

量子宇宙物理前沿——21 世纪基础科学革命的突破口



吴岳良

理论物理学家, 中国科学院院士、发展中国家科学院院士、中国科学院大学副校长。从事粒子物理、量子场论、对称原理、统一场论和宇宙学等领域的研究。曾任中国科学院理论物理研究所所长、中国科学院卡弗里理论物理研究所所长、理论物理国家重点实验室主任, 科技部“暗物质暗能量的理论研究和实验预研”973项目首席科学家和国家自然科学基金“物质深层次结构与宇宙极早期演化”创新研究群体项目首席科学家。引力波探测空间太极计划首席科学家。国家杰出青年科学基金获得者。

由引力效应发现的暗物质和暗能量以及与时空结构相关的引力本质和宇宙起源被认为是 21 世纪最重大的、悬而未决的物理问题, 引力波的发现为理解这些科学难题打开了一扇新的窗口。2016 年应邀在中国科学院学部年会上做“引力波和引力本质”的大会报告后, 随即受到《科学通报》主编高福院士的邀请, 期望从学科发展的整体考虑, 由《科学通报》出版一期专辑, 较全面地解读和展望 21 世纪最重大的、悬而未决的一些物理问题, 特别是 21 世纪伊始由美国国家科学研究委员会 19 位知名物理学家和天文学家联合执笔完成的关于 21 世纪“最重大的 11 个悬而未决的物理问题”。

专辑以“最重大的 11 个悬而未决的物理问题”为主线, 与中国科学院数学学部批准启动的“暗物质、暗能量与粒子宇宙物理研究”学科前沿发展战略研究咨询项目相结合, 经由中国科学院理论物理研究所和中国科学院大学牵头组织国内相关研究领域的专家学者, 对量子宇宙物理前沿的最新进展和未来发展进行多次研讨, 包括: 黑格斯粒子的发现、引力波的发现、双黑洞和致密双星并合的发现、暗物质和暗能量研究的新进展等, 从中遴选出 15 个重大科学问题进行解读。

通过重点介绍和解读这些基本科学问题, 一方面可更好地展望这些前沿科学问题未来的发展趋势并寻找突破口; 另一方面可根据我国在相关领域的研究基础, 部署重点研究的领域和优先发展的方向, 为我国基础科学的前沿交叉发展提供参考。

黑格斯粒子的发现表明, 描述电磁、弱和强作用的粒子物理标准模型所预言的 61 个基本粒子得到了实验的证实, 深化了人类对极小粒子的认识。在粒子物理和宇宙学标准模型所预言的基本粒子中, 唯一没有得到实验证实的就是传递引力相互作用的引力子。引力波的发现不仅是对百年前爱因斯坦广义相对论所做预言的一个直接验证, 更是激励着物理学家去寻找引力子。尽管目前的探测手段还无法观测到单个引力子, 但有理由相信引力波是由引力子组成的物质波。另一方面, 人类对极大宇宙的了解也不断拓展: 宇宙早期经历了一个暴胀阶段, 宇宙的主要组分为暗能量和暗物质, 其中暗能量占 70%, 暗物质占 25%, 构成我们生命和可见宇宙的原子物质只有不到 5%。尽管天文学家通过引力效应, 在大尺度上观测到暗物质和暗能量的存在, 然而, 对暗物质属性和暗能量本质仍然不清楚。即使对占宇宙组分约 5% 的原子物质, 我们还不完全清楚为什么观测到的宇宙只有物质没有反物质, 尽管量子场论表明在宇宙早期物质和反物质应该同时存在。这意味着, 人类对宇宙的了解还极其有限。

从目前对宇宙结构和演化的认识, 早期宇宙处在一个极高能和高温的状态, 那时的宇宙是一个充满基本粒子的状态, 由于所有基本粒子被压缩在极小的时空内, 引力可变得非常强, 量子引力的作用显得非常重要, 这需把量子力学与描述引力的广义相对论结合起来才能真正理解宇宙的起源。在这个意义上, 极小粒子与极大宇宙是相互关联并存在内在规律的。

为此, 探索极小粒子与极大宇宙的内在统一, 建立描述 4 种基本相互作用和所有基本粒子的统一理论, 解决量子宇宙物理重大的、悬而未决的前沿科学问题, 将引发 21 世纪基础科学的革命性突破。

统一场论的建立需调和量子场论与爱因斯坦广义相对论之间长期存在的障碍和矛盾。相对论量子场论作为基于整体平坦闵氏时空的狭义相对论和量子力学的成功结合, 已成为描述微观世界的基本理论框架, 并建立起粒子物理标准模型。而作为描述引力的广义相对论基于广义协变原理, 由建立在弯曲时空的黎曼几何动力学来描述。

电磁、弱和强相互作用都是由基本粒子内禀量子数和独立自由度之间的规范对称性来

支配,不同于广义相对论是由时空几何性质来刻画.一个自然的问题是:引力相互作用同样存在于所有基本粒子之间,也应由基本粒子的内禀性质来决定,即由基于基本粒子的规范对称原理而不是基于时空坐标的广义协变原理来支配.这自然地导致引力量子场论的发展.

引力量子场论基于的基本原理和假设:所有的基本相互作用包括引力都由物质基本组元的内禀性质来刻画;物质的基本组元为狄拉克费米子量子场(如夸克和轻子);所有基本量子场的运动学遵循狭义相对论和量子力学的基本原理;所有基本量子场的动力学由其对应的杨-米尔斯规范对称性所支配的基本相互作用来描述.由此,引力由自旋规范对称性来支配,并自然地引入双标架时空概念.一个时空为整体平坦的闵氏时空,它起着惯性参考系的作用,用以描述基本量子场的运动,并很好地定义守恒量;另一时空为局域平坦的非坐标引力场时空,用于表征相互作用并刻画场的动力学.在局域平坦的引力场时空中,使得我们可构建规范不变和时空坐标无关的引力量子场论.基本引力场(gravity field)成为定义在双标架时空上的双协变矢量场,不再是坐标时空的几何度规场.它是一种规范型矢量场,引力由类电磁场的规范型相互作用来刻画.引力量子场论中存在新的自旋规范相互作用.结果表明,由打破爱因斯坦广义协变原理的局限而建立起的引力量子场论,自然地克服广义相对论与量子力学之间不可调和的矛盾,将引力与其他3种基本相互作用进行统一描述.

如何在引力量子场论的理论框架下将已知的基本粒子统一成为单一的基本粒子,把4种基本相互作用统一起来由单一的规范对称性来支配,这导致超统一场论(hyperunified field theory)的建立.

超统一场论的建立基于两个基本指导原则:一是基本粒子的内禀量子数与独立自由度决定时空的维度与结构;二是描述自然规律的作用量遵循规范不变原理且与坐标选取无关.第一个指导原则使得基本粒子的内禀特性和对称性与时空的几何特性和对称性建立起对应关联,导致所有基本粒子合并统一成为超时空中的超旋量场,超旋量场的旋量结构反映超时空的几何性质.第二个指导原则导致局域平坦超引力场时空呈现为自然演生的非坐标超时空,使得所有基本相互作用由超引力场时空中的超自旋规范对称性统一支配.

基于引力量子场论的理论框架,超统一场论自然地导致双标架超时空概念的引入,并赋予高维超时空以物理和几何涵义.双标架超时空形成几何上的纤维丛结构,整体平坦的闵氏超时空作为纤维丛的底时空,超引力场时空作为其纤维.闵氏超时空可看作是一个没有任何相互作用存在的真空超时空,超引力场时空是一个具有非对易几何结构的自然演生的真实超时空.超引力场本身作为物质场,由其演生的超引力场时空构成一个可观测的物质宇宙.

研究发现,包含粒子物理标准模型的最小超统一场论导致十九维超时空的引入,由双最大对称性支配:闵氏超时空的最大庞加莱对称性 $PO(1,18)$ 和超引力场时空的最大超自旋规范对称性 $SP(1,18)$ 以及整体和局域的标度对称性.研究表明,超引力场场强由规范型相互作用刻画,由此导出规范-引力对应原理.

超引力场既是一个规范型矢量场,又起着 Goldstone 玻色场的作用,它揭示了规范对称性的引力起源.由此可证明,超引力场的规范相互作用等效为超时空度规联络的相互作用,由此导出引力-几何对应原理.

基于广义标度规范不变条件和么正规范固定条件,超引力场的规范动力学可完全等效为超引力度规场的几何动力学,揭示出引力的规范-几何对偶性质.由此可得出结论:超统一场论的基本指导原则比爱因斯坦广义协变原理更基本和更普遍.引力量子场论和超统一场论的建立,表明引力场时空本身就是物质.

超统一场论的建立对时空观念、几何观念、宇宙观念以及物质观念和能量观念提出了新的挑战.引力波的精确测量和引力本质的深入研究,对检验统一场论和认识自然界基本规律将起到重要的作用.



国际理论物理中心(亚太地区)
中国科学院理论物理研究所
中国科学院大学