

# 弦论小史 (一)

李 淼



阅读费曼的物理学讲义，我们注意到作者一开始就提出一个有趣的问题。为了预防未来的一场毁灭性灾难不让人类文明就此终结，如果我们只能给未来的智慧生物留一句话，那么这句话应该是什么？费曼提出他的答案：物质世界是由永恒运动着的原子所组成，当这些原子分开时，存在吸引力，当这些原子靠近时，又存在排斥力。

注意，这里不含任何物理学原理，如量子力学的测不准原理、相对论的光速不变原理。费曼的那句话又和一些原理有关，是人类关于我们这个世界目前所知的最基本的事实。原子的运动是永恒的，这含有惯性原理以及某种程度上的测不准原理。当原子之间的距离足够大时，主导的力是吸引力，这解释了地球上所有物体为什么具有一定的凝聚性，例如水这样的液体，石头、木头这样的固体，同时又解释了地球本身为什么是一个整体、太阳系为什么是一个整体、银河系为什么是一个整体。当原子之间的距离变得很小时，主导的力变成排斥力，这解释了我们看到的许许多多的物体为什么具备稳定性、没有在一夜之间塌缩，等等。我们还可以从费曼的那句话中推出热和热传导……

所以在费曼看来，人类文明迄今为止所发现的关于世界最重要的事情是还原论。世界虽然在表面看起来多种多样，其实还原后是简单的，只有分子和原子。当我们继续追问下去的时候，我们发现有很多种原子。这些原子可以被继续还原成电子和原子核。而原子核可以还原成质子和中子，后者又可还原成夸克和胶子。

到了夸克、胶子和电子，人们似乎走不下去了。也许世界是由这些最基本的“砖块”码成的，除了这些砖块之外，还有一些类似的、但不常见的砖块。那些砖块需要特殊的仪器才能被我们看到，例如高能加速器。在高能加速器上，我们可以看到类似电子的 $\mu$ 子，他们看起来非常像电子，只是质量和寿命不同。除了这些看起来像电子的粒子外，还有中微子，对所有物体有最好的穿透力。用专业术语说，

中微子和所有其他粒子的相互作用非常微弱，所以它们可以轻松穿透物体，包括整个地球本身。

中微子为什么能够轻松地穿过物体？因为它们和其他粒子（如电子和质子）之间的相互作用是通过一种我们很难看到的粒子来传递的。这些粒子相比其他粒子来说质量很大，所以能够传递的力很快就随着距离变小了，加之这些粒子本身也极其不稳定，很快就会衰变成其他粒子。这些粒子叫中间玻色子。

将所有以上提到的粒子加起来，它们组成一个和谐的家庭。这个家庭目前只有一位非常重要的人物缺席，换句话说，我们的仪器还没有强大到可以看到这位重要人物，它的专业名字叫希格斯粒子。这个粒子至今还没有被看到的原因有两个，第一它的质量很重，可能是中间玻色子的一倍多到两倍，甚至更重。第二，希格斯粒子和其他粒子的相互作用也很弱。希格斯粒子的命名来自于它的父亲之一，彼得·希格斯。1964年，除了希格斯之外，另外五名物理学家，分成两组人，也在理论上提出了它的存在的可能。所以，有些喜欢八卦的人很担心如果将来在某个仪器上，如今年将要运转的大型强子对撞机上，发现希格斯粒子，彼得·希格斯有可能获得诺贝尔物理学奖，因为诺贝尔奖不能同时奖给三个以上的科学家。

为什么希格斯粒子这么重要？因为如果没有它，许多粒子不会有质量，特别是电子和中微子这些叫做轻子的粒子。质子和中子的质量只有一小部分来自于希格斯粒子，大部分质量来自于今天我们还没有完全理解的所谓的色动力学，就是胶子引起的相互作用。在我们所处的空间中，希格斯粒子所对应的场无所不在。有人打了一个很形象的比方，希格斯场就像一场晚宴中的众宾客充斥着空间，而其他粒子们就像晚宴中的重要客人，当任何一位这样的客人移动的时候，引起周围普通客人的围观和招呼甚至索要签名，使得他们难以移动，于是质量就增加了。

欧洲核子中心大型强子对撞机的主要目的是发现希格斯粒子。这只是书面上的理由，很多参加这

项宏大实验的物理学家以及相关人士则希望除了希格斯粒子外，强子对撞机还会发现一些我们在理论上已经和没有预料的粒子和现象。因为很多迹象表明，即使将希格斯发现使之和粒子大家庭团聚，这个表面上看起来很和谐的家庭总有种种问题，有破裂的迹象。所以，我们期待更多、更新的成员加入大家庭。几乎所有高能物理界的同行都期待强子对撞机在今后几年为我们带来惊喜。

凡事总有例外，肯定有一部分人认为希格斯粒子是最后的圣杯，被我们找到之后粒子物理的标准模型就完全确立，今后我们不会再有任何所谓的基础物理的发现了。就像 19 世纪末开尔文勋爵说的那样，今后几代粒子物理学家的任务将是寻找每个物理学参数的小数点后几位的数字。这种工作将使粒子物理显得更加不重要、不吸引人。如果我们有精力和金钱去做这样的事，有人会说，真的不如去做与日常生活更密切相关的研究，例如材料物理、生物物理、量子计算等等。

但是，同一个开尔文勋爵也说过，物理学的晴空中还漂浮着两朵乌云。这句话放在今天再适合不过，100 多年后，物理学的晴空中又升起了两朵乌云。这两朵乌云相比开尔文时代的乌云看起来更加诡异、更加不可捉摸。这两朵乌云都和高能物理的兄弟学科——宇宙学有关。其中一朵乌云出现的时间长些，就是所谓的暗物质。天文观测表明，在类似银河系的大多数星系中，存在一些利用传统的观测手段看不到的物质。这些物质既不发光，也不辐射其他波段的电磁波，甚至也不辐射其他轻粒子，所以叫做暗物质。暗物质的存在改变了星系、星系团这些巨大系统的引力结构，所以暗物质参与万有引力相互作用。

暗物质的构成到今天还不十分清楚。有些人认为这些看不见的物质可能是燃烧完的恒星，甚至黑洞，如果我们还不能完全排除它们，这些“正常”的候选者肯定不是暗物质的主要成分。剩下的最有可能的是基本不怎么参与相互作用的粒子，如所谓的轴子、超对称理论中的中性微子等。如果是超对称理论中的最轻的中性粒子，这个粒子很可能在强子对撞机中其他超对称粒子的衰变过程中产生。一位不相信超对称的粒子物理学家曾经说过，如果超对称是可能的话，中性微子是最好的理由。他的观点代表了很多人的看法，所以不相信超对称的人对超

对称偶尔也会致敬。无论如何，暗物质的存在暗示了所谓的标准粒子模型肯定不是最终理论。

暗物质也许离我们的日常生活足够遥远，但它却和宇宙今天的格局息息相关。毫不夸张地说，我们在追根究底后会发现，如果没有暗物质人类的存在就是不可能的。原因很简单，在宇宙年龄只有几亿岁时，我们今天看到的一些恒星和星系开始形成，形成的原因是宇宙中的物质密度不是严格均匀的。但是，如果没有暗物质，那个时候的物质密度非均匀性不够大，不足以使通常物质形成恒星和星系。没有恒星和星系，自然就不会有身为第三代恒星的太阳，自然也不会有人类产生。

在谈第二朵乌云之前，我们再说几句关于大型强子对撞机的话。对于一个粒子物理学家来说，天空中的乌云远远不只两朵。他们会说，标准模型中有这样、那样的问题，这些问题都可能导致灭顶之灾。是否这些问题离我们不远，强子对撞机很快就会提供答案。我个人觉得，当强子对撞机开始运转之后，我们打开了偷窥自然的一扇重要的窗口。非常有可能，许许多多不大不小的乌云从这个窗口逸出，布满我们以为干净晴朗的物理学天空。

另一朵乌云，恐怕是目前最大的乌云，是暗能量的存在。

暗能量在理论上可以存在，其在理论上提出的历史要比暗物质长得多。暗物质的存在可以追溯到兹威基 (Fritz Zwicky)，他在 1933 年就指出星系团中可能存在暗物质，因为他发现维持星系团转动的可见天体远远不足，应该有高达数百倍的不可见物质，这个估计当然是错的。至于暗能量，目前最简单、最可能的候选者其实是爱因斯坦提出来的。早

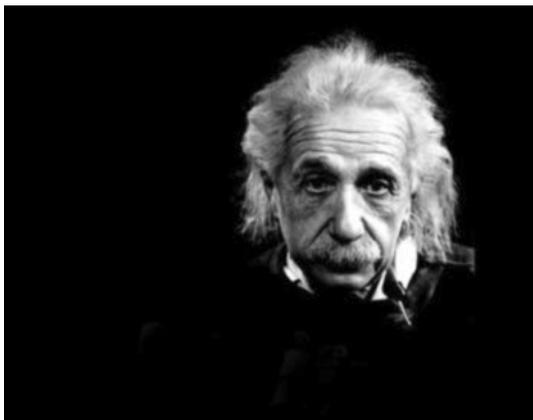


图 1 提出广义相对论和宇宙学常数的爱因斯坦

在 1917 年，当他提出第一个现代宇宙学模型的时候，就引进了暗能量。当时他觉得宇宙应该是静态的，所以必须存在一种斥力来抵消物体间普遍存在的引力，这个斥力在他的广义相对论中很容易引进来。由于斥力的产生需要在他的引力场方程中引入一个常数项，所以他将这个项叫做宇宙学常数项，而该常数就叫宇宙学常数。

哈勃后来发表了哈勃定律，说明宇宙是膨胀的。如果宇宙一直在膨胀，并且膨胀的速度越来越慢，引力本身就可以解释这个现象了，爱因斯坦的理论也足够了。于是爱因斯坦放弃了宇宙学常数，后来的大爆炸宇宙论完全建立在没有宇宙学常数的爱因斯坦理论上。

暗能量有一段曲折有趣的历史，我们现在略过这段历史，直接跳到 1998 年，暗能量存在的第一个证据在那一年被找到。是年，瑞斯（Adam Riess）和帕穆特（Saul Perlmutter）分别领导的两个小组发表了发现宇宙在加速膨胀的结果。他们的方法类似当年哈勃发现宇宙膨胀的方法，就是利用遥远的发光物体同时测量它们的位置和离开我们的速度，这些发光体是能量极大的超新星。宇宙要加速膨胀，必须有一个产生斥力的源存在，这个源被发现很均匀，最简单的可能就是爱因斯坦的宇宙学常数。



图 2 因同时发现宇宙加速膨胀，瑞斯和帕穆特获得 2006 年度天文学邵逸夫奖（Shaw Prize），2007 年又和他们的小组分享了 Gruber 宇宙学奖。前者 100 万美元，后者 50 万美元

用现在的观点看，宇宙学常数就是真空中的能量。我们通常不太在乎真空能量，因为它存在的唯一效应就是产生斥力。如果真空能量的密度很低，在绝大多数情况下，对我们的日常生活、物理实验甚至天文观测不起任何作用。现在，既然我们可以

看到距离我们以亿光年计的天体，我们就不能忽略真空能了。

为什么真空能在大多数的情况下可以忽略呢？这就需要了解一下目前描述基本粒子的理论，量子场论。量子场论告诉我们，每一个自由度都有零点能，也就是说，每一个自由度的最低能量状态的能量不为零。这些零点能的存在并不影响自由度之间的相互作用。比如，如果我们需要研究两个粒子之间的碰撞截面，零点能存在与否对计算不起任何作用。换句话说，零点能是一个通常的数字，与所有物理算子对易、互不影响。历史上，零点能的存在也引起过理论家们的困惑。首先，零点能不仅是无限大的，而且零点能的密度也是无限大的。与这个事实相关的是，粒子之间的相互作用也会变成无限大。理论家很快学会了如何处置这些无限大。因为零点能本身不影响物理过程，我们简单地将零点能扔掉，这种方法叫正规化。相应地，我们也系统地扔掉不可观测到的无限大，这个方法叫重整化。

粒子物理学家在很长一段时间内不和引力打交道。这既是一种权宜之计，也是最好的解决问题的策略，在很多情况下，你必须集中精力解决目前的问题，假定那些难以解决而往往最深刻的问题自有深刻的原因暂时不影响我们解决其他问题。这种方法非常行之有效，直到最近暗能量的发现，我们不得不面对最深刻的问题了。

在解释暗能量或真空能为什么是最大的一朵乌云之前，让我回到从前，不厌其烦地回顾一下量子引力的历史。第一位认真尝试将量子力学和引力结合在一起的人是德维特（Bryce DeWitt），在一篇 1967 年的文章中，他用传统的量子场论方法研究量子引力，并没有取得本质的进展。对引力一直不怎么在意的费曼也尝试量子化引力（1962 年），同样没有结果，但他发明的一个方法后来影响了规范场的量子化，就是鬼场，费曼的另一个结果是，在处理自旋为 2 的粒子时，唯一可能的相互作用就是爱因斯坦理论。在解决了规范场的量子化之后，特霍夫特和他的老师威特曼（Martin Veltman）证明了引力和物质在一起的系统是不可重整的，用今天的术语，就是说，不存在一个只有有限个参数的有效引力场论。

在弦论介入量子引力之前，研究量子引力的主流是所谓正则量子化，就是将时间和空间强行分开，

这样做是不得已的。在这个主流之外，还有离散化方法，就是雷吉的三角剖分。再后来，有了超引力。之前，还有卡鲁查-克莱因理论。这两种想法现在完全结合到弦论中来了。而正则量子化发展到今天，主要方案是所谓的圈量子引力。当然，圈量子引力还没有发展到可以计算具体物理过程的程度。这样，正则量子化的另一条线（即所谓的惠勒-德威特方程）被哈特尔（James Hartle）和霍金发展成哈特尔-霍金波函数，反而可能成为处理宇宙学的可行方法，最近几年，哈特尔-霍金波函数被用来研究早期宇宙学的问题，前景似乎不错。

简短地交代了量子引力的历史之后，我们回到暗能量这个问题上来。我们前面说过，暗能量可以被看成真空的能量。如果没有引力，我们完全可以不理它，因为它不影响我们理解任何其他物理过程。有了引力，真空能的确可以产生斥力，这样，我们不得不将引力对暗能量的“反馈”计算进来。在最简单的情况下，只有真空，真空中只有暗能量，那么时空不是平坦的，时空应该取一个特殊的形式，叫做德希特时空。这个新的时空和真空中完全没有暗能量的时空（即平坦时空）具有一个共同特点，就是有极大的对称性。但与平坦时空不同的是，德希特时空是弯曲的，有着一个具有极大对称性的曲率，与平坦时空相比，后者类似平面，而德希特时空类似球面。所以，德希特时空也有一个半径。当暗能量的密度越大时，这个半径越小。假如，真空中的能量完全来自于一个场的自由度，如一个自旋为整数的玻色场，真空能的密度就是无限大，对应的德西特半径就是无限小。我们很快看到，这引起一个矛盾，当时空的半径变得无限小时，场的零点能的计算就会变得非常复杂，我们不再能够肯定零点能到底有多大。

从另一个角度来看，无限大的零点能来自于波长为无限短的量子涨落。我们知道，波长越短，能量越高，引起的引力越大，我们不再能够忽略量子引力效应，所以，要真正理解真空能这个问题，我们首先需要有一个可以用来做计算的量子引力理论。

聪明的人可能会想到利用类似我们从前忽略量子引力的鸵鸟政策。既然很大的真空能会引起很大的量子引力效应，我们假定所有真空能加起来就像我们观测到的那么大（即1立方米中大约有1个质子的能量），比方说，所有量子涨落的零点能加起来

要么几乎抵消（玻色子有正的零点能、费米子有负的零点能），这样就不用担心引起强大的引力涨落效应了。如果量子涨落的零点能不能几乎抵消，我们可以引进一个“裸”零点能来抵消它们，这样我们可以达到同样的目的。这个鸵鸟方案看起来真的不错，的确，最近用来发现所谓弦景观（即有很多亚稳态真空）的办法就是这样的。但作为理论家，不得不承认这是鸵鸟政策。原因是，尽管真空能几乎抵消了，但我们不知道它们是怎么抵消的，因为每个量子引起的量子引力反弹的确不小。加之，我们知道，既然每个量子的真空能很大，为什么它们能够抵消得几乎干干净净，但是还留下一点点，让宇宙得以成为今天方圆大约是100多亿光年的宇宙？

暗物质虽然不能用标准粒子理论来解释，我们知道原则上可以用我们熟悉的物理理论来解释，暗能量的解释需要全新的理论，一个我们已经追求了半个世纪的理论——量子引力。也许我们会在今后的几十年中理解暗能量的起源和一个真正的量子引力理论，也许我们需要更长的时间达到这个目标。考虑到我们已经花费的时间和人力，当那一天到来时，可以说是“一将功成万骨枯”。

到此为止，我们已经了解了从上世纪发端、在世纪末变得越来越明显的两朵乌云。这两朵乌云在宇宙学家和在物理学家的眼中的严重情形也许不一样。对于宇宙学家来说，只要暗物质存在就可以，因为他们需要它来解释星系和星系团的引力结构以及这些大尺度结构是如何从宇宙早期到近期逐步形成的。同样，他们也希望能了解暗能量的一些性质以决定宇宙过去的演化和未来的发展。对于物理学家来说，情况完全不一样，暗物质的存在告诉我们所谓标准粒子模型远远没有能够达到标准，因为我们不知道暗物质是什么粒子，在热大爆炸的开端是如何产生的，是意味着标准模型远远不完备还是我们只需要小修小改。至于暗能量，则涉及理论物理中迄今为止最大的理论问题——量子引力理论，以及量子引力和标准粒子模型的关系。

我们谈了半天现代的两朵乌云，现在可以将其与19世纪末的两朵乌云做一个比较了。19世纪末，开尔文指出的两朵乌云分别与两个实验有关，一个是黑体辐射实验，另一个是迈克尔逊-莫雷实验。众所周知，黑体辐射实验导致了普朗克发现黑体辐射谱和量子，而迈克尔逊-莫雷实验导致狭义相对论的



# 期待一个新的黄金岁月 (上)

王玉明 张海青 邹浩 译 李学潜 校

关于基本相互作用的标准模型获得了巨大的成功，但是也遗留下一个有待完成的议程。研究其中一些主要问题的时机似乎即将成熟。我期望下一个 10 年将是一个孕育基本物理学重大发现的黄金岁月。

## 一、我们当前的状态

标准模型的胜利 目前，粒子物理学的标准模型取得了巨大胜利。它经受了超出构建模型时所涉及的能区高精度实验的检验。

即使是标准模型中丑陋的部分看上去也还不错。标准模型的规范部分只有很少的参数（其实是 3 个），并且这些参数都有漂亮的几何学解释。与此不同的是，模型中涉及费米子质量以及混合的部分包含了很多参数（在最小模型中也有约 20 个参数）。这些参数只是用来描述费米子与一个或多个设想的

发现。量子论和相对论恰恰是 20 世纪两个最大的物理发现和进展。

我们分别分析一下这两个实验的性质以及它们是如何引发两个重大理论发现的。黑体辐射实验导致瑞利-金斯公式，这个公式如果延伸到紫外波段，不仅和实验矛盾，也会引起总能量发散，所谓紫外灾难。普朗克大胆引入能量量子假说，从而避免了紫外灾难，也预言了黑体辐射在紫外波段的性质。这个发现不仅仅解决了黑体辐射问题，更加引发了后来爱因斯坦的光量子概念和玻尔的量子化概念，从而导致全新的不同于牛顿力学的新力学。

迈克尔逊-莫雷实验与黑体辐射实验不同，黑体辐射是发现了一个概念的存在，而迈克尔逊-莫雷实验是否定了一个概念，以太。迈克尔逊-莫雷实验说明麦克斯韦的理论在不同的惯性参照系中都是成立的，没有一个由以太决定的绝对惯性参照系。爱因斯坦发现狭义相对论的原因据说与迈克尔逊-莫雷实验没有直接关系，他只是想将洛伦兹的理论从动力学变成运动学，从而彻底改变了我们的时空观念，否定以太的存在则是狭义相对论的结论之一。

希格斯场的汤川型相互作用强度的抽象数字。在现有理论中，这些参数只能从实验中抽取。无论如何，

Observable	central $\pm$ C.L. $\equiv 1\sigma$	$\pm$ C.L. $\equiv 2\sigma$	$\pm$ C.L. $\equiv 3\sigma$
$ V_{ud} $	0.97383 <sup>+0.00024</sup> <sub>-0.00023</sub>	+0.00047	+0.00071
$ V_{us} $	0.2272 <sup>+0.0019</sup> <sub>-0.0016</sub>	+0.0020	+0.0030
$ V_{cb} $ [10 <sup>-3</sup> ]	3.82 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.15</sub>	+0.31	+0.49
$ V_{ub} $ [10 <sup>-3</sup> ] (meas. not in fit)	3.64 <sup>+0.19</sup> <sub>-0.18</sub>	+0.30	+0.44
$ V_{td} $	0.22712 <sup>+0.00009</sup> <sub>-0.00013</sub>	+0.00019	+0.00030
$ V_{ts} $	0.97297 <sup>+0.00024</sup> <sub>-0.00023</sub>	+0.00048	+0.00071
$ V_{tb} $ [10 <sup>-3</sup> ]	41.79 <sup>+0.63</sup> <sub>-0.63</sub>	+1.26	+1.80
$ V_{cb} $ [10 <sup>-3</sup> ] (meas. not in fit)	44.9 <sup>+1.2</sup> <sub>-1.2</sub>	+2.4	+3.8
$ V_{ub} $ [10 <sup>-3</sup> ]	8.28 <sup>+0.33</sup> <sub>-0.29</sub>	+0.92	+1.38
$ V_{td} $ [10 <sup>-3</sup> ]	41.13 <sup>+0.63</sup> <sub>-0.62</sub>	+1.25	+1.87
$ V_{ts} $	0.999119 <sup>+0.000026</sup> <sub>-0.000027</sub>	+0.000052	+0.000078
$ V_{td}/V_{ts} $	0.2011 <sup>+0.0004</sup> <sub>-0.0005</sub>	+0.0009	+0.0014
$ V_{ud}/V_{us} $ [10 <sup>-2</sup> ]	3.72 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.14</sub>	+0.127	+0.195
$\arg[V_{ud}V_{us}^*]$ (deg)	59.8 <sup>+4.9</sup> <sub>-4.5</sub>	+7.8	+12.1
$\arg[-V_{td}V_{ts}^*]$ (deg)	1.043 <sup>+0.061</sup> <sub>-0.057</sub>	+0.12	+0.18
$ V_{ud}V_{us}^* $ [10 <sup>-3</sup> ]	9.49 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.15</sub>	+0.30	+0.45
$\arg[-V_{td}V_{ts}^*]$ (deg)	0.0339 <sup>+0.0021</sup> <sub>-0.0020</sub>	+0.0050	+0.0077
$ V_{td}V_{ts}^* $ [10 <sup>-3</sup> ]	8.27 <sup>+0.33</sup> <sub>-0.29</sub>	+0.93	+1.38
$\arg[V_{td}V_{ts}^*]$ (deg)	-22.84 <sup>+1.00</sup> <sub>-0.99</sub>	+1.98	+2.93
$\sin \theta_{12}$	0.2272 <sup>+0.0019</sup> <sub>-0.0019</sub>	+0.0020	+0.0030
$\sin \theta_{13}$ [10 <sup>-3</sup> ]	3.82 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.15</sub>	+0.31	+0.44
$\sin \theta_{23}$ [10 <sup>-3</sup> ]	41.78 <sup>+0.63</sup> <sub>-0.63</sub>	+1.26	+1.80

图 1 一份定量检验标准模型中丑陋的部分结果样本，这一丑陋的部分描述了夸克与轻子的质量以及混合（图片来自文献 arXiv: hep-ph/0605217）

所以，19 世纪末的两朵乌云和一个发现了什么、一个没有发现什么的实验有关，这一点不同于 20 世纪末的两朵乌云——无论是暗物质和暗能量，我们都是发现了什么。本质上，我觉得暗能量的发现接近于黑体辐射，同样是紫外灾难，虽然具体的对象不同。我个人觉得暗能量的存在极有可能导致物理概念上的深刻革命。与此相反，暗物质的发现既不同于黑体辐射，也不同于迈克尔逊-莫雷实验，因为现有的理论框架完全可以容纳暗物质。

虽然今天看来，弦论面临着这两朵乌云的挑战，历史上弦论的发现完全与宇宙学无关，甚至与量子引力无关，这是弦论历史最引人入胜的一点。

(合肥中国科学技术大学 230026)



## 作者简介

李森，中国科学院理论物理所研究员，中国科学技术大学教授。主要研究领域为超弦理论和宇宙学，近年来尤其侧重暗能量和早期宇宙学的研究。