

轴子 粒子物理和宇宙学的新前沿

毕效军¹ 高宇¹ 杨峤立² 张新民¹

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 暨南大学 510632)

一、引言

粒子物理、宇宙学和天文学的深度结合催生了当下粒子宇宙学研究的高速发展。继2017年引力波之后,2019的物理学诺贝尔奖再次光顾了宇宙学领域,并颁给了从事宇宙学理论研究的Peebles教授。目前,正当宇宙学研究在观测层面大步前进时,理论家和实验家们近年来将目光投向新的宇宙学热点,一个长期被理论预言的基本粒子“轴子(Axion)”。

二、粒子物理学中的强CP问题

轴子起源于现代物理中对称性及对称性破缺问题的深入研究。1956年李政道、杨振宁与吴健雄等人提出并在实验上验证了宇称P在弱相互作用中不守恒。后来人们发现弱相互作用中正反粒子共轭(C)与宇称(P)的联合变换CP也不守恒。C变换指的是将一个粒子变成它的反粒子,P变换即空间坐标反演。在粒子物理的标准模型中,Kobayashi和Maskawa提出的机制在理论上成功解释了弱相互作用中的CP破坏,并为此荣获了2008年的诺贝尔物理学奖。然而,强相互作用中的CP对称性是否守恒仍是现代物理学中一个大问题。

在粒子物理标准模型中,强CP破坏效应对应于量子色动力学(QCD)中的Chern-Simons项 $\theta G\tilde{G}$,其中 G 是QCD规范场的场强, $\tilde{G}$ 是相应的对偶场强, θ 为常数,表征强作用CP破坏大小。这一项在CP

变换下不守恒,并可以贡献到中子的电偶极矩。然而实验测量只给出中子电偶极矩的上限,这个上限很强,要求“参数” θ 必须小于 10^{-10} 。 θ 为什么这么小?这便是著名的“强CP问题”。

在粒子物理标准模型中,除强相互作用项之外,对应于 $SU(2)\times U(1)$ 规范对称性,还应有两个 θ 项。但这两个 θ 项一般情况下没有效应。一是 $U(1)$ 规范场的真空是平庸的,所以 θ 项效应为零。 $SU(2)$ 规范场的 θ 本不为零,但标准模型的经典拉氏量中存在着整体的重子和轻子对称性。二者又在量子层次都是被破缺的,也具有反常性质,故 $SU(2)$ 的 θ 项效应也表现不出来。

我们知道,粒子物理的标准模型在很多方面已经非常地成功。然而,它无法回答强CP问题,也无法解释诸如暗物质、暗能量等天文观测上的疑难。因此“真实”的物理必然会超出当下的标准模型。从标准模型自身的发展过程看,解决类似强CP问题这样深层次的理论问题往往能诱导出物理学的重大进步。

三、PQ对称性与轴子的提出

为了解决强CP问题,1977年斯坦福大学的Peccei和Quinn提出了一个整体 $U(1)$ 对称性,即Peccei-Quinn(PQ)对称性。后来,Weinberg和Wilczek分别指出PQ对称性的破缺将预言一个新的基本粒子,Wilczek将这个粒子命名为“axion”即轴子,意为奇宇称(axi-)的粒子(-on)。这个轴子就是PQ对

称性破缺导致的 Nambu-Goldstone 粒子。由于 PQ 对称性在经典意义上是严格的,但在量子层面, QCD 的瞬子效应破缺了它,所以轴子获得了质量。

PQ 是如何解决强 CP 问题的呢? 简单而言,是引入了一个新的自由度,从而将 QCD 参数 θ 扩展为常数和变化的场的组合: $\theta \rightarrow \theta + a/f_a$, 其中 a 指轴子场, f_a 为 PQ 对称性破缺的标度。这个组合的 θ 是个动力学场,它的演化行为由它的势函数来决定。PQ 是一个整体的手征对称性,被费米子质量破缺;一般来说,整体对称性破缺产生的 Nambu-Goldstone 粒子是没有质量的。但对于轴子,在 QCD 的瞬子效应下,它的势函数不为零,是周期性的,且在极小点给出有效 θ 为零,由此解释了 θ 为什么如此之小,解决了强 CP 问题。

轴子是解决强 CP 问题方案中最自然、最优雅的一个,并与高维时空的弦理论等新物理有着丰富的联系,逐渐获得了众多物理学家的青睐。

最初,轴子模型被称为 Peccei - Quinn - Weinberg - Wilczek (PQWW) 模型。这个模型给出 PQ 对称性破缺的能标是弱相互作用能标,并假设有两个希格斯粒子 (H_u 和 H_d), 这两个希格斯粒子和标准模型中的费米子都直接参与 Peccei-Quinn 相互作用,即全部直接耦合到轴子。由于这个模型预言实验上已经观测到的粒子性质会有较大的改变,它很快就被实验排除了。

随后,人们在模型中提高了 Peccei-Quinn 对称性破缺的能标,让它远高于弱作用能标,从而避免对已知的粒子产生过大的修正。这样一来轴子的质量就变得非常轻,例如: Dine - Fischler - Srednicki - Zhitnitsky (DFSZ) 轴子模型。

另一个方案是假设标准模型的费米子不参与 Peccei-Quinn 相互作用,即不与轴子直接耦合;而是另外引入新的大质量的未知费米子,由它们代替标准模型粒子扮演“中间人”的身份,让轴子与强相互作用的胶子场间接耦合。这便是另一类常见的模型: Kim - Shifman - Vainshtein - Zakharov (KSVZ) 轴子。

这里提到的 DFSZ、KSVZ 模型是两个典型的“不可见轴子(invisible axion)模型。在过去的几十年里,理论家们构造了很多的轴子模型。由于篇幅有限,这里不再赘述。

四、轴子的粒子物理性质

粒子物理关心的是轴子的动力学性质及它与其他粒子的相互作用:

(1) 轴子质量: QCD 的瞬子效应给出轴子的周期势形式:

$$V(a) = \Lambda_{\text{QCD}}^4 [1 - \cos(a/f_a)]$$

其最低处的形状给出轴子的质量大约为

$$m_a \approx \frac{\Lambda_{\text{QCD}}^2}{f_a}$$

(2) 轴子相互作用。轴子带有(近似的)平移对称性,故一般以导数形式耦合到费米子的轴矢量流:

$$\partial_\mu (a/f_a) \bar{\Psi} \gamma^\mu \gamma^5 \Psi,$$

导数形式保证上式在 $a \rightarrow a + \text{const}$ 的平移下是不变的。而轴矢量流耦合意味着轴子的动量耦合到费米子的自旋,在宏观上可将轴子场看作是一个极化物质之间传递自旋-自旋耦合的作用。另外,也是轴子最重要的特征是,它与规范场之间标志性的 Chern-Simons 耦合:

$$-\frac{c}{4f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

其中 c 为无量纲的有效耦合系数,大小由具体模型决定。唯象上,轴子与电磁场的耦合更有观测意义。这个耦合可简化为更直观的经典场形式:

$$g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

E, B 分别为电场和磁场。它的一个奇妙特性

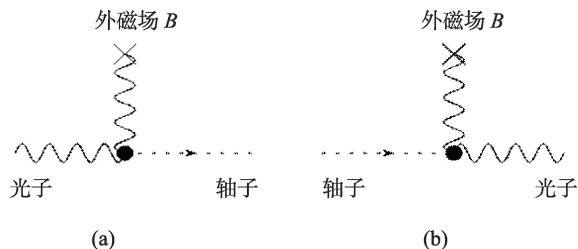


图1 外磁场 B 下,光子转化轴子的 Primakoff 效应(a),和轴子转化光子的 Sikivie 效应(b)

是修改我们熟知的经典电磁理论:轴子场破坏真空中电场、磁场的对偶性;修正麦克斯韦方程组,使轴子与电磁波混合;光子和轴子在外电磁场下可以相互转化(图1),产生光子的振荡效应和色散效应;有质量的轴子也可以衰变成为光子——而且强外磁场将增大这一反应几率。

由轴子又可以推广出一类所谓“类轴子”,指的是与规范场(特别是电磁场)有 $\frac{a}{f_a} F \tilde{F}$ 耦合,在低能下有效电磁学性质类似于轴子,但不一定与QCD耦合,也不必解决强CP问题的小质量赝标量粒子。类轴子的理论空间较大,一般认为其 m_a 和 f_a 可以是自由的,不必像QCD轴子那样满足严格的依赖关系。弦理论中维度紧化过程会生成大量的类轴子。

五、轴子暗物质

轴子与通常物质的相互作用极其微弱,而且质量很小。这导致轴子在对撞机等高能实验上寻找起来非常困难。然而,科学研究总会产生惊喜!在宇宙学中,轴子成功地找到了自己独特的位置,它是理想的暗物质粒子。

在宇宙演化过程中,当宇宙的哈勃参数 H 和轴子质量相当时,轴子场开始振荡。这个过程中,轴子的初始能量密度取决于轴子场的初始强度,即PQ对称性破缺后轴子的初始相位角,可以在 0 到 2π 之间任意取值。如果PQ对称性破缺发生在暴涨之前,暴涨会消除相位角的空间不均匀性,整个可见宇宙将有一个统一的初始相位角。并且轴子场在暴涨时期会导致等曲率扰动,这是宇宙微波背景观测中非常感兴趣的一个方向。如果PQ对称性破缺发生在暴涨之后,初始相位角将随空间分布,但是平均下来仍为单位常数大小。这时,轴子场的能量密度仅仅取决于PQ对称性破缺的能标。理论计算表明, 10^{-5} eV 重的轴子,其对应 f_a 为 10^{11} GeV 时,轴子恰好给出宇宙中所需的暗物质密度:

$$\Omega_a h^2 \approx (0.04 - 0.3) \left(\frac{f_a}{10^{11} \text{ GeV}} \right)^{7/6}。$$

因此看出,轴子如果占据暗物质的绝大部分组分,则相应的PQ对称性能标已经被宇宙学所预言为 10^{11} GeV 左右。

六、轴子宇宙弦

此外,PQ对称性破缺将产生大尺度的拓扑“缺陷”。这些缺陷在空间上看起来是一维的曲线,故被形象地称为“宇宙弦”(图2)。当假设PQ对称性破缺在暴涨之后发生,轴子或类轴子形成的弦有可能在当今的宇宙中仍有显著的残留。轴子宇宙弦的运动和演化和点粒子有显著的不同,可以通过宇宙大尺度结构、微波背景辐射、中性氢21厘米光谱等热门的天文观测手段进行探索。

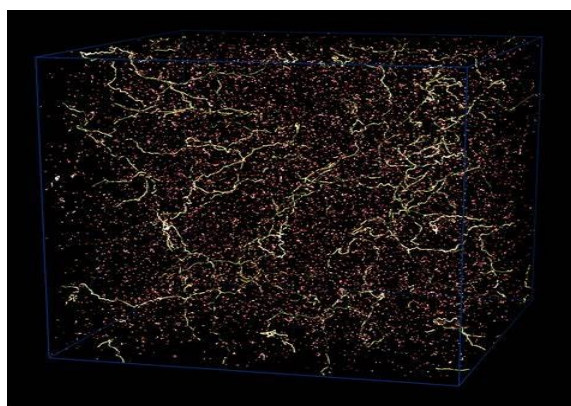


图2 轴子“宇宙弦”

(图片来源:剑桥大学 Cosmic String Simulations 网站)

七、轴子的探测

根据轴子的不同特性,可以设计不同的探测方案,在此我们介绍几个有代表性的搜寻方式。

(1) 暗物质轴子的直接探测

“轴子暗物质望远镜”。作为冷暗物质的轴子晕处于非相对论性状态,具有宏观尺度的相干性,其受激衰变出的光子具有良好的单色性。因此Sikivie提出可以用一个与轴子衰变出的电磁波频率匹配的共振腔,受激衰变信号在腔内形成共振,在实验室的磁场中就能可以极大提升探测到暗物质轴子的效率。美国华盛顿大学的ADMX实验是这个实验方案的代表,是目前灵敏度最高、唯一实

现了到达QCD轴子理论预期的实验(图3)。除AD-MX实验外,美国的HAYSTAC,韩国的CAPP-CULTASK,意大利的KLASH、澳大利亚的ORGAN等实验也采用了Sikivie电磁共振腔检测的实验原理。

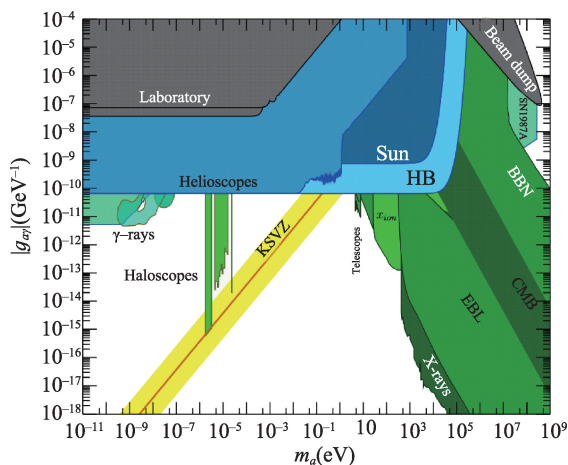


图3 轴子搜寻现状。暗物质望远镜(Haloscope)是为唯一达到了暗物质轴子理论预期精度实验(图片摘自I.Irastorza和J.Redondo的综述文章:Prog.Part.Nucl.Phys. 102 (2018) 89-159)

“太阳轴子望远镜”(CAST),该实验位于欧洲核子中心,关注于探测从太阳中心产生的轴子。太阳内部有大量的光子,在光子-轴子转化的假设下会成为地球附近最强的天然轴子源。这些轴子到达地球时不会受到大气、岩石的阻拦,而是直接穿透地球而过。CAST望远镜深藏地下,将镜头指向太阳方向。望远镜前放置的加速器磁铁会将一小部分轴子再次转化为可见的光子,从而探测是否有源自太阳的轴子流存在。目前CAST未能达到QCD轴子理论的预言精度,但对类轴子已经给出了非常有价值的限制结果。

近年各大地下暗物质直接探测实验室也纷纷加入太阳轴子搜寻。与CAST不同之处在于,直接探测实验并不再次将轴子转化为光子,而依赖轴子与费米子的有效耦合。源于太阳的具备keV动能的轴子可以与实验介质碰撞,实验测量反冲中传递的动能。例如我国四川锦屏山的PANDAX、CDEX实验,美国的XENON1T、LUX实验,欧洲的EDELWEISS实验等。

(2) 轴子/类轴子的间接探测

天体物理效应。轴子在天体物理这个万花筒中有丰富的观测效应,举例而言:(1) 由于轴子的穿透能力极强,可以从星体的深处直接逃逸并迅速带走大量的热量,会潜在影响红巨星、超新星等天体的演化过程。(2) 由于环境的吸收和散射,极高能宇宙线光子在宇宙里传播的距离应是十分有限的。然而如果这些光子可以在恒星或星系附近的磁场里变成轴子,他们就能以轴子的形式传播到更远的距离,这样我们就可以在遥远星体的伽马射线光谱中找到光子-轴子转化留下的痕迹。(3) 由于Penrose过程,有自旋的Kerr黑洞周围可能通过超辐射形成高密度的轴子晕,鉴于其惊人的能量密度,轴子晕的光学、引力效应是目前研究的一个前沿话题。(4) 最近两三年有一种用射电望远镜探测QCD轴子暗物质的新方法。中子星的磁层里面有宇宙中最强的磁场,光子在磁层里面获得一个有效质量,在某些区域光子质量等于轴子质量,这样在强磁场中轴子暗物质就能共振的转化为光子,并且有一个很窄的峰,正好对应于轴子质量,地球上的GBT,SKA等射电望远镜可以很高精度的观测到轴子的信号。这种方法可以探测质量在0.2~400 μeV 范围内的轴子。

宇宙微波背景辐射(CMB)极化探测类轴子。轴子的重要特征是它与电磁场的反常耦合,由此改变光的传播性质,引起光的极化旋转。这个效应很小,需要光传播路径长的,才能累积效应增强,具有可观测性。CMB在宇宙中传播的路径最长,具有优越性。但引起CMB效应的轴子要比QCD轴子轻很多,故适用于类轴子。目前国际上几乎所有的CMB实验都已开展了类轴子引起的CMB极化旋转角的测量。目前结果的误差很大,将来CMB实验,如我国的阿里原初引力波计划(ALICPT),将大大的提高其测量的精度。

从上述几个典型方案可以看出,依赖电磁学效应的轴子搜寻实验具有独特的信号特征,可以有效地和WIMP暗物质、宇宙线等其他热门搜寻区分开来。

八、小结

本文介绍了轴子的理论基础和实验方面的最新进展。尽管轴子理论早在1977年就提出了,但近几年又重新激发了广泛的研究热情,这和暗物质研究密切相关。暗物质问题是当前粒子物理和宇宙学研究中最为重要的问题之一,被认为是寻找超出标准模型新物理的重要窗口。过去十几年,特别在我国的研究重点都集中在WIMP暗物质上。WIMP暗物质本身具有极为吸引人的特性,能够在宇宙早期热产生,给出今天天文观测的暗物质密度。它具有弱作用量级的相互作用,因而能够在对撞机、地下实验、宇宙线等实验中进行观测。但是,经历过去十几年的寻找,WIMP粒子并没有被探测到,最

自然最合理的理论参数区间受到了强烈的实验限制的挑战。这就迫使大家不得不重新审视暗物质粒子模型,并改变思路,探索WIMP之外其他的暗物质候选者。轴子是解决标准模型强CP问题自然得到的一种粒子,同样可以解释暗物质密度,是理想的冷暗物质候选者。因而,近年来对轴子暗物质的研究正在获得越来越多的关注。通过本文的介绍,希望对我国系统开展轴子问题的研究和探测能够有所启发和帮助。

致谢

作者感谢与黄发明、岳骞、李明哲、蔡一夫、刘江来等人的讨论。

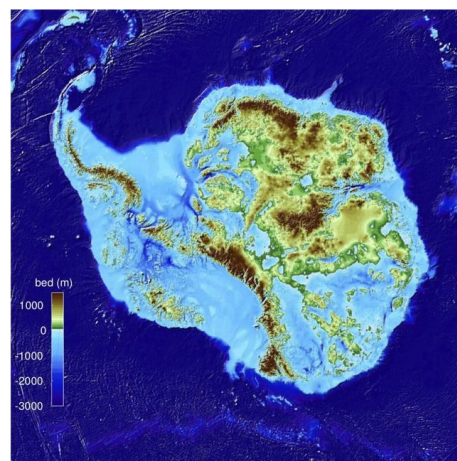
科苑快讯

南极发现全球最深的峡谷

尽管科学家竭尽所能用雷达探测南极冰盖下的陆地,但是其绝对规模和偏远程度使这块陆地在今有调查中留下了很多空白。而现在,这一情况却因一张新地图而改变。12月在南极召开的美国地球物理联盟会议(American Geophysical Union),公布了一幅名为“BedMachine Antarctica”的新地图,并发表于《自然地球科学》(*Nature Geoscience*)期刊。

地图使用冰的流量和体积来推断下面的陆地。该地图揭示了地球表面最深的峡谷,位于南极东部丹曼冰川(Denman Glacier)下,深达3.5千米,几乎是珠穆朗玛峰高度的一半。

这片未被覆盖的土地给南极冰的未来带来喜忧参半的消息:好消息是地图揭示了一系列以前不为人知的山脉,它们处于海平面之上,在穿过横贯南极山脉的深谷中,这有助于稳定上部的冰川和使潜在冰的损失保持一定限度。但是南极洲融化最快的冰川特怀特(Thwaites)的情况却不容乐观,冰川位于海平面



下的山脊上,后面是向下倾斜的盆地。该项目有望在该盆地上发现更多山脊,在特怀特冰川退到两个已知山脊之外时,这些山脊能帮助阻挡温暖的海水。以前却没有发现。

(高凌云编译自2019年12月13日 www.sciencemag.org)