

发现量子宇宙

——粒子对撞机的角色

黄艳华

江向东 编译

陈和生 校

当今正是粒子物理学发生根本性变革的时期。新近的实验证据要求一种全新的宇宙图像。一些新的发现近在咫尺,它们将以新的物质形态、新的自然力和新的时空维度拓展人们的想象力。这一突破将来自下一代粒子加速器,即目前正在欧洲建造的大型强子对撞机(LHC),以及拟议中的国际直线对撞机(ILC)。在这些加速器上进行的实验将使人们的宇宙观念发生根本性变革。

一、实施概要:迈向万亿能标

粒子物理学家正打算向一块广阔的科学未知领域挺进。一旦这样去做,他们就将遇到一个发现的领域,那是他们中的许多人终其一生一直都在为之建立理论并憧憬的地方。这片未经开垦的疆土就是万亿能标(Terascale),它是因粒子加速器的能量为万亿电子伏而得名的。这个量级的能量将开启一扇科学发现之门。下一代粒子加速器是物理学家通往万亿能标以及支配宇宙的物理学定律的本质的神秘的藏身之处的门票。物理学家相信,一旦他们能见

到万亿能标,对宇宙的认识将根本改变。

虽然物理学家还尚未达到万亿能标,但是对于将要探索的东西已有深入研究。过去30年中的实验和理论已经对它的特征和轮廓给出了很多线索和预言,这是一块处女地的详细导游图。欧洲核子研究中心(CERN)的LHC上的实验很快就能显示出,理论物理学家的指导手册与万亿能标的现实之间是何种关系。这些实验的真实的数据将改写理论物理学家的量子宇宙指南。

关于万亿能标的某些特征,大部分预言都与之符合。很多物理学家期待发现希格斯玻色子,或者,即使不是希格斯粒子,也是承担希格斯粒子的角色而给物质粒子赋予质量的任何粒子。迄今为止,实验和理论似乎都表明,类似于希格斯粒子的某种现象存在于万亿能标,从而使宇宙以及其中每样东西都不会以光速飞逝。LHC的实验将很有可能发现这种粒子。一旦做到了,这些发现将成为技术与人类认识的一个胜利。此外,可能性虽小一些,但显然也是可能的,那就是发现暗物质、空间的额外维度、所有熟悉的物质粒子的“超对称伙伴粒子”(以下

一条与路面接触的铁链,它使运输过程中产生的静电迅速传入大地,避免因静电放电而造成火灾。

九、流线型车身阻力小

为了减少空气阻力系数,现代轿车车身上的转折线一般采用圆滑流畅的曲线。前围与侧围,前围、侧围与发动机罩,后围与侧围等处均采用圆滑过渡,发动机罩向前下倾,车尾后箱盖短而高翘,挡风玻璃采用大曲面玻璃,且与车顶圆滑过渡,前风窗与水平面的夹角一般在 $25^\circ \sim 33^\circ$ 之间,侧窗与车身相平,前后灯具、门把手嵌入车体,车身表面尽量光洁平滑,用平整的盖板盖住车底,降低整车高度……这些措施和设计成流线型的车身,有助于减小空气阻力系数和正面迎风面积,从而减小汽车行驶时受到的空气阻力 $F = (1/2) C_D \rho u^2 A$ (见图4),其中 C 为空气阻力系数、 ρ 为空气密度、 u 为车与空气的相对速度、 A 为水平投影面积。

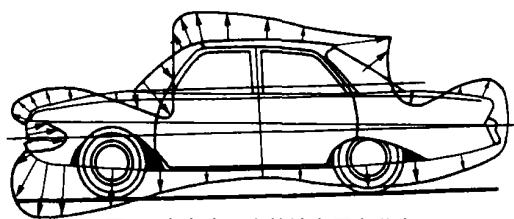


图4 车身表面上的法向压力分布

十、能量转换万能手

汽车发动机常用低压电动机起动,工作时把电能转化为机械能。启动后,汽车发动机带动车载发电机发电,给蓄电池充电,这时电能转化为化学能并储存起来,而蓄电池给电动机供电时,化学能转化为电能。车载蓄电池为汽车上配装的空调、电扇、收录机、CD机及各种用途的电灯供电,于是电能转化为机械能、声能、光能等等。

(邢台市河北机电职业技术学院 054048)

简称超伴子) ”、平行的宇宙, 以及完全出乎意料的现象。

就像发现新大陆一样, 在 LHC 上进行的万亿能标的探索将永远地改变宇宙的版图。但是, 这里仅局限于从 LHC 的角度来观察。对万亿能标物理学的真正领会需要全面把握各种深入细致的信息。随同 LHC 一起, 物理学家为了万亿能标上的发现还提出了另一种粒子加速器, 这种加速器要用不同的粒子, 即要用电子代替 LHC 所用的质子, 还要应用不同的技术。沿着 LHC 指出的方向, 这种直线对撞机将对量子宇宙做出新一轮的发现。

比如, 如果 LHC 实验发现一种希格斯粒子, 或是看起来类似希格斯粒子的某种粒子, 直线对撞机就会跟进并从近处对它进行仔细观察。它是不是真正的希格斯粒子? 它是完全唯一的希格斯粒子, 还是有“亲戚”? 它如何与周围的粒子发生相互作用?

LHC 实验可以很好地确认暗物质的候选者, 暗物质是一种看不见的神秘物质, 它的总重量比宇宙中的可见物质重 5 倍。在 LHC 上发现暗物质将会非同寻常; 直线对撞机还将发现物理学家需要的信息: 它是真正的暗物质吗? 它具有暗物质应该具有的所有特征吗? 它构成了全部暗物质, 还只是暗物质的一部分? 如果 LHC 实验观察到超对称性、额外维度或平行宇宙的证据, 直线对撞机将有能力去发现它们的真正本质。

借助来自 LHC 实验结果的指引, 直线对撞机的研究范围可以覆盖整个万亿能标物理学。它还可以提供另一种独特的能力。在 LHC 上的发现的引导下, 直线对撞机能探测到在远远超过万亿能标的能量上发生的现象的量子效应, 它的作用就像一台从万亿能标到爱因斯坦所梦想的能量区域的望远镜, 在那里所有不同的自然力可能变成一种单一的力。

直线对撞机的设计将允许它探索万亿能标的整个范围, 适合于深入研究在 LHC 上的发现。LHC 所揭示的万亿能标的信息越多, 直线对撞机所能做出的发现就会越多。

在下一代加速器中, LHC 即将建成, 直线对撞机目前正处于建议阶段, 万亿能标的蓝图还需要等待下一代加速器上的实验结果才能最后确定。实验将要对关于这个崭新的科学领域的问题做出回答, 《发现量子宇宙》一文对实验将做出回答的这些问题给出了最好的评价, 这些问题主要围绕下列 3 个主

题: 万亿能标之谜、发现暗物质、爱因斯坦望远镜。

探索将围绕下列 3 个主题。

万亿能标之谜 LHC 理应发现希格斯粒子和其他新粒子。然后, 直线对撞机上的实验就会将这些现象放大, 去发现它们的奥秘。希格斯粒子的性质可以表明存在额外的空间维度或者可以解释为什么物质超过反物质而占优势。粒子相互作用可以揭开被超对称性笼罩着的宇宙的面纱。

发现暗物质 多数万亿能标的物理学理论都包含新的大质量粒子, 这些粒子的性质恰恰是暗物质的成因。这些粒子将首先在 LHC 上产生。然后, 直线对撞机上的实验, 再结合对暗物质专门的探索, 就可以发现它们是否真的是暗物质。

爱因斯坦望远镜 在万亿能标的有利位置上, 直线对撞机可以用作望远镜去探测更高得多的能量。这种发现的潜力超过未来可能建造的任何加速器直接能达到的能标。借助这种方法, 直线加速器就可能实现爱因斯坦的终极统一理论之梦。

二、概述

以电子的发现为起点, 粒子物理学家不断大胆地深入到原子内部的看不见的世界。他们已经发现了一种结构和简单性, 它既非所期待的也不是像预言的那样, 即使是被爱因斯坦预言的。他们的发现, 将宇宙中的最小的元素与最大的东西联系在一起, 并与它诞生的最初瞬间联系在一起, 使人类对物理世界的概念重新进行了定义。

万亿能标之谜 在这个 10 年的后几年中, 在 CERN 的大型强子对撞机上进行的实验将突升到万亿能标, 是目前的加速器所能达到的能区的极限, 物理学家相信, 在那里他们将会找到现代粒子物理学核心问题的答案。

LHC 将会直接在万亿能标进行实验研究。目前的实验表明, 隐藏着一种全新的物质形态——希格斯玻色子, 它能够给粒子赋予质量。除此之外, 物理学家相信, 万亿能标还可能提供诸如暗物质、空间的额外维度以及全新的基本的超对称粒子的花名册这些奇异现象的证据。

首要的目标就是希格斯粒子。在整个过去的这几十年中, 理论的突破和精确的实验已经构建了粒子物理学的标准模型。标准模型预言, 一种无所不在的能量场充满了宇宙, 它会触及其中的所有东西。就像一种看不见的量子液体, 它充满了空间的虚空,

现代物理知识

缓慢地移动并给物质赋予质量。若没有这种希格斯场,则所有物质都会坍塌,原子会以光速飞逝。

到目前为止,还没有人见到过希格斯场。为了探测它,粒子加速器必须首先产生希格斯粒子,然后再测量它们的性质。LHC 的设计能量足以产生希格斯粒子,并能开展这个发现的过程。

为了确定希格斯粒子究竟是如何起作用的,实验物理学家必须在不借助理论假设的前提下精确地测量希格斯粒子的性质。这种精确的、不依赖模型的实验正是直线对撞机物理学的特点,而在 LHC 这种复杂的实验环境中是做不到的。直线对撞机能够确定在 LHC 上发现的希格斯粒子是否是唯一的一种希格斯粒子。它是否恰恰精确地具有能给基本粒子赋予质量的这种性质?或者它是否包含其他新型粒子的混合物,预示着更进一步的发现?直线对撞机将会在 1% 量级的准确度上对希格斯粒子的重要性质给予完全而精确的确定。

然而,希格斯粒子的发现将带来一个令人困惑的新问题:根据我们目前的认识,希格斯粒子本身具有的质量应该超过万亿能标的万亿倍。既然希格斯粒子能给万亿能标的粒子赋予质量,它自身的质量就应该比这大得多。为什么希格斯粒子的质量也在万亿能标呢?

多年以来,理论物理学家设计出包括超对称性、额外维度以及新的粒子相互作用在内的多种可能性,设法解释这个奥秘。如果存在的话,哪个理论才是正确的呢?要把它挑选出来,就是 LHC 和直线对撞机的任务了。LHC 将具有足够高的能量去探测万亿能标的图景。然后,直线对撞机就可以将之放大,再将一种理论和其他理论区分开来。

例如,超对称理论和额外维度理论预言,新粒子与希格斯粒子联系紧密。这些粒子中有一些在 LHC 上是难于探测或难于加以确认的,而且也难以与希格斯粒子本身区分开来。直线对撞机实验将具有独特的能力使得物理学家能确认这些粒子,并查明它们与普通物质之间有何联系。

万亿能标可能具有更多的粒子物理学的最基本的问题的答案。宇宙中物质超过反物质占优势仍然是个谜,但是部分答案可能就存在于对物质和反物质略有不同的未发现的相互作用之中,在物质-反物质不对称之源中,物理学家称之为 CP 破坏。在 LHC 上难于推断出有关万亿能标物理学的 CP 信

息。然而,在直线对撞机实验中却能够探测到并测量出物质-反物质不对称的新的根源。

绘制万亿能标的蓝图,当复杂的理论框架与实验数据面对面的时候,它将引导物理学家深入到新的科学领域。从这种理论与实验数据的冲突中,将会展现发生了深刻变化的一幅量子宇宙的图景。

发现暗物质 刚刚过去的 10 年见证了这个人人的发现,即宇宙的 95% 不是由普通物质构成的,而是由未知的暗物质和暗能量构成的。天文观测已经证明,宇宙只有 4% 是由地球上这样的物质构成的,73% 是暗能量,还有 23% 是暗物质。

暗能量是一种充满了太空的虚空的神秘的力,它正加速宇宙的膨胀。物理学家不知道暗能量是什么,它如何起作用,或者它为什么会存在。但他们确实知道,它最终将具有一种粒子物理学的解释。暗能量与希格斯场有联系吗?超对称性的发现将会提供一种可能的联系,超对称性为希格斯场和暗能量这两者提供了一种自然的背景。

已经有很多渠道为暗宇宙提供了确切的证据,这其中包括对星系团的天文观测,如果可见物质是使它们保持在一起的唯一的東西,那么它们可能已经彼此飞离。比如近在我们的发源地银河,只有可见物质并不能使恒星保持在它们的轨道上。暗物质使宇宙结合在一起。

使星系结合在一起并使宇宙免于彼此飞离的暗物质究竟是什么?尽管暗物质与世界的其余部分不是由同一种材料构成的,但物理学家也掌握了关于它的身份的线索。宇宙学测量支持“冷”暗物质,即以低速运动的重粒子是其主要成分。然而迄今为止,宇宙的暗的一面仍然是个谜。

此外,没有理由认为暗物质应该比具有多种夸克和轻子的可见物质更简单一些。新粒子一般不会单独出现。比如,1932 年正电子的发现就成了反物质粒子的新世界出现的一个信号。当今面临的挑战是,要通过在实验室中制造出的暗物质粒子来探索暗物质的世界。

宇宙学计算表明,如果暗物质是由大质量的粒子(有些类似重中微子的东西)通过弱相互作用组成的,它们就会具有万亿能标的质量,处于 LHC 和 ILC 的能区范围内。同时出现在万亿能标,这是个巧合吗?虽然发展的动机不同,但大多数万亿能标的物理学理论都假定,粒子是促使暗物质形成的因

素。比如,一个常常被引用的暗物质的候选者——中性微子,就是质量最小的超对称粒子,理论上它处于万亿能标。LHC 和 ILC 有潜力制造与宇宙中现存的暗物质相同的暗物质粒子。

除了加速器实验,其他深埋于地下的高灵敏度的探测器实验也在观测单个的暗物质粒子。天文实验正在依次寻找暗物质湮灭时在空间留下的宇宙残骸。然而,没有加速器实验的帮助,任何这些实验也不能断然确定暗物质。

加速器实验将能够使暗物质归其本位。例如, LHC 可以在粒子碰撞中确认暗物质的候选者,然后直线对撞机就能将它放大,从而确定它的质量和相互作用的强度,获取它的特征并给出明确的鉴定。借助在这个能量标度上可以精细调节的扫描,直线对撞机也可以筛选出隐藏在 LHC 对撞的多种粒子中的暗物质的潜在候选者。

直线对撞机的测量使得计算宇宙中暗物质候选者的密度成为可能。与此并行,更加深入和精确的宇宙学观测会将暗物质的密度测量到一个相应的准确度。对撞机与宇宙学测量的吻合将提供一个不可否认的证据,证明候选粒子确实就是暗物质。



图 1

爱因斯坦望远镜 临终前,爱因斯坦在病榻上要了一支笔和一张纸,进行他的统一场论的计算。他告诉一位朋友:“我对此持乐观态度,我想我正在逐渐接近它。”

与爱因斯坦一样,当今的粒子物理学家的梦想是发现一种单一的描述统一的自然力的理论。在爱因斯坦一个世纪之后,LHC 与 ILC 的能力的结合将保证向着终极理论迈进。

正- 负电子对撞的精确度将使直线对撞机有能力像望远镜那样看到远远超过任何粒子加速器所能直接达到的能量区域。直线对撞机用作望远镜能探测到超过加速器本身万亿倍的能量,物理学家相信

在超高能量的领域内,所有自然力将统一为一种。

作为探测超高能量的望远镜,直线对撞机的能力取决于在过去几十年中所发现的物质的量子性质。这种来之不易的认识给了物理学家一种方法,使他们能够测量在超过加速器所达到的能量范围的现象的效应。

然而,由于缺乏万亿能标物理学的知识,目前超高能区望远镜的图像还不是十分清晰。来自 LHC 和 ILC 的数据将使物理学家拨开眼前的对万亿能标的未知的云雾,并使得直线对撞机能够像一台望远镜那样去探索未知的领域。

在目前对宇宙的认识中,大尺度的规律与小尺度的规律并不一致。是否有可能使引力(大尺度的规律)与量子理论(小尺度的规律)协调一致,从而处理这个现代物理学中的核心问题呢?

物理学家相信,大爆炸之后只存在单一的一种力。随着宇宙的冷却,那种单一的力分裂为我们今天所认识到的 4 种力:引力、电磁力、强核力和弱力。物理学家已经发现,在描述这 4 种力中的 3 种时,所用的力学定律和原理都惊人地相似。但是,在迈出将引力也纳入其中的这最后一步时,这种思路却失败了;某些关键的要素丢失了。

弦理论是将大尺度的规律与小尺度的规律统一起来的最有希望的候选者。这种理论认为,所有粒子和力都是微小的振动着的弦。弦的一种振动使它成为一种夸克,而另一种振动就使它成为一种光子。弦理论带来了包括超对称性以及空间的额外维度在内的大量引人注目的概念。在 LHC 的最激动人心的可能性中,发现已知粒子的超伴子是有可能的。

理论物理学家还不能预言,如果额外维度的证据存在的话,它将会在什么能量处出现。直线对撞机的灵敏度,使得它将可能在较长一段时间中,也许是永远,成为物理学家在量子引力、额外维度和弦物理学方面可能具有的最好的窗口。

物理学家可借助直线对撞机集中研究力和质量这二者在何处可以统一起来,用超对称性同时把包括大尺度的规律和小尺度的规律结合为一种理论。

三、发现的画面

本节介绍列于表中的 9 种在大型强子对撞机(LHC)和国际直线对撞机(ILC)上发现可能出现的场景。确切的场景取决于自然的选择,但是其间的

如果 LHC 发现	ILC 所能做的	相关问题	问题的说明
希格斯粒子	发现希格斯粒子为什么存在以及它的兄弟姐妹是谁, 发现额外维度的效应或物质- 反物质不对称的一种新的根源。	1, 3, 9	1. 存在尚未发现的自然原理, 即新的对称性和新的物理学定律吗? 2. 我们怎样才能解开暗能量之谜? 3. 存在额外的空间维度吗? 4. 所有的力都会统一成一种吗? 5. 为什么存在这么多粒子? 6. 暗物质是什么? 我们如何在实验室中产生它? 7. 中微子在向我们揭示什么? 8. 宇宙是如何形成的? 9. 反物质到哪里去了?
超对称伙伴粒子	探测超对称粒子的对称性, 揭示暗物质的超对称本质, 在超高能量处发现力的统一以及物质的统一。	1, 2, 4, 5	
额外维度的证据	发现额外维度的数目和形状, 发现是何种粒子在额外维度中运动, 并在其中确定它们的位置。	3	
弱相互作用的重粒子丢失的能量	发现它作为暗物质的特性, 确定它能对总的暗物质的多大份额负责。	6	
以稳定态出现的带电重粒子	发现这些粒子最终衰变为非常弱的相互作用的粒子, 鉴定暗物质粒子。	6	
Z 粒子, 代表一种未知的自然力	发现 Z 的起源, 将这种新的力与中微子和夸克、希格斯粒子和夸克或者与额外维度的统一联系起来。	4, 7	
符合超引力预言的超伙伴粒子	发现来自超弦的振动的迹象和效应。	3, 8	

关系是明确的。研究者在 LHC 上做出的发现越多, 直线对撞机做出发现的潜力就越大。每个独立事件的研究都显示在下一代粒子加速器上进行的实验将要如何处理粒子物理学的基本问题。

1. 希格斯粒子是与众不同的

在 LHC 发现希格斯粒子将标志着向解决万亿能标物理学的矛盾迈进了一大步。但是, 希格斯粒子的发现将提出比探测希格斯粒子本身更具挑战性的关于它自身的谜题。比如, 理论表明希格斯粒子是物质粒子, 但是, 在很多方面希格斯粒子的行为与其说是一种粒子倒不如说它更像是一种新的力。这怎么可能呢? 实际上, 希格斯既不是物质也不是力; 希格斯恰恰是与众不同的。

物理学家猜测存在很多种的类希格斯粒子: 毕竟, 为什么希格斯就应该是这些类粒子中唯一的一种呢? 他们预言, 与希格斯有关的新粒子在宇宙学中扮演着重要的角色, 是它赋予了宇宙今天所具有的形状。如果存在许多种的类希格斯粒子, 它们彼

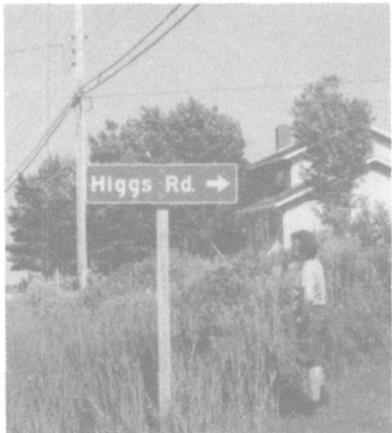


图 2

此间就应该相互作用。感谢量子理论, 一旦希格斯被制造出来了, 它包括了一点它的类希格斯的兄弟姐妹。直线对撞机上的实验会将希格斯放大并去发现这些最内在的秘密。



图 3

2. 反物质的短缺

宇宙中的物质超过反物质而占优势, 这仍然是个谜。希格斯粒子的家族可能与这个问题有着深刻的联系。

物理学家相信, 在大爆炸之后的那一刹那, 对希格斯来说宇宙炙热得没法完成赋予质量的工作。不久, 宇宙足够冷却, 希格斯可以开始工作了。在已知的物理学定律中, 这种解释提供了几乎足够多, 但并不充分的机制, 去产生物质与反物质之间的不平衡。看起来是未知的物质- 反物质不平衡的一种更强的根源和另一些相互作用, 诸如希格斯与其他类希格斯粒子间的相互作用。

在研究这个画面时, LHC 可以通过发现多种希格斯粒子或者揭示其他证据(比如超伴子)来完成第一步。然后, 直线对撞机实验就能发现物质超过反物质而占优势的一种新的根源。

3. 勾勒暗宇宙

在明尼苏达州地下的一个深深的旧铁矿,CDMS II实验正在用高灵敏度探测器寻找来自宇宙空间的暗物质粒子留下的轻微的痕迹。同时,天体物理实验正在寻找宇宙的其他地方暗物质粒子湮灭时产生的宇宙辐射。来自这些暗物质探测实验中的任何一个信号将会给出暗物质性质的景象,并且强烈地激发在LHC和ILC上寻找暗物质。

实际上,物理学家已经报道了在寻找暗物质的实验中的信号的尝试性线索。遗憾的是,由于被两朵未知的乌云笼罩着,所以对这些实验的解释是不确定的。天体物理中,暗物质粒子在星系的空间分布和速度的不确定性使我们无法解决暗物质粒子性质的不确定性。



图 4

通过发现暗物质粒子的精确性质,ILC对解决这些不确定性是至关重要的。暗物质探测器的分辨率可以为暗物质的分布提供精确的探针。正如传统的望远镜已经勾勒出了清晰的宇宙的地图,直线对撞机数据与其他实验和观测的结合将勾勒出暗宇宙的图景,使宇宙的结构散发出光芒。

4. 探索 额外维度

空间额外维度是弦理论的一个预言,它的发现将显著地改变时间和空间的概念。空间的每一点将有额外的空间维度附加在上面。额外维度可能会非常微小,或者会隐藏在视野之外。物质可能由已经生活在额外维度之中并感受其影响的粒子构成。在额外维度中运动的粒子可能具有额外的能量,使它看起来像它自身的一种更重的形式。对这些粒子的质量和其他性质的测量将会显示出额外维度看起来是何种样子。

如果新的额外维度在万亿能标上存在,LHC 将会发现它们;实验将寻找高能量碰撞,在那里粒子会完全消失并变成额外的维度。直线对撞机通过探

测普通粒子行为中微小的扰动可以发现更微小的额外维度。直线对撞机可以确定维度的数目、它们的尺度和形状,以及有何种粒子生存其间。

5. 实验室中的暗物质

宇宙的4%是熟悉的物质,23%是暗物质,其他的是暗能量。虽然宇宙中的暗物质已经是众所周知的了,但是它的身份完全是个谜。

物理学家已经提出了许多命名奇特的暗物质候选者:中性伴随子、轴子、引力子、胶子球、以及弱作用暗物质粒子(WIMPzillas)。简而言之,大多数理论研究假设,所有暗物质都是由单一的一种新粒子构成的。但是,如果暗的宇宙和可见的世界一样是丰富多彩的,那么可能有一天这种假设看起来就会像古代的地、空气、火和水的理论一样简单了。

LHC和ILC的一个主要目标是,通过在实验室中产生暗物质的粒子并研究其性质以确认暗物质的一种或多种形态。天文物理证据表明,万亿能标将揭示出暗物质粒子。现在对粒子物理学和宇宙学的认识使得物理学家能外推回到宇宙历史的早期。假设暗物质粒子是大爆炸的弱相互作用的残骸,物理学家可以用观测到的暗物质密度去估算其粒子的质量。在许多不同的理论框架中所做的详细的计算表明,暗物质粒子的质量被认定在万亿能标上。

在LHC上工作的物理学家很可能找到万亿能标上暗物质的第一个证据。但是,它真的是暗物质吗?它是全部暗物质吗?它为什么在那里?直线对撞机对回答这些问题将是至关重要的,它可以对暗物质粒子以及它们与其他粒子的相互作用进行精确的测量。直线对撞机实验可以确定本节的暗物质故事中的是什么和为什么的问题。

6. 超对称性

爱因斯坦统一理论之梦的一个主要障碍是大尺度的规律和小尺度的规律间的冲突。量子力学揭示了一个不守规矩的亚原子世界,粒子形成“气泡”、虚无缥缈,然后消失。在宇宙的尺度上,我们看到恒星和星系按照永恒的引力定律平稳地运动。为了协调明显的矛盾,必须存在给量子宇宙带来秩序的新原理。超对称性是弦理论的一种预言,它可能成为关键之点。

超对称性认为所有已知的粒子都存在更重的超对称伴随子(简称超伴子),即能给亚原子世界带来秩序的新粒子。最轻的超伴子很可能就是暗物质的

一个候选者, 因此也许还能解释宇宙的结构。超对称性甚至还能解释希格斯粒子的存在, 并存在许多类希格斯的兄弟姐妹。

LHC 也许能够大量产生一些最重的超伴子, 然后它们就衰变成最轻的超伴子和许多普通的粒子, 在粒子探测器中留下壮观但却复杂的信号。直线对撞机最适合制造较轻的超伴子。直线对撞机实验可以一次集中研究一种超伴子, 测量它们的性质, 洁净得足以研究超对称性的对称性, 并揭示暗物质的超对称本质。用这种方法, 物理学家在直线对撞机上可以发现, 超对称性是如何同时塑造了宇宙内在的运行机制和宏伟的构建。

7. 物质的统一

在日常世界中, 力使物质四处运动并使其东西分开。在亚原子世界中, 力也能够将一种基本粒子转变成另一种。这种转换表明, 组成物质的粒子是以基本却又神秘的方式联系起来的。一种可能性是, 在大爆炸时期只有一种物质粒子, 然后随着宇宙的冷却, 这种粒子呈现出很多种看起来不同的形式。这可能意味着, 目前已知的 45 种不同的物质粒子实际上是同一种粒子的不同姿态, 这种思想被称为物质的统一。

如果在 LHC 上发现超伴子, 物理学家就能够对物质统一进行最后的检验。由超对称强加的粒子质量和相互作用的有序的模式可能会提供构建物质的新方式。特别是, 这些模式将会把万亿能标的测量与可能会出现物质统一的高得多的能量上的测量联系起来。直线对撞机的实验具有探索这种联系的精度, 就像一台望远镜那样聚焦于大爆炸的最初瞬间。

物质的统一的发现将是意义深远的。它意味着, 所有普通物质最终都将土崩瓦解, 标志着宇宙的最终命运。它需要新的基本自然力的存在, 这些力将产生一种奇异的粒子的神秘的变幻过程, 它超越了已经观测到的任何东西。

8. 未知的力

统一、额外维度以及弦理论都预示了新的自然力的存在。在 LHC 探测称为 Z' 的新的重粒子将会发现一种新的力。这将提出引人注目的问题: 这是一种什么样的力? 它为什么在这里? 这种新的力在超高能标度是否与其他已知的力统一起来? Z' 粒子是在一个还是在多个额外维度运动?

直线对撞机实验通过将加速器用作望远镜, 有

能力探测很重的 Z' 。实验将探测重 Z' 粒子对轻的物质粒子对产生的量子效应。直线对撞机数据可以清楚地区分 Z' 粒子的不同起源。例如: 来自统一框架自然地解释了中微子质量起源的 Z' ; 来自统一希格斯粒子与其他物质粒子的框架的 Z' ; Z' 运动进入一维或更多额外维度, 进一步的分析可能会通过找到进入这些维度的其他粒子来证实这一点。

9. 弦的协奏曲

弦理论是统一大尺度的规律与小尺度的规律的最有希望的候选者。它的目标是认识量子引力的本质, 以及与其他自然力和宇宙这二者的联系。在弦理论中, 引力通过它对超对称性的效应与粒子物理学联系起来。如果在 LHC 和 ILC 上发现了超对称性, 物理学家就能够检验弦激发对超伴子的性质的预言。然后, 对这些超伴子的精确测量就能够勾勒出在超高能标度引力和弦的性质。

这就是我们目前认识的最前沿的物理学, 但是基础研究就要看直线对撞机实验对弦的自恰内涵的检验能力了。此处, 直线对撞机的精度是至关重要的, 因为弦效应看起来只与超伴子参数的外推值有很小的差别。对模拟 LHC 和 ILC 数据的综合分析显示, 有可能与潜在的弦振动的基本参数相吻合。这虽然不是直接发现弦本身, 但这种成果将真正实现爱因斯坦的最大胆的愿望。

芝加哥大学物理学家扬基·金 (Young-Kee Kim) 写道: “在罗切斯特大学的研究生院, 我决定研究粒子物理学, 因为对我来说, 它看起来是我所能想像的最令人兴奋的领域, 而且也是为之付出一生的最有益的方式。但那时我从没真的认识到它将会是多么的激动人心。我们曾以为自己已经如此了解了有着夸克、轻子和基本作用力的美丽而有序的宇宙, 但在过去的 10 年里我们认识到, 那只不过是它全貌的很微小的一个部分。占宇宙 95% 的暗物质和暗能量完全是神秘的。一个有待于发现的未知粒子和力的宇宙, 对粒子物理学家来说, 那是令人兴奋的。我告诉学生们, 他们正在参加一场革命, 这不仅仅是粒子物理学的革命, 而且是人类观察宇宙的方式的革命。每一天我们都在离惊人的发现更近一些。正是这些使得我每晚都工作到深夜。”

(北京市中国科学院高能物理研究所 100049)

编译自美国能源部和国家科学基金会编著的《发现量子宇宙》。