$$

我在这儿写了个公式：物质波。一个粒子在微观也是具有波动性的。它的波长跟什么有关呢？跟普朗克常数除以它的动量有关。也就是说，如果探测的物质深层越深，看的东西越小，波长要越小，能量就必须越大。你要看的越深，能量就越来越高，那么对撞机的能量高这是必然需求。

现在有两种加速器，一种是电子的，比如就说直线加速器，加速梯度是由技术决定的。也即每米有多少能量，是由技术决定的，能量越高它就越来越长。比如国际直线对撞机，它就需要多长呢？21 公里。以前有没有这么长的对撞机和直线加速器呢？没有。但是这是一个需求，因为是能量决定的，技术在那摆着。

环形的分两种，一种是电子的。如果说我用一个很强的磁场，把回旋半径放到很小，那就不用 100 公里了。可是大家知道带电粒子，特别像很轻的带电粒子，像电子，它会辐射出能量。它辐射出来的功率跟它能量的四次方成正比。也就是说像狗熊掰棒子一样，一边加速它一边辐射能量，最后能量很难增加，同时要耗很大的电能。因此，为了增加能量要怎么办呢？只能把电子的弯转半径变大。弯转半径变大，对撞机的周长就长了，因此 CEPC 是 100 公里。

对于质子来说，它比电子重 1800 多倍，那么它的同步辐射相对电子要轻。但是质子也需要得到很高的能量，这时候它受什么因素影响呢？磁场的强度。磁场的强度由技术决定，不能太强，因此能量走高的话，自然周长也要变长。这就是为什么我们说 SppC 也需要 100 公里。

最后我们谈到未来 CEPC 到底放在什么地方？这个不是一个确定的。它需要一个很好的坚硬的岩石。CEPC 要放在地下的一个花岗岩当中，它的隧道宽 6 米、周长 100 公里。我们目前在全国选了一些地方。

习主席对科技界提出新的希望和新的要求。2013 年的 7 月 17 日习主席来视察高能所，提出了“四个率先”，对中国的科技界提出了新的希望。中国的科学家也会按照习主席对科技界提出的新希望和新要求，做好我们的工作、站好我们的岗，把中国的高能物理、中国的加速器做到世界的一流、世界的前沿，来对人类的科学做出更大的贡献。

谢谢大家！