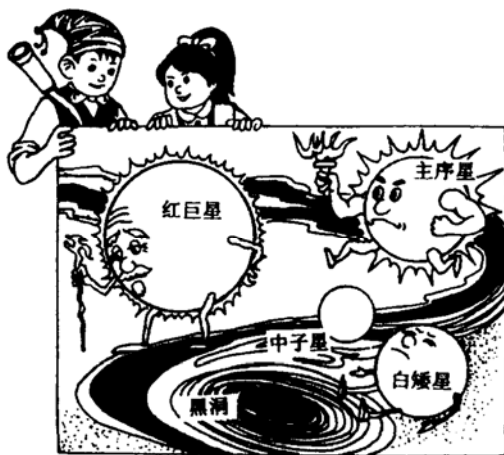


量子宇宙

——21世纪粒子物理学的革命

江向东 黄艳华 译 陈和生 校

编者按:本文编译自美国高能物理顾问委员会(HEPAP)出版的《量子宇宙(Quantum Universe)》一书。它是根据美国能源部和国家自然科学基金委的要求编写的科普读物。微观量子世界和宏观宇宙学研究的交叉对21世纪的粒子物理学提出了严峻的挑战,正孕育着一场深刻的革命。此书论述了粒子物理学面临的9个重大问题,并结合美国高能物理实验研究计划进行讨论。



“量子宇宙”的含义是什么?简而言之,探索宇宙是由什么构成的以及它是如何运作的,是粒子物理学所面临的挑战。量子宇宙展现的是用支配着微观亚原子世界的量子物理学的方法去解释宇宙的这种探索。它描绘了粒子物理学的一次革命,以及我们对宇宙的神秘与美妙在认识上的一次量子飞跃。

宇宙的本质是什么,它是由什么构成的?物质、能量、空间和时间是什么?我们是怎样到达此处,又将走向何方?在整个人类历史上,能力与技巧不断提高的科学理论和实验已经提出了这些关于宇宙的基本问题。业已获得的知识已经引导我们对周围世界的本质有了革命性的认识。

在刚刚过去的30年中,物理学家对支配物质、能量、空间和时间的基本粒子和物理定律已有了深刻的理解。研究者对“标准模型”进行了无数次的实验检验;而且,标准模型的预言一次又一次地被证明是正确的。综合一系列实验和理论上的突破而构建的标准模型,可以作为20世纪真正值得庆祝的伟大科学成就之一。

在当今的物理学中,有一种进展可以与哥白尼(Copernicus)认识到地球不是太阳系的中心相提并

论。令人惊讶的新数据揭示出,宇宙只有5%是由标准模型所描述的普通物质构成的,而95%是由其基本性质仍然是谜的暗物质和暗能量构成的。标准模型的宇宙有序而优美的观点必须与能够解释新现象的更深刻的理论相融合。融合的结果将成为粒子物理学中的一场革命,如同以往有过的任何革命一样引人注目。

粒子物理学正在进行一种世界范围的研究项目,该项目乃是探索神秘而又新奇的科学景致。确定前进之路的,是如下9个关于宇宙起源和粒子世界的基本问题。

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?

量子思想在描述熟悉的物质时是如此地成功,可一旦应用于宇宙物理学却失效了。解决这个问题需要新的力和新粒子的出现,这意味着新的对称性——尚未发现的自然行为的原理——的发现。

2. 我们怎样才能解开暗能量之谜?

弥漫于虚空的空间并使宇宙膨胀加速的暗能量必定具有一种量子解释。暗能量可能与希格斯场有联系,希格斯场是一种充满空间并赋予粒子以质量的力。

3. 存在额外的空间维度吗?

弦理论预言了空间的尚未发现的7个维度,这显然使得粒子物理学的复杂性大大增加。额外维度的发现将会成为人类历史上划时代的事件;它将改变我们对宇宙的起源和演化的认识。弦理论可能重塑我们的引力概念。

4. 所有的力都会统一成一种吗?

在最基本的层次上,宇宙中所有的力和粒子可

能是有联系的,而且,所有的力可能都是单一一大统一力的一些不同的表现形式,从而实现爱因斯坦的梦想。

5. 为什么存在这么多种粒子?

为什么存在3个粒子家族,而它们的质量又是如此明显的不同?基本粒子家族中的模式和变化暗示着将标准模型中的夸克和轻子束缚在一起的尚未发现的潜在的原理的存在。

6. 暗物质是什么?我们如何在实验室中产生它?

宇宙中的大多数物质是未知的暗物质,它们可能是在大爆炸中产生的重粒子。这些粒子中的大多数湮灭后完全转变成能量,同时有一些却保留下来了。这些保留下来的粒子,应该具有可以在加速器上产生和研究它们的足够小的质量。

7. 中微子在向我们揭示什么?

在所有已知的粒子中,中微子是最神秘的。它们在宇宙演化中扮演了一个重要的角色,它们微小的非零质量可能是在很高能量标度上的新物理学的信号。

8. 宇宙是如何形成的?

根据宇宙理论,宇宙开始于一个奇点的爆炸,随后是一阵暴涨。在暴涨之后,宇宙冷却下来,经过一系列的相变,使得恒星、星系和地球上的生命得以形成。理解暴涨需要量子物理学和量子引力方面的突破。

9. 反物质到哪里去了?

大爆炸几乎确实产生了等量的物质和反物质,可是宇宙中似乎并不含有反物质。这种不对称是如何产生的呢?

对宇宙的最基本的问题的探索已经到了关键时刻。进入21世纪,物理学家已经发展了一种描述我们周围的普通物质的特征的粒子和力的权威的学科。同时,天体物理学和宇宙学空间观测已经揭示出,宇宙的图像是不完备的,宇宙的95%不是由普通物质构成的,而是由其他一些神秘的东西——暗物质和暗能量——构成的。我们已经认识到,实际上我们并不知道宇宙的大部分是由什么构成的。

认识这种未知的“新”宇宙有赖决定其基本性质的粒子物理学的发现。强有力的设备的存在使得物理学力所能及。借助天体物理观测,我们可以探测

宇宙的参数;借助加速器实验,我们可以寻求它们的量子解释。现在粒子加速器的能量正在接近大爆炸后的最初瞬间的条件,给我们提供了揭示暗物质和暗能量为何物的方法,并且正在我们对粒子物理学和宇宙的认识上产生一场革命。

为了回答关于宇宙的本质的基本问题,对大爆炸残骸的天体物理观测必定与来自再现早期宇宙的粒子和力的物理实验的数据相吻合。这种研究的两极必须相通。我们将会通过把以各自的方式从最有力且富有洞察力的观测和实验中所了解到的东西结合起来的方法,来回答这些挑战性的问题。

“我们发现宇宙的基本性质的前所未有的机遇已经出现。”美国总统的科学顾问约翰·马伯格(John Marburger)最近说,“技术的最新发展使得这些发现已处于我们伸手可及的范围之内,但是我们需要集中不同的学科力量来抓住这个机遇。”

一、物质、能量、空间和时间的基本性质

世界上现在和将来的粒子物理学实验使得我们能够提出关于支配宇宙的基本物理定律的一组定义明确的问题。这些问题既非常熟悉又具有深刻的革命性,它们确定了21世纪粒子物理学的道路。

从爱因斯坦开始,物理学家就在寻找一种统一理论来解释宇宙中所有基本的力和基本粒子。结果得到了一种极为成功的理论,它将微观物理学的复杂性简化为一组简洁的定律。然而,将同样的量子思想运用到宇宙物理学时,却以失败告终。一些基本的部分丢失了;引力、暗物质和暗能量必定具有量子解释。需要一种新的理论,它能包含标准模型和广义相对论,同时还能解开暗能量之谜。粒子加速器提供了在实验上以物质、能量、空间和时间为契机是实现统一理论前景的方法。

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?

我们发现自然的基本规律的探索揭示了新的物理学定律以及由它们支配的粒子,这些粒子由于潜在的自然对称性而存在,其中的一些对称性自从大爆炸以后就丢失了。在这些丢失了的对称性中,有一种可能就是超对称性。如同每一种粒子都存在一种反粒子一样,超对称性预言对每一种已知的粒子也相应存在一种超对称粒子。作为弦理论的基本部分,超对称性的理论吸引力在于它与暗能量可能有联系。它为暗物质提供了一个自然的候选者:超对

称中性微子(neutralino)。

超对称性的发现以及随后对它的结构以及超对称伙伴粒子(不妨简称为超伴子)的性质的探索,是对粒子物理学实验的直接的挑战。粒子加速器实验将揭示超对称性在统一理论中的作用,并将揭示中微子的超伴子是否能够解释暗物质。

2. 我们怎样才能解开暗能量之谜?

最近,借助望远镜和空间探测器的测量,已经显示一种神秘的力——暗能量——充满了空寂的空间的这种真空,并在加速着宇宙的膨胀。我们不知道暗能量是什么,也不知道它为什么会存在。另一方面,粒子理论告诉我们,在微观尺度上,即使是含有量子粒子的理想的真空气泡,它们也会是暗能量的自然源泉。然而,对真空产生的暗能量的初步计算得出的值,却比我们测量到的量大 10^{120} 倍。需要一些未知的物理过程来消除大部分而非全部真空能量,以留下足够多的真空能去驱动宇宙的加速膨胀。这就需要一种新的粒子物理学理论来解释这种物理过程。

粒子物理学的数据还显示出空寂的空间的另一种神秘成分——希格斯场,它赋予粒子以质量的性质。若没有希格斯场,电子就会以光速飞行,原子就会在瞬间衰变。暗能量与希格斯场有联系吗?超对称性的发现将会为可能有的这种联系提供关键的证据。超对称性既能为希格斯场提供自然的来龙去脉,又能为小而有限的暗能量值提供可能的解释。

3. 存在额外的空间维度吗?

弦理论的革命性概念是,大胆地实现爱因斯坦的梦想,从粒子物理学的最微小的量子到宇宙本身,对一切事物做出最终的解释。弦理论提出所有已知的力和粒子都是一种称为超弦的单一物质的不同振动,从而将物理学统一起来。弦理论用似乎是独一无二的优美的数学结构为物理学带来了量子一致性。

超弦存在吗?弦本身可能小得无法直接观测,但是弦理论做出了许多可检验的预言。它隐含了超对称性,并且预言了空间的7个未发现的维度,这些维度可能会给粒子物理学带来许多不可思议的复杂性。检验弦理论的正确性需要探索额外的维度并研究它们的性质。它们有多少种?它们的形状和尺度怎样?它们是怎样隐藏起来的,为何要隐藏?还有,与这些新维度相联系的新粒子是什么?

4. 所有的力都会统一到一种吗?

在最基本的层次上,或是通过诸如大统一这样的隐藏的原理,或是通过像超弦这样的基础物理学,粒子和力都可能是趋于同一的。我们已经认识到,可以用极为相似的数学定律和原理描述除引力之外的所有已知的力。也许所有的力都是单一大统一力的不同表现,这种力能将夸克与轻子联系起来,并预言了粒子从一种转变为另一种的新方式。像这样一种力最终可能会引起质子衰变,从而导致普通物质不稳定。

5. 为什么存在这么多种粒子?

物理学家已经鉴别了57种截然不同的基本粒子,并且非常详细地确定了它们的许多性质。它们的作用是什么?我们怎样才能知道我们何时已经全部发现了它们?也许这些粒子只不过是单一超弦的不同解释而已。也许它们通过大统一或是其他隐藏的对称性以我们尚未破解的方式联系在一起。大统一乃是用一种简单的原理来解答粒子的复杂特性。

我们已经发现了3代夸克和轻子,基本粒子的代与代之间仅仅是质量不同,其范围从小于一个电子质量的百万分之一到一个金原子的质量。正如量子力学导致了周期表的结构的认识一样,我们期望新理论能对基本粒子的模式做出解释。为什么存在3代粒子,为什么它们的质量差别如此明显?

当今的研究集中于发展粒子世界现有模式的一种具体图像。已经取得了引人注目的进展,特别是描述夸克的。可是,为什么轻子和夸克的模式完全不同呢?在加速器实验中进行的夸克和轻子的详细研究,将给出这些问题的最明晰的解释。

6. 暗物质是什么?我们如何在实验室中制造它?

宇宙中的大部分物质都是暗物质。没有暗物质,星系和恒星就不会形成,生命也不会存在。它使宇宙结合在一起而不破碎。它是什么呢?

虽然在20世纪30年代就提出了暗物质的存在,但只是在最近的10~15年,科学家在认识它的性质方面才取得了实质性的进展,主要是确定了它不是什么。暗物质对宇宙结构的影响的最新观测表明,它与我们在实验室中发现或测量的任何物质形式都不一样。同时,已经出现了可以告诉我们暗物质事实上是什么的新理论。超对称理论预言了与普

通物质的相互作用非常弱的新粒子家族。最轻的超对称粒子很可能是暗物质粒子。我们需要通过在地下探测器中探测暗物质粒子的残骸以及在加速器上制造暗物质粒子来直接研究暗物质，由此我们可以测量它们的性质，弄清它们是如何与宇宙图像相匹配的。

7. 中微子在向我们揭示什么？

中微子无处不在、难以捉摸又令人吃惊，它是宇宙所有已知粒子之中最神秘的。它们与其他粒子的相互作用弱到了如此程度：每秒有几万亿个中微子穿过我们的身体却不留痕迹。太阳以中微子形式发出灿烂的光芒，这些中微子是在作为太阳动力的内部聚变反应中产生的。这些反应只产生一种中微子，但在它们飞向地球的旅途中有的却神秘地变为另外两种。中微子虽具有质量，但最重的中微子也比最轻的带电粒子至少轻 100 万倍。

中微子微小的非零质量的存在，产生了中微子是从未知的、也许是与统一有关的物理学中获得了质量的这种可能性。对中微子性质的详细研究——即它们的质量，它们是如何从一种变化为另一种的，以及中微子是否是它们自身的反粒子——将会向我们揭示出中微子是否与普通物质的模式一致，抑或正引导我们走向新现象的发现。

8. 宇宙是如何形成的？

是什么引起了大爆炸？空间、时间、物质和能量怎么成了我们现在所见的这种形式呢？我们能追溯到过去弄清宇宙的历史吗？

伴随着巨大能量的大爆炸过后，宇宙开始冷却下来，这个过程一直持续到我们这个时代。由此引起的一连串事件是一出多幕的、带有戏剧性的转变以及一大群角色的出现和消失的宇宙剧。早期的几幕是在难以想像的温度和密度下演出的，其舞台是由粒子物理学的基本性质搭建的。这些过程必须被精细调节，才能产生一个能形成我们现在所观察到的星系、恒星和行星的宇宙。是一些尚未发现的基本定律决定了允许我们存在的条件吗？

为了重建宇宙的经历，望远镜和空间探测器探测了早期宇宙的残骸，粒子加速器再现并研究表征宇宙的一些阶段的发展和转换的极端物理学。由于我们开始认识宇宙的去，因此我们能够展望宇宙的未来并预言它的最终命运。

根据宇宙演化的现代理论，宇宙始于一个奇点

的爆炸，随后是一阵暴涨。要理解暴涨，就需要我们对基本物理学、量子引力以及终极统一理论的认识上的突破。尽管暴涨的条件在能量上高得无法在地球上再造，但是我们可以观察它们的讯号，那些从那个时期的残骸物质上遗留下来的经过无数年代传播的讯号，我们仍然可以探测到。

随着膨胀，早期宇宙的各种条件仍然非常极端，它们可以使基本粒子结合成新的物相。在宇宙膨胀和冷却的同时，就像蒸汽凝结为水一样，物质从一种相变化为另一种相的相变发生了。这些相变中的一部分可能是宇宙历史中最富有戏剧性的事件，形成了宇宙的演化，并且留下了我们现在所观察到的残骸。宇宙的相变可以在高能加速器的实验中再造。

9. 反物质到哪里去了？

实验使我们认识到，每一种基本粒子都存在一种反粒子。大爆炸及其后果无疑产生了数量几乎相等的粒子和反粒子。可是，在我们的探测所能达到的遥远的宇宙中，我们的观测显示，我们生活在一个物质的而不是反物质的宇宙中。反物质到哪里去了？在宇宙演化的早期必定逐渐形成了粒子和反粒子间的一个微小的不平衡，否则，它们就会全部湮灭，只留下光子和中微子。物质和反物质间的微妙的不对称必定是造成这种不平衡的原因，在实验室中我们已经观察到了一些这样的不对称。但是，我们关于这些不对称的现有的知识是不完备的，还不足以解释所观察到的物质占优势的这种情况。

必定存在一些其他的尚未发现的现象，使得物质与反物质的行为不同。我们可能会在夸克或者中微子中发现它。其根源可能归咎于希格斯玻色子的性质，归咎于超对称性，或者甚至归咎于额外的维度。

上面提出的这 9 个问题定义了当今的粒子物理学这门科学。回答这些问题是世界范围的研究项目的目标，推动着现在和将来的实验以及新的科学工具的规划。在下一节我们将介绍为回答这些问题所设计的实验。

二、科学革命的工具

粒子物理学界正开始着手一个雄心勃勃的实验计划，朝着在认识物质、能量、空间和时间的基本性质上的革命迈出下一步。粒子加速器实验、宇宙观测和地下实验的注意力都集中于这项研究上。进一

步的发展需要一个强有力的探索计划。本节介绍21世纪粒子物理学的问题的实验计划,讨论不同方法的力度以及设计的想要实现的科学目标。

超弦和大统一是实现爱因斯坦的终极理论之梦的最有希望的思想。认识弦理论需要对它的超对称粒子和额外的空间维度的预言做出实验检验。认识大统一需要实验能探测极其稀有的粒子衰变。要面对大理论与小理论之间的差异,就需要对基本量子物理学有更好的理解。

1. 存在尚未发现的自然原理即新的对称性、新的物理学定律吗?

自然规律来源于自然的对称性;寻找新的粒子和新的力意味着寻找新的对称性。这样的对称性之一可能是超对称性,它预言对每种已知的粒子都存在一个质量相同的超伴子。实验上还未探测到任何一个超伴子;因此,如果超对称性存在,它必定被未知的使超伴子过重的物理学破坏了。超伴子的质量可能与希格斯场有关;超对称性提供了一种自然的暗物质候选者,即中性微子。目前的实验正在寻找超对称性;在美国费米实验室的质子-反质子对撞机 Tevatron 上直接寻找,在日本高能物理研究所(KEK)的 B 介子工厂 Belle 探测器和美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的正负电子对撞机(PEP)的 BaBar 探测器上是间接研究。

Tevatron 可以有足够的能量产生最轻的超伴子的可探测信号。欧洲核子研究中心(CERN)新建的大型强子对撞机即 LHC 应该具有足够大的能量,可以是直接的、也可以通过其他超伴子的衰变产生所有或大多数超伴子,并确定超伴子的质量和衰变模式。

直线对撞机能够非常准确地测量超伴子的性质,证明它们确实是已知粒子的超伴子;它能以很高的精度研究最轻的超伴子(很可能是中性微子)的性质。中性微子的行为与暗物质的相似吗?在直线对撞机上研究中性微子,再结合其他超伴子的精确测量,会对中性微子的宇宙残骸密度做出预言,来确定这些预言是否与暗物质假说相符合。

破坏超对称性的物理机制的理论模型已经由来自 Belle 和 BaBar 的数据所限定。将来在 Belle 和 BaBar 上进行的精确研究,与来自将来的强子 B 介子工厂 BTeV 和 LHC - b 的一样,将会使得物理学家通过 B 介子衰变的微妙改变解开超对称性的味

结构。缪子电子转化实验(MECO)将为 μ 子在核内直接转化为电子提供前所未有的灵敏度;而且,超对称大统一的一些模型预言了 MECO 能观测的这种过程的比率。

2. 我们怎样才能解开暗能量之谜?

暗能量的引人注目的发现表明,空寂的空间充满了随着宇宙的膨胀而增加的神秘的能量。虽然爱因斯坦最初提出了一个能解释暗能量的宇宙常数,但是暗能量的数量是难以理解的。暗能量场的这种自然根源,即真空的量子涨落,所给出的暗能量的密度竟比观测量大 10^{120} 倍。

一个影响深远的计划是适当地研究暗能量的性质。来自威尔金森微波各向异性探测器(WAMP)对宇宙微波背景的振幅和涨落的测量,结合来自世界范围的天文设备的数据,特别是对超新星的测量,显示出暗能量和宇宙常数是一致的。大型巡天观测望远镜(LSST)和暗能量综合观测(JDEM)这两台设备对超新星、引力透镜以及星系团的未来观测将最终揭示,暗能量的行为究竟是与爱因斯坦的宇宙常数类似,还是与宇宙演化中的随时间变化的一些新物质相像。

确定暗能量是什么以及它为什么存在,需要把暗能量的宇宙现实与对微观量子物理学的更好的基本认识联系起来。在微观尺度上,物理学家早就认识到“空寂的”空间并不是空的;它被充满了一种能给夸克和轻子赋予质量的场。在标准模型中,这种场被叫做希格斯场;在 LHC 上做的实验将会发现相应的希格斯粒子。

现在,我们期望伴随着希格斯的是基本物理学的一个全新的部分。这个希格斯部分可能包含许多新的粒子和新的相互作用。最初的希格斯的发现将会出现在 LHC 上;而建造一台直线对撞机对探索希格斯物理学的前景将会是至关重要的。

暗能量可能与超对称性和希格斯部分都有关系,意味着包括希格斯的自相互作用在内的希格斯物理学的量子一致性方面的一种新的重要性。这样的测量将对直线对撞机的实验项目提出额外的挑战,而且可以为探索暗能量的起源奠定基础。

3. 存在额外的空间维度吗?

额外维度的物理效应取决于它们的尺度和形状,还取决于何种物质或者力能够贯穿它们。额外维度的尺度虽是未知的,但它们应该与粒子物理学

的基本能量标度——宇宙标度、暗能量的密度、TeV (10^{12} 电子伏) 量级的电弱标度、或者终极统一的标度——有关。有可能从宇宙观测的不一致或者从短程引力的精确检验来推断宏观尺度的额外维度。更可能的是, 额外的维度是微观的, 在这种情况下, 高能粒子加速器和宇宙线实验是检验它们的物理效应的唯一方式。

LHC 和直线对撞机将会提出关于额外维度的许多问题: 存在多少额外的维度? 它们的形状和尺度如何? 它们是怎样隐藏起来的? 与额外的维度有关的新粒子是什么? 通过制造在额外的空间运动的新粒子, LHC 将对比原子的尺度小 100 亿倍的额外维度有着直接的敏感性。直线对撞机会通过它们对粒子质量及相互作用的小小影响来确定额外维度的数目、尺度和形状。还存在一个机会, 由于额外维度的存在, 微观黑洞也可能在 LHC 上或在甚高能宇宙线中被探测到。

最终, 粒子物理学的探索是要弄清暗能量、暗物质和宇宙暴涨是否受额外维度的物理学的影响。对撞机数据将为这些有着深刻联系的探索提供明鉴。

4. 所有的力都会变成一种吗?

高能粒子物理学实验正在探索弱力与电磁力的统一。这种统一会继续下去吗? 在最基本的层次上, 不论是通过像大统一那样的隐藏的对称性, 还是通过像超弦这样的基础物理学, 粒子和力可能都是有联系的。重要的线索可以来自极其稀有的粒子衰变和其他稀有过程的实验室观测, 还可以来自在极高能量上的精确测量。这种方法上的外延是必要的, 因为我们不知道线索将会从哪里出现。

大统一模型预言, 质子最终可以衰变, 从而导致普通物质不稳定。超级神冈探测器, 在一些大统一模型提议的范围内, 已经具有探测质子衰变的灵敏度。下一代的质子衰变实验将需要地下实验室中的大型探测器。

大统一物理学描述了为中微子提供马约拉纳质量的一种自然机制, 在这种情况下, 中微子是它们自身的反粒子。这种可能性可以通过下一代无中微子双 β 衰变实验发出的明确信号得到证实, 比如在地下实验室中进行的 EXO 或者马约拉纳实验。

在 LEP 和斯坦福直线对撞机 (SLC) 对作用强度的精确测量为大统一提供了详细的证据。与此类似, 在直线对撞机上对 (特大) 粒子质量的精确测量

将允许对大统一的多种物理量进行检验。

最终, 所有基本力的统一, 需要了解量子引力以及与之相关的诸如黑洞蒸发这样的异乎寻常的现象。进展可能幸运地来自 LHC 上的额外维度的发现, 或者来自激光干涉仪引力波观测 (LIGO) 的反常引力波源, 或者来自包括宇宙中微子在内的超高能宇宙线中意外事件的发现。

5. 为什么存在这么多粒子?

物理学已经揭示了基本粒子扮演的许多角色。物质的基本单元夸克和轻子, 结合成质子、中子和原子, 并形成地球上的生命的基础。所谓的规范粒子产生了包括电力、磁力和引力在内的各种力。最近的发现显示出, 还有更多的基本粒子构成了暗物质, 它们充满整个宇宙。在粒子物理学中, 基本粒子是包括新的力和新的物质形式在内的新现象的使者。量子力学指出, 甚至隐藏的维度, 也显示基本粒子的特征。通过测量基本粒子的性质, 物理学家可以推测隐藏的维度的形状和尺度。

到目前为止, 物理学家已经鉴别了 57 种基本粒子。具体而言, 标准模型包括的夸克和轻子已经被划分为 3 代, 差别仅仅在于它们的质量不同。粒子的模式循环 3 遍, 为什么质量有巨大的变化而其他性质却看起来相同, 这仍是一个未解的难题。量子物理学已经表明, 3 代是容纳标准模型中的 CP 破坏的最少的必要数目。由于在宇宙中物质在数量上占优势超过反物质, 因此这种 CP 破坏是必要的, 但是, 到目前为止所观察到的 CP 破坏效应还不足以解释这种优势。目前的实验计划集中于对存在的模式逐步进行详细的了解, 寻找 3 代模式不同的迹象。

Tevatron 上的 CDF 实验和 D0 实验都是测量顶夸克的性质, 从而看看它那巨大的质量是否使它在粒子世界中扮演一个特殊的角色。SLAC 的 BaBar 和 KEK 的 Belle 实验正用它们的数据样本, 包括数以百万计的 b 夸克、c 夸克和 τ 轻子, 精确测量所有这些东西的质量和衰变模式, 以寻找与所预言的它们的衰变模式的细微的偏离。第 3 代粒子即顶夸克、底夸克和 τ 轻子是新发现的最大希望所在, 因为它们的大质量允许它们与尚未发现的物理学最有效地联系在一起。

BaBar 和 Belle 只能研究 2 种类型的 B 介子, 即底夸克与上夸克和下夸克的束缚态。可是很多理论

提出,显著的效应是在它与奇异夸克的束缚态 B_s 里。物理学家目前正在 Tevatron 上研究 B_s 介子的性质。未来的 B 强子工厂 BTeV 和 LHC - b 将以高得多的精度探索 B_s 介子。

实验上很难研究单个夸克的性质,因为它总是与其他夸克束缚在一起。格点计算很有可能计算强相互作用的效应。比如,从实验数据中求解诸如那些描述味混合的夸克参数,格点计算将提供足够的精度。CLOE - c 的实验研究将确立并验证用于重夸克系统的格点计算的精度。

中微子已经开启了一扇研究轻子家族的物理学的令人惊讶的新窗口,因为在标准模型中,中微子是不需要质量的。中微子质量的存在,可能向我们表明了超越标准模型的物理学的一些东西。电子和 μ 子这样轻的轻子的衰变性质可能也含有令人吃惊的东西。MECO 实验提出要寻找 μ 子向电子的转化,该实验对可能影响这种过程的很高质量的物理学来讲,是个灵敏的探针。

6. 暗物质是什么? 我们如何在实验室中产生它?

宇宙中大多数物质是暗物质。暗物质的早期证据来自于星系的旋转曲线,它表明星系包含的质量多于恒星所包含的。更近一些时候,暗物质的直接证据来自于引力透镜——质量使光弯曲的空间区域——的发现和刻画。这些天文约束不能直接区分暗物质的非重子模型(WIMPs)和诸如木星尺度的行星和微型黑洞这样的包含更多大而重的客体(MACHOs)。可是,20世纪90年代的实验确认,MACHOs 对我们的银河系的暗物质含量并没有做出可观的贡献。

对宇宙中的暗物质的最严格的限制来自于宇宙学测量。由 WAMP(以及将来由 Planck 计划)测量的依赖宇宙微波背景(CMB)涨落的频率和振幅对整个物质密度和重子密度都敏感。重子的密度也受早期宇宙的核合成模型的约束。所有这些方法表明,普通重子物质只占总物质密度的一小部分,大约为 5%。

科学家正在用各种方式测量暗物质在宇宙中的分布:(1)比如借助斯隆数字天空勘测(SDSS)来研究星系的大尺度分布;(2)比如借助未来的大型巡天观测望远镜(LSST)和暗能量综合探测(JDEM),通过弱透镜效应研究来限制暗物质的质量幂谱;(3)借助

南极望远镜和阿达卡马宇宙望远镜,利用 Sunyaev - Zeldovitch 效应,把大而重的星系团按红移分类。

什么是暗物质? 粒子物理学模型提出,暗物质或是轴子(假设的与量子色动力学即 QCD 有关的新粒子),或是 WIMP's(假设的新粒子,参与弱相互作用并具有 TeV 量级的质量,是超对称理论或额外维度的自然副产品)。如果暗物质粒子是来自接近完全湮灭的早期宇宙的残骸,只要通过简单的量纲分析就知道,这些粒子起源于 TeV 标度的物理学。暗物质的粒子本性可以通过寻找它们可能在诸如 CDMS 这样的对暗物质灵敏的地下探测器上产生的稀有事例来证实。这种实验可以发现我们的银河系中的暗物质粒子的产物。TeV 标度的暗物质粒子的湮灭可能从诸如伽马射线太空望远镜(GLAST)和高能辐射图像望远镜阵列系统(VERITAS)这样的高能 γ 射线望远镜、或者从诸如 ICE CUBE(建在南极站冰中的一立方千米的国际高能中微子观测站)这样的天体物理中微子探测器中被探测到。在这些湮灭中产生的反粒子也有可能被阿尔法磁谱仪(AMS)探测到。如果暗物质粒子非常重,则它们可能在超高能宇宙线中产生一些信号。

可是,要认识暗物质粒子的真正本质,粒子物理学实验必须在加速器上产生它们并研究其量子性质。物理学家必须发现它们是如何与宇宙的和諧图像相切合的。假设实验者探测流过地下探测器的 WIMP's,它们是什么? 它们是最轻的超对称粒子吗? 是在额外的维度运动的最轻的粒子吗? 或者它们是什么东西吗?

对暗物质粒子的候选者的探索正在目前的对撞机上进行。如果这些粒子的质量为 TeV 标度,就必定会在 LHC 上发现它们。可是,要想证实这些新粒子确实与暗物质有关系,却需要直线对撞机来确定它们的性质。直线对撞机可以精确地测量它们的质量、自旋和宇称。这些结果将被用于计算暗物质目前的宇宙丰度,并与宇宙学观测相比较。如果这些值相符,对粒子物理学和宇宙学都将是一个伟大的胜利,就可以追溯到爆炸后的 10^{-10} 秒,将拓展对宇宙演化的认识。

7. 中微子在向我们揭示什么?

发现中微子具有质量,打开了超越标准模型的物理学的一扇新窗。不引入新粒子,标准模型就不允许中微子具有质量,而引入新粒子就会带来新问

题。实际上,中微子质量的大小与统一理论的预期是一致的,统一理论由于统一本身就需要新粒子。

关于中微子的最紧迫的问题是究竟存在多少种中微子。来自 LSND 的实验结果表明,可能存在超过典型的 3 代。如果真是如此,将需要对现有的认识做出重大的修正。目前正在费米实验室运行的 Mini-BooNE 实验到 2005 年年中将解决这个问题。

即使只有 3 种中微子,问题仍然存在。是什么产生了中微子的质量而且它们的值是什么呢?中微子是它们自己的反粒子吗?不同种类的中微子是如何混合的?回答这些问题需要对中微子的质量和混合做精确的测量。物理学家目前正在 SNO, KamLAND, K2K 和超级神冈实验中研究中微子的混合。2005 年将迈出一大步,那时费米实验室的 NuMI/MINOS 项目将开始在加速器实验中探测 ν_μ/ν_τ 中微子混合。2006 年, CERN 到格兰萨索(Gran Sasso)的长基线中微子项目将要启动。日本质子加速器研究综合体(JPARC)的中微子束将在日本产生。在更远的将来,这些实验以及它们的升级,可能采用一种离轴束或者专用的反应堆中微子实验,可能会告诉我们,中微子部分的 CP 破坏测量是否可行。然后研究者可能利用中微子超级束流或中微子工厂去研究它。如果放置在像美国国家地下科学和工程实验室(NUSEL)这样的地下深处的设备中,这种实验的探测器也可以寻找质子衰变。

加速器和反应堆振荡实验测量质量的差别,质量本身必须由不同的方式决定。如果中微子是它们自身的反粒子,像 EXO 和马约拉纳这样的无中微子双 β 衰变实验就可以用来将电子中微子的质量测量到 0.01eV。无中微子双 β 衰变实验可能会有影响深远的结果,增加了在早期宇宙中物质和反物质会彼此转化的可能性。

8. 宇宙是如何形成的?

对宇宙的去与未来的认识紧紧地缠绕着物质、能量、空间和时间的基本性质问题。当今,最大的与最小的领域之间的紧密联系是显而易见的。

根据宇宙演化的现行理论,宇宙开始于一个“初始奇点”,在那一点,所有已知的物理学定律全部失效。这个奇点产生了一个优美平衡的宇宙,就像一支铅笔笔尖朝下竖立着非常平衡地保持了 140 亿年那样。宇宙是怎样达到了这样一种状态呢?它怎么会变得如此悠久呢?为什么分得再开它也没有破

毁或者坍塌回到它原来的状态呢?

在刚过去的 20 年中,宇宙暴涨理论提出了一个大爆炸之始的使人非相信不可的解释。根据这个理论,加速膨胀的早期产生了我们今天所看到的平衡的宇宙。宇宙暴涨就是使铅笔笔尖倒立而平衡的那只手。作为副产品,它还产生了演化为恒星、星系和星系团以及宇宙中的其他结构的种子。

宇宙暴涨提出的挑战与本报告中的基本问题有关系。一种可能性是,宇宙暴涨伴随着某种形式的暗能量产生,这种形式与我们今天所观测到的暗能量类似。如果真是这样,是何种物质产生了它呢?这种物质形式在统一中扮演一个角色吗?它与额外的维度有怎样的联系?更为基本的是这样一种可能性,在大爆炸之初,空间和时间就改变了它们的本质。弦理论能消除初始奇点吗?大自然究竟选择哪种模型呢?

现在,宇宙微波背景中的涨落的测量,特别是来自于 WMAP 的,提供了支持暴涨的最好的证据。对像宇宙的曲率这样的宇宙参数的限制以及宇宙结构的本质,都明显地和暴涨理论的预言相符。实际上, CMB 的极化测量可以允许暴涨阶段产生的引力波信号的检测,这可能给出有关引起暴涨的标量场的本质的信息。

大爆炸之后,宇宙膨胀并冷却到现在的状态。在这个过程中,宇宙经历了一系列的相变,其间各种各样的粒子如同水受冷冻成冰一样凝固了。这些相变促成了宇宙历史最重要的一些时期。例如,一种相变可以是驱动宇宙暴涨的。相变可能产生诸如弦、结构和其他奇异的物质形式的“宇宙欠缺”,这些或许能解释超高能宇宙线、暗物质,也许甚至是暗能量。

LHC 将能阐释电弱相变,大部分已知粒子由此获得了质量。对这种相变的更好的认识将促使科学家逼近大爆炸本身。当然,电弱相变可能是我们在今天的宇宙中所见到的物质-反物质不对称的终极根源。新粒子和新相互作用的发现将会解释这段经历并将判定它正确与否。此外,宇宙演化的解释必定具体化为任何新对称性或者新维度的发现。

当今,研究得最透彻的宇宙相变是与核力理论量子色动力学(QCD)相关的。在 QCD 相变阶段,现在宇宙中的重子物质是从夸克和胶子的类等离子体

态凝聚而成的。组合成每一个质子和中子的夸克和胶子，通常都是被禁闭在它们所在的这些核子里面的。然而，如果核物质充分地热，则夸克将会被解除禁闭并且脱离核子而转化为炙热、致密的夸克和胶子的等离子体。这种等离子体被认为在“大爆炸”之后一百万秒时曾经充满了宇宙。这种在实验室里以前从未达到过的极端条件下所形成的新物态的发现和描述，将对宇宙的早期状态产生新的透彻的见解。布鲁克黑文国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机(RHIC)设备现在正产生重离子碰撞来研究夸克-胶子等离子体；该实验室计划升级并加强这些研究。格点计算设备所能进行的计算，将进一步深化对RHIC数据和早期宇宙演化时期的条件的认识。

世界上所有元素的合成都涉及核反应。给定恒星物体和灾难性的恒星爆炸中的温度和粒子密度，这些反应常常出现在不稳定的原子核内。稀有同位素加速器RIA将为在陆地研究推进这些事件的核反应提供工具，并将帮助我们了解自然是如何合成这些元素以及在何处合成了这些元素。

9. 反物质到哪里去了？

宇宙演化的一个基本问题是反物质到哪里去了？在宇宙创生时几乎无疑是产生了等量的物质和反物质。可是，随着炙热的早期宇宙汤冷却下来，等量的物质和反物质应该已经结合并湮灭了。可是，过量的物质保留下来形成了构成宇宙的星系和恒星。要在宇宙中优先除去反物质，CP对称性就必定要破坏，从而导致反物质与物质的行为略有不同。实验家1964年在中性K介子中、2001年在B介子中先后发现了CP破坏。

标准模型能够容纳夸克中的CP破坏现象，因为至少存在3代夸克；而且，还由于当它们参与弱相互作用时，在夸克的味之间存在着混合。随同在过去20年中夸克的味混合的大量研究，在BaBar和Belle上的B介子的CP破坏测量都与这种现象符合。可是，现有的CP破坏知识对解释宇宙原始的物质-反物质不对称既不完备又不充分，相差许多数量级。现有的和计划的加速器实验的目标是发现使物质和反物质行为不同的CP破坏的其他根源。它可能出现在夸克或中微子中。它的根源可能归咎为希格斯玻色子的性质、超对称性或者额外维度。

反应中改变夸克味的CP破坏正在奇异夸克(K介子衰变)和底夸克(B介子衰变)中测量。正在进行的和计划的实验包括BNL的KOP10(K衰变),SLAC的BaBar和KEK的Belle(B_d衰变),费米实验室的BTeV和CERN的LHC-b(B_d和B_s衰变)。精确地查明夸克中CP破坏的作用是破解原始反物质命运之谜的关键一步。到目前为止的实验本身表明，标准模型中夸克里的来自味混合的CP破坏可能不是宇宙中观察到的物质-反物质不对称的唯一根源。现有的和未来的B物理学实验将会对超越标准模型的CP破坏源灵敏。

发现中微子有质量，使人们开始在轻子反应中寻找CP破坏。从原则上讲，中微子具有质量能够使物质变成反物质，反之亦然，而且能够改变它们之间的平衡。这要求实验发现中微子在反物质问题中所起的作用。在费米实验室的MINOS实验和以反应堆为基础的中微子振荡实验将测量中微子振荡的参数。如果振荡参数被认可，则大型地下实验的中微子超束设备将在中微子中探测CP破坏。这样一个大型探测器，如果在地下足够深处，比如像深层地下科学与工程实验室(DUSEL)那么深，它也可以服务于下一代的质子衰变实验。

粒子物理学正处于伟大革命的中期。现代数据和现代思想已对由来已久的关于物质、能量、空间和时间的信念提出了挑战。实验观测已经确定了宇宙的95%是由与在最先进的实验中我们看到或接触的任何物质都不同的暗能量和暗物质构成的。理论家找到了一种使引力与量子物理学相融合的方法，但是，前提是假定有超过我们熟悉的4维时空的额外维度。

随着当今革命的重要性变得日益明显，粒子物理学这门科学的前进道路已经明确。新数据和新思想不仅对旧的思维方式提出了挑战，还指出了需要取得进展的一些步骤。许多进展已经在我们目前计划所及的范围之内；其他的也指日可待。对重大问题的认识正在达到一个全新的层次。我们非常幸运地生活在这样一个时代。我们应当抓住这个机遇，接受这个挑战。

(编译自美国能源部和国家科学基金会编著的《量子宇宙》)

(北京 中国科学院高能物理研究所 100049)