

深埋地下的对撞机 怎样洞悉微观世界的秘密

粒子物理系列报道②

◎本报记者 吴长锋

2021年3月，欧洲核子研究中心(CERN)宣

宣告新发现并不容易

20世纪70年代，科学家们创立了粒子物理标准模型，清楚地给出了组成世界的基本粒子的信息，包括它们的种类、质量、电荷、自旋以及它们之间的相互作用。标准模型好比一个宾馆套间的“手册”，上面清楚详细地说明了每一件物品的名称、种类、数量、位置等，从而使客人能够非常舒服地住在里面。

在过去的近半个世纪中，科学家们在实验中发现的所有粒子，都能在标准模型中找到对应的身份，并且其性质也与“手册”中的预测基本吻合。

“科学家们通过实验验证并拓展理论框架，一个核心的任务是去寻找标准模型预言的但尚未发现的，以及超出该理论解释范畴的新现象和新粒子。”中国科学院近代物理所特聘教授吴雨生告诉记者，这类新发现在人类一步一步揭开物质世界根本规律的科学研究中至关重要。

这一点从上个世纪以来的诸多基础科学突破中都能得到佐证：从1905年通过光电效应证实光子的存在，到2012年发现希格斯粒子，标准模型理论预言的所有基本粒子均被发现。标准模型预言下的基本粒子研究，也使得人类在

布，其大型强子对撞机(LHC)发现了四种全新的粒子，它们是四种不同的四夸克态。

迄今为止，LHC已经发现了共59种新强子，包括此次最新发现的四夸克态以及其他诸多粒子。那么，科学家们是如何确定他们发现了“新粒子”呢？

探索宇宙本源和物质本质的路上越走越远：预见到反物质的存在，发现中微子质量并不是零、观测到黑洞乃至探测到引力波等。“每次新发现都如同向静谧深邃的潭水投入一块石头，激起圈圈涟漪，推进一系列新科学、新技术的诞生。”吴雨生说。

“在粒子物理实验中，新现象的发现到底是否确凿可信，一般用统计学中的显著程度来表征。显著度表达为高斯分布标准差的倍数，即几倍 σ （西格玛）。”吴雨生告诉记者，倍数越大则越可信。“如果显著度为 5σ ，这个新发现被认为确凿无疑，以假乱真的可能性甚至低于百万分之一，而 3σ 显著度的实验结果也较为可信，所对应的存伪概率仅为千分之一。”吴雨生说。

吴雨生告诉记者， 5σ 和 3σ 分别对应于科学结论“发现了新现象”和“找到了新现象存在的迹象”，是科学家们宣告新发现的重要依据。对于基础性的重大发现，科学界极为严谨严苛，不光要求实验发现的统计显著度达到 5σ ，还要能经得起时间的检验。“另外，还要求有独立进行的其他实验去重复验证其结果。”吴雨生说。

对标准模型的检验从未停止

“自从标准模型诞生以来，人们对标准模型的检验就从未停止过。”吴雨生说，探索微观世界的奥秘，就必须要有可靠的实验手段来观测各类物理现象，这些实验手段需要能产生微观粒子并进行反应，能记录并分析反应结果，从而与理论预言对比。“在不同方案、不同条件下进行大量精密实验，可以全方位地检验标准模型，并且有可能发现那些稀有的、模型内和模型外的新现象。”他说。

粒子物理学轻子家族中最著名的粒子是电子，电子是物质的关键组成部分。但电子并不是轻子家族唯一的成员，它有两个更重的兄弟姐妹， μ 子和 τ 轻子，它们一起被称为三种轻子口味或“味道”。根据粒子物理标准模型，这些兄弟姐妹之间唯一的区别应该是质量： μ 子比电子重约200倍，而 τ 轻子比 μ 子重约17倍。

按照标准模型，每种味与一个W玻色子都可能有一样的相互作用。“轻子的味道又称‘代’，电子、 μ 子以及 τ 轻子，分属标准模型中的三个不

同代。人类的每一代之间可能会有‘代沟’，但在标准模型中，不同代的相应轻子虽然胖瘦不一，即质量不同，但它们都必须以相同的面貌参与微观世界的各类聚会，即基本粒子的反应过程，这就是轻子味普适性的预言。”吴雨生说。

“这是一个很奇妙的预言，许多物理学家希望寻找违背这个普适性的新现象，来探究超越标准模型理论存在的可能性。”吴雨生说，近期媒体报道的LHCb的一个实验工作，就是专注于检验标准模型的一个基本预言，即违背轻子普适性现象的可能迹象。“这个实验结果引起了很多关注，但显著度尚远不足以宣称新发现，并有待时间的检验，以及后面其他实验的验证。”

“轻子味的普适性已经被在不同的过程和能量范围内进行了高精度的探索。尽管轻子味普适性原理已经通过了最新的测试和检验，但在发现的许多反常现象被明确探测之前，大型强子对撞机实验仍在继续进行。”吴雨生说。

加速器与对撞机联手寻找谜底

新的基本粒子靠什么来寻找？答案是通过加速器和对撞机。

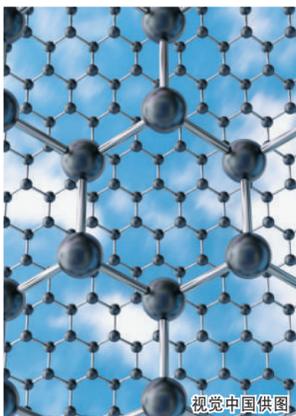
“简单地说，加速器就是带电粒子借由电场增加能量，通过具有能量的带电粒子进行科学研

究，比如说去打靶或者进行对撞。比如说我们家庭中的电视机就是一个最简单的直线加速器。”吴雨生说，电子经过电视机的加速就会得到一定的能量，能量单位叫做电子伏特。电场是用来加

加点电压，这种超导体变身绝缘体

◎洪恒飞 周炜 本报记者 江耘

铝酸镧和钽酸铀原本是两种绝缘体，但组合在一起，界面就能导电甚至出现超导现象——今年2月才在《科学》杂志正式“亮相”的这一发现，



视觉中国供图

勾起了科学家持续探秘的兴趣。

近日，浙江大学物理学系谢燕武研究员联合中国科学院物理所孙继荣研究员和周毅研究员等学者发现，可以像调控半导体器件那样，用门电压连续调控铝酸镧/钽酸铀界面的导电性质；随着电压的变化，该界面呈现了从超导到绝缘体的连续转变。同时，研究团队还在该界面观测到了可被连续调控的量子金属态等许多新奇的物理现象。相关论文5月14日在《科学》杂志上线。

调控电子分布 转变氧化界面超导属性

2007年，瑞士日内瓦大学的崔斯孔(Triscone)教授等首先发现了铝酸镧/钽酸铀界面存在超导现象。这标志着一类新的超导体系的诞生：氧化物界面超导。

“随后的研究发现，铝酸镧/钽酸铀界面的导电性可以通过电压来开启或关闭，就像半导体晶体管。”谢燕武说，这不禁让人畅想，或许有一天学界能制造出像半导体一样可以精确调控的超导器件。

本次研究中，研究团队发现了一种全新的调控机制，实现了铝酸镧/钽酸铀导电性的连续可调，器件随电压变化呈现出从超导到绝缘体的



大型强子对撞机(LHC)深埋于地下100米深、总长27千米的隧道内 视觉中国供图



5σ 和 3σ 分别对应于科学结论“发现了新现象”和“找到了新现象存在的迹象”，是科学家们宣告新发现的重要依据。对于基础性的重大发现，科学界极为严谨严苛，不光要求实验发现的统计显著度达到 5σ ，还要能经得起时间的检验。

吴雨生

中国科学技术大学近代物理系特聘教授

速带电粒子的，也就是给它提供能量，增加速度。

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都在里面运转。

“有了加速器，就可以用它进行科学研究，用带电粒子去打原子核或者对撞。”吴雨生说，粒子撞入人眼是看不见的，因此需要用探测器，相当于代替人眼来看对撞之后产生的粒子的种类、多少和特性。

对撞机也分两类：一个是直线对撞机，粒子相向运动，在一个对撞点相撞。另一个是环形对撞机，正负电子是相对而行，一圈一圈不停地加速，再行对撞。

“加速器既是一门物理学，同时还是技术与工程，这是粒子加速器的一个非常重要的特点。”吴雨生说。

上世纪60年代，世界上第一台正负电子对撞机在意大利建成。其后在日内瓦的欧洲核子中心(CERN)，建成世界上最大的正负电子对撞机LEP。之后科学家将LEP拆除，在其隧道中建成了世界上最大的质子对撞机LHC。

“因为我们要探索的物质最深处的尺寸越来越

小，而探测的物质层次越深，看的东西越小，就需要‘光线’的波长越小，能量就必须越大。因此对撞机的高能量是必然需求。”吴雨生说，世界上最大的质子对撞机LHC也是能量最高的粒子加速器，它深埋在地下100米深、总长27千米(含环形隧道)的隧道内。

“LHC体积巨大，能将粒子加速到接近光速，这正是强磁场使粒子围绕加速运行的结果。其磁场强度非常大，因此如果摆在地面上，周边很大范围内就不允许其他设施和人员存在。”吴雨生说，LHC深埋地下，也是为了排除其他干扰，获得一个更纯粹的实验环境。

“大型强子对撞机能量状态可与宇宙大爆炸后不久的状态相比。科学家利用质子碰撞后的产物探索物理现象，例如，寻找标准模型预言的希格斯粒子，探索超对称、额外维等超出标准模型的新物理等。”吴雨生说。

事实上，在建造LHC的过程中，科学家已经获得了许多改善我们生活的科研成果。比如互联网最初就是欧洲核子研究中心的科学家为了互联数据传输问题而发明的，其他诸如癌症治疗、摧毁核废料以及帮助科学家研究气候变化等的一些成果，也得益于大型强子对撞机。

新知

3.5亿年前地球骤冷 种子植物或为幕后推手

科技日报讯(实习生季天宇 记者张晔)晚古生代大冰期发生了显生宙以来持续时间最长、规模最大的成冰事件。究竟是什么导致了这一时期全球古海洋、古气候、古生态发生显著变化?或许种子植物的辐射可以给出解释。科技日报记者5月12日从中国科学院(以下简称中科院)南京地质古生物研究所获悉,该所一项针对石炭纪中内期的古海洋环境变化及其与种子植物的演化关系研究表明,种子植物大规模繁盛是导致地球晚古生代大冰期的直接原因。该成果已发表在《地球与行星科学通讯》(地球与行星科学通讯)。

晚古生代冰期是显生宙以来持续时间最长、规模最大的成冰事件。从石炭纪最早期(距今3.55亿年左右)全球气候急剧变冷并伴随显著的碳循环波动,这也是晚古生代全球气候由“温室”到“冰室”转换的冰期正式开始的重要标志性事件。

一直以来,维管植物特别是种子植物的登陆和大规模繁盛被认为是触发全球变冷和晚古生代冰期成冰事件的重要原因之一,但长期缺乏证据揭示它们之间的直接因果联系。

此次,中科院南京地质古生物所陈波、陈吉涛、郗文昆、黄璞等人与国内外同行进行了合作研究。他们对华南和越南等地5条早石炭亚纪剖面开展详细的碳、锶、氧同位素分析,同时系统地梳理了晚泥盆世—早石炭亚纪早期全球种子植物属一级多样性及其地理分布变化。

研究发现,海水的锶同位素比值在杜内期中期开始下降,并伴随着碳酸盐同位素值和牙形刺同位素值的增加。这三个同位素体系的耦合变化正对应于种子植物早期演化阶段中最重要的辐射事件。此次事件中,种子植物多样性的快速增加和分布范围的显著扩张为特征。

陈波副研究员认为:“种子植物在这一时期加速扩张,使得磷等陆源营养物质输入到海洋,从而促进全球海洋生产力提升和有机碳埋藏。而硅酸盐风化与有机碳的埋藏会大量地消耗大气中的二氧化碳,最终导致气候的变冷。”

该项研究系统地揭示出陆地生态系统演变通过影响地表生物地球化学循环而最终导致全球气候变化的全过程,研究结果对进一步理解陆地生态系统的兴起,及其在塑造全球气候中所扮演的角色有重要意义。

新型催化体系 可实现高效电催化析氢

科技日报讯(记者郝晓明)科技日报记者从中国科学院大连化学物理研究所获悉,该所研究员刘健团队与大连理工大学研究员周思,联合天津大学教授梁骥团队,通过单原子催化剂改性的策略,增强载体与其负载金属原子间的相互作用,构筑了钌单原子催化剂掺杂碳金属钌(Ru)纳米反应器,实现了电催化析氢反应中绿氢的高效制备,为碳载金属纳米催化剂性能的调控提供了新思路。相关研究成果近日发表在《德国应用化学》上。

碳载体具有比表面积高、孔结构丰富、稳定性强、导电性好等优势,被广泛用于电催化领域。然而,碳载体的惰性表面导致其与负载的金属纳米粒子间的相互作用力过弱,难以有效调控金属纳米粒子的电子结构和催化活性,抑制团聚的能力也较差。

针对这些问题,研究团队提出利用单原子掺杂调节碳载体 π 共轭结构以增强其与金属纳米粒子间相互作用的策略。基于此,团队利用铁钴镍等金属单原子掺杂含氧石墨烯,并以其作为载体负载金属Ru纳米粒子,构筑了包含金属单原子、碳基底和Ru纳米粒子的复合纳米反应器。理论计算表明,金属单原子的修饰可实现含氧石墨烯表面电荷的重新分布,使单原子周边碳原子呈缺电子状态,显著增强了负载Ru纳米颗粒至碳载体的电子转移能力。以电催化析氢反应(HER)为模型,研究团队探究了该复合纳米反应器中金属单原子掺杂诱导的Ru纳米颗粒界面电荷重新分布对产氢效能的影响。

据介绍,该复合纳米反应器催化反应是目前文献报道的最高活性之一。该研究不仅开发了高性能析氢电催化剂,还揭示了金属单原子、碳载体与负载金属纳米颗粒之间的作用机制,实现了不同位点间的远程协同和催化性能优化,为基于多活性位点的纳米反应器设计和构筑提供了新思路。

桃金娘锈病致病真菌 基因组被破译

新华社讯(李馨宇)澳大利亚和新西兰研究人员说,他们对桃金娘锈病致病真菌的基因组进行了测序,绘制出了完整的基因组图谱。这将有助于研究真菌侵袭和感染桃金娘科植物的路径,并找到抗病方法。

这项研究成果已发表在科学杂志《G3:基因、基因组、遗传学》上。鉴于桃金娘锈病致病真菌基因组的庞大,研究团队使用高性能计算机来进行测序和组装。结果显示,这种真菌拥有世界上最大的真菌基因组,包含10亿个碱基。

领导这一研究的悉尼大学佩里·托拜厄斯博士介绍,这种源于南美洲的真菌基因组之所以如此庞大,是因为它含有大量的转座因子(即可移动的遗传因子),这是基因中不稳定的区域,可以引起新的突变。研究人员认为,大量的转座因子使这种真菌能够感染并适应新宿主。

研究人员说,了解基因组对研究病原体非常重要。这种真菌的基因组被破译后,研究团队开始利用其来了解哪些病原体基因和哪些宿主基因在感染的最初阶段发生了相互作用,以便于找到方法帮助植物抵御这一真菌病害。

桃金娘锈病是一种真菌病害,自10年前传入澳大利亚后,在东部沿海地区传播广泛,已导致包括番石榴等3种桃金娘科植物在当地濒临灭绝,新西兰的一些桃金娘科植物也深受其害。据悉,全世界有约5500种植物可能受到桃金娘锈病的影响。

能。论文第一作者、浙江大学物理系博士陈峥说:“我们直接测量了在这一电压区间电子‘队形’空间分布的变化,当导电通道在6纳米时,铝酸镧/钽酸铀看起来是很好的超导体,而当通道调整到2纳米时,它就变成了绝缘体。”

随着实验的推进,越来越多的数据涌现出来——无论温度在0到1开尔文的区间内如何变化,铝酸镧/钽酸铀界面的电阻几乎始终是恒定的。

“量子金属是同时具有部分超导和金属特性的新奇量子物态,这是一种典型的量子金属态。”周毅说,已知的量子金属态都只处于某个量子临界点上。而这个系统可以连续调控,量子金属作为相图上一个物相的形式存在。

《科学》杂志的审稿人对这项研究给予了非常积极的回应。他们认为,这种完全可调的超导性是一项引人入胜的突破,该项研究充分深入,几乎覆盖了过去十多年人们在铝酸镧/钽酸铀体系中获得的认识。

谢燕武说:“我们在铝酸镧/钽酸铀体系中的研究可为理解超导机制,尤其是理解高温超导中的机制提供全新的素材,为人们探索低温量子现象呈现了一个崭新的视野,也为超导器件的研发提供了新的思路。”

连续转变。谢燕武介绍,导电电子在低温下两两配对,就会形成超导,目前已知的超导体系已经非常多,但能被电场调控的风毛麟角。“我们的调控方法本质就是调控电子‘队形’的空间分布,让它们在更靠近或更远离界面的地方运动。”

大量的电子在氧化物界面附近运动时,会受到晶格缺陷(也称为“无序”)的影响,好比开车时遇到障碍物。这种“无序”越贴近界面分布越密集,越远离界面则越稀疏。

基于这一认识,研究团队提出了改变电子空间分布的思路。“如果有更多的电子靠近界面,那么整体来看,它们遇到的‘障碍物’就变多了,这会显著影响电子以及配对后的超导库珀对的运动行为。”

发现新线索 观测到新奇的量子金属态

谢燕武说,对于新材料的研究动力主要来自两方面:一方面他们想通过新材料的研究来发现新的物理现象,获得更多的科学见解;另一方面,他们也试图为开发新器件提供有益的线索。

在这项实验中,研究人员测试了门电压从-200伏特到150伏特区间时界面的导电性