

# 隐性的粒子世界

(北京大学 来小禹、徐仁新 编译自 David Curtin, Raman Sundrum. *Physics Today*, 2017, (6): 46)

至今尚未发现的神奇粒子事件将揭示自然界最深奥的秘密。

为何存在物质而非虚空？这一问题既有深度又有广度，似乎超出定量刻画的范畴。而又令人惊讶的是，该问题可在粒子物理框架内描述并至少部分地解答。

标准模型(standard model, SM)是描述物质及其相互作用的基本理论。几十年来，以相对论量子场理论为基础而建立的这个理论体系经受住了高能对撞机的各种实验检验。然而，依据如下三方面的分析，我们会发现SM并不能解释宇

宙中所有的物质。

首先是等级问题。宇宙中物质大多聚集形成丰富的结构而非塌缩成黑洞，这表明我们所熟知的粒子都极其轻，局部引力很弱。SM中的希格斯理论要求，基本粒子的质量小于电弱质量(几百  $\text{GeV}/c^2$ )。然而，如果考虑引力，电弱质量却受到普朗克质量( $10^{18} \text{ GeV}/c^2$ )量级的修正。这两个能标的巨大差异称为“等级问题”。人们试图用新物理来解决等级问题，包括超对称、希格

斯玻色子有结构等。这些理论预言大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)上会有新物理的信号。

其次是正反物质不对称问题。经过宇宙极早期的动力学演化，每十亿个正反粒子对最终会多出一个正粒子。这一微小的超出构建了我们的今天的世界。因为SM给出的超出要小好几个数量级，所以正反物质不对称问题也依赖于未知的粒子和相互作用。为此，理论物理学家已经提出了一些可能性，包括新的希格斯玻色子和修正的希格斯耦合等。这些都可能被LHC探测到。

再者是暗物质本质的问题。综合天体物理和宇宙学的若干观测证据显示，暗物质构成了宇宙中约80%的物质。暗物质是什么？它跟SM有什么联系？我们还没有明确的答案。流行的观点认为，暗物质与普通物质之间有微弱的相互作用。持这一看法，人们可以直接(利用核反冲装置)或间接(在宇宙线中寻找暗物质湮灭为SM粒子的证据)测量暗物质粒子(图1)。

这三个问题驱动着粒子物理的实验和理论研究。为揭示这些奥秘，实验搜索正在努力开展，但只得到零结果。这并不意味着毫无发现。相反，零结果可引导我们认识宇宙的另一面——可能的隐性部分：完全不一样的粒子和作用力，跟SM仅微弱耦合。这些新粒子并非无关紧要，而是有助于解决以上三大难题。它们表现微妙且不易发现，而人们只能依据它们的隐性特

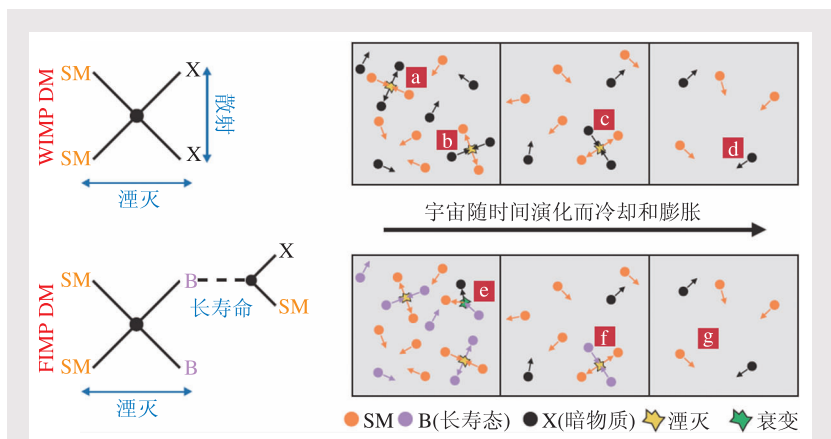


图1 在早期宇宙中，暗物质(DM)粒子的热能比静能大得多，此时标准模型物质(SM)与暗物质(X)处于热平衡，即：过程(a)  $\text{SM} + \text{SM} \rightarrow \text{X} + \text{X}$  和其逆过程(b)的反应速率相等。随着宇宙的冷却，标准模型粒子的碰撞再也没有足够的能量产生重的暗物质，但是X仍然会湮灭为SM(c)。因此，暗物质的量急剧减小。当宇宙继续冷却到更低温度，暗物质变得太稀疏而无法湮灭为SM，所以会冻结并留存到今天(d)。暗物质与标准模型粒子的耦合程度，既决定了暗物质在早期宇宙中的湮灭速率，又决定了暗物质散射标准模型粒子的截面。前者影响暗物质的残留丰度，而后者影响人们对暗物质的直接探测。不同于流行的弱相互作用大质量粒子(weakly interacting massive particle, WIMP)，微弱作用大质量粒子(feebly interacting massive particle, FIMP)并非一开始就存在，而是由长寿命粒子B衰变产生。粒子B与标准模型粒子在早期宇宙中处于热平衡，但是B粒子也会衰变为SM和X(e)。即使宇宙极早期的年龄比B粒子的寿命小得多，仍然有一小部分B粒子会衰变，所以暗物质的量一直在增加。随着宇宙的冷却，B粒子几乎完全湮灭为标准模型粒子(f)，之后暗物质一直保留下来(g)。FIMP版本中暗物质的残留丰度由B粒子的寿命决定，其典型值为毫量级

征来探测它们。不可见的长寿粒子(long-lived particle, LLP)可在对撞机中产生, 并且行走一段距离后衰变成 SM 的高能粒子。我们能捕捉到这种事件吗?

### 两个世界的故事

物理学家建造 LHC 的原因之一, 就是为了探究高于 SM 能量尺度的新物理。然而, 新物理的隐蔽性可能不是因为质量太大, 而是源于跟 SM 的极弱耦合。我们用“隐性部分”这个术语来表示这些另类的非 SM 物质和力, 它们往往可在量子场论框架内存在。

人们其实早已研究过跟其他粒子微弱耦合的粒子, 如中微子。中微子几乎没有质量, 只参与弱相互作用。虽然泡利在 1930 年代就预言了中微子的存在, 但直到 1956 年中微子才被直接探测到。中微子具有质量, 并且不同味道之间可以振荡。SM 不能解释这一性质。幽灵般中微子的发现仅仅是个开始, 未来可能还有更多难以捉摸的粒子困扰我们呢。

隐性部分粒子态可能与 SM 粒子态之间存在虽小但不为零的耦合, 其中最重要的耦合方式显示在图 2 中。人们有理由相信这些耦合非常小。例如, 对称性带来的选择定则使得 SM 态和隐态之间的相互作用只能通过一种重中间态来实现。某些 SM 态也可能作为中间态, 比如光子和希格斯玻色子。与中微子振荡类似, 光子有可能转变为隐光子进而与隐态发生作用。希格斯玻色子拥有足够大的质量, 它可能直接衰变为隐态(这种异常衰变可能是产生隐态粒子的主要途径)。

隐性部分中的重粒子虽然单独

存在时稳定, 但仍然会衰变为 SM 粒子。不过, 由于耦合非常弱, 所以这类衰变时标很长。这使得 LLP 和它们独特的衰变行为符合隐性部分的特征。

### 搜寻粒子

为了解长寿粒子 LLP, 我们必须知道它们在何处产生。不同于暗物质或宇宙线, 人们有望在对撞机中产生 LLP, 并测量它从产生到衰变的距离。利用 LHC 来寻找 LLP 是探索新物理的一种可能途径。

如果 LLP 的质量小于电弱质量, 它们可能在比 LHC 能量低的对撞机中产生。而如果中间态或隐粒子的质量大于弱电质量, 人们就需要通过 LHC 来研究它们。LHC 在 2025 年左右升级之后, 对撞数可以比现在提高一个量级, 并计划在 10 年内得到一亿个希格斯玻色子。新物理的某种机制认为, 这些希格斯玻色子将足以产生大量的 LLP。正如 1950 年代核反应堆产生的大量中微子流为人们直接探测中微子铺平了道路, 如今高能量、高亮度的对撞机为我们认识未知的隐性世界提供了前所未有的机会。当然, 前提是我们的方案是正确的。

LHC 上虽然会产生大量的强子, 但 LLP 的衰变信号是不同的。从虚空中产生能量的事件明显不同于对撞点处产生普通粒子。与 SM 粒子耦合很强的其他未知粒子具有

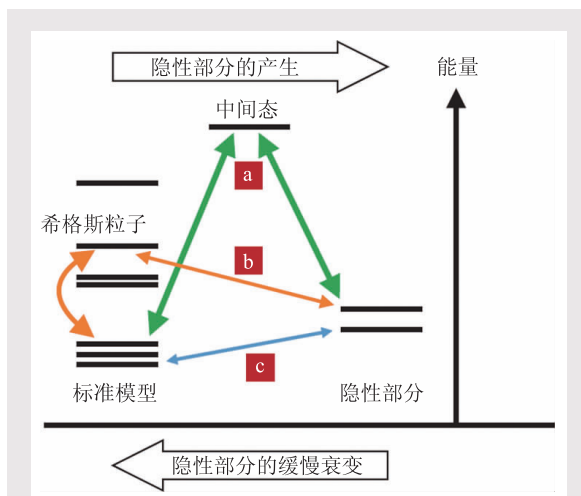


图2 通往隐性部分的路径。此图显示了可能的隐态和标准模型态的能量。带颜色的箭头代表了态之间可能的跃迁。在大型强子对撞机上, 隐态可能通过以下三种途径产生: (a)重中间态; (b)希格斯玻色子异常衰变; (c)微小的直接耦合。隐态一旦产生, 它们也通过同样的路径衰变。因为直接耦合很小, 所以隐态的寿命很长。由于激发中间态或希格斯玻色子需要很高的能量, 根据海森伯不确定性关系, 也可推知隐态的寿命很长

很高的产生率, 并且这些粒子在对撞点附近将很快衰变, 这使得我们可以从 SM 背景噪声中找到它们。LLP 的产生率则低得多。不过由于其背景比 SM 背景低得多, 所以 LLP 的衰变信号会很显著。虽然 LHC 实验已经开始寻找 LLP, 但是为了覆盖全部可能的质量、寿命以及产生过程, 还有很多工作需要做。

### 展望

我们正处于一个令人兴奋的旅程。这个时代的加速器 LHC 工作在 TeV 尺度, 而理论和实验研究都暗示着 LHC 运行能量附近会呈现新物理。迄今的零结果并非否定那些线索, 而只是指引我们勇敢地走向隐性的新世界。借助 LHC 提供的难得机会, 我们还需要做大量工作。如果必要的搜索及探测器想法得以实施, 我们有理由期待未来伟大的发现。