

“Can the Law of Physics Be Unified?” from Science, 2005

爱因斯坦的未竟之梦：物理规律的大统一

杨金民^{①*}, 王飞

① 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190;

② 郑州大学物理工程学院, 郑州 450000

* 联系人, E-mail: jmyang@itp.ac.cn

2010-00-00 收稿, 2000-00-00 接受

摘要 本文对物理学中的统一理论的发展历史和目前的现状展开综述. 从牛顿的天和地的统一, 到麦克斯韦的电、磁、光的统一; 从爱因斯坦的时间、空间和物质的统一, 到电磁作用和弱作用的统一. 对一些未成功的统一理论 (引力和电磁的统一、强作用和电磁作用以及弱作用的统一、夸克和轻子的统一、超对称大统一) 也给予简要介绍. 最后评述目前正在尝试的试图把所有相互作用都统一进来的超弦理论.

关键词 大统一, 规范理论, 超对称, 超弦理论

东临碣石观沧海, 洪波滚滚天上来, 苍穹尽处水连天, 宇河一统在此间. 其实, 人类一直在追求对自然界各种物质起源的理解以及各种相互作用的大统一, 这体现了人类对物质世界本源和谐统一的一种信念. 古往今来, 人们一直企图从统一的角度来理解世界的物质基础和基本规律, 无论是古希腊还是古代中国, 都产生过朴素的唯物论, 把万物的本源归结于具体的物质形态或者是“原子”和“气”等, 试图从本源统一的角度来理解形形色色的物质世界. 统一是物理学发展的主旋律, 统一之路曲折漫长, 统一之美引无数英雄竞折腰. 统一不仅是爱因斯坦的梦想, 也是众多物理英豪的毕生追求. 本文将对物理学中的统一之路展开简要的评述, 不仅介绍已经成功的统一理论, 也将提及一些优美的不成功的统一尝试, 最后评论正在进展中的终极大统一理论.

1 统一理论的发展历史

1.1 物理学的第一次统一 (天和地的统一)

基于伽利略相对性原理和惯性系的假设, 牛顿

提出了三个运动定律来描述质点的运动规律. 结合万有引力, 牛顿定律可以描述宇宙中天体的运动, 把地上的运动和天体的运动用数学的方式联系起来, 这也是物理学真正意义上的第一次统一. 牛顿定律是经典物理学的基础, 可以成功的描述宏观、低速的质点运动问题. 此后, 人们也尝试用牛顿定律把“热、光、化学”等现象描述为流体粒子间的瞬时相互作用.

1.2 物理学的第二次统一 (电、磁、光的统一)

在经典物理的发展过程中, 人们逐步认识了电作用、磁作用以及满足平方反比定律的静电力和磁力的相似性. 奥斯特实验以及电磁感应定律发现后, 法拉第以惊人的直觉引进了“电力线”和“磁力线”的概念, 抛弃了瞬时“超距”作用的观点; 而基于“库仑定律”、“毕奥-萨伐尔定律”和“法拉第电磁感应定律”, 麦克斯韦提出了电场和磁场的统一数学描述, 预言了电磁波的存在, 提出光是一种电磁波. 这是首次把看起来表现截然不同的“电、磁、光”现象统一起来, 被称为继牛顿以来物理学的第二次大统一. 为了使电磁场和牛顿定律相容, 麦克斯韦提出电磁波可以

引用格式: 杨金民, 王飞. 爱因斯坦的未竟之梦: 物理规律的大统一. 科学通报, 2016, 61: 1-5

Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1-5, doi: ?

用经典力学来解释,只要假定“以太”的存在,而电磁波通过以太的起伏振荡来传播.20世纪初期的一系列实验,如迈克尔逊-莫雷实验等,发现了“以太”假设的困难,迫使人们放弃以太假设.

1.3 时间、空间和物质的统一

1905年爱因斯坦建立了狭义相对论,彻底抛弃了“以太”假定;到1915年,基于其以前发现的等效原理和广义协变性原理,爱因斯坦成功建立了广义相对论的引力场方程,把描述时空几何结构的爱因斯坦张量和描述物质的能动量张量联系起来.狭义相对论基于相对性原理和光速不变原理,把时间和空间统一成平直的四维时空;而在广义相对论中,时空不再是平直的,本身变成了动力学变量,由于物质而发生弯曲.一个通俗的说法是,在广义相对论中“物质告诉时空怎么弯曲,弯曲的时空告诉物质怎么运动”.

1.4 引力和电磁统一的尝试

在广义相对论建立以后,卡鲁扎(Kaluza)把广义相对论从四维推广到五维,五维度规张量中的十个分量是描述四维时空的度规,四个分量描述电磁场,一个分量描述暴涨场(dilaton);而五维场方程可以约化为四维场方程、麦克斯韦方程和克莱因-高登方程.克莱因(Klein)提出了时空紧致的观点,认为第五个时空维度是卷起来的尺度很小的圆.卡鲁扎-克莱因理论是第一种把引力和电磁相互作用统一起来的框架,可以解释电荷量子化.但最初的卡鲁扎-克莱因理论遇到了一系列困难,如理论预言的电子质量和电荷的比值和实验严重不符以及额外维的稳定性等问题.解决这些困难的尝试也推动了理论的进展.爱因斯坦晚年就是沿着这种思路统一引力和电磁相互作用,但没有获得成功.改进的卡鲁扎-克莱因理论,如尝试在十一维统一标准模型规范对称性的理论,遇到了手征费米子、额外维的稳定性等困难,但卡鲁扎-克莱因的思想仍是现代统一场论的重要基础之一.

1.5 统一场论的基础(规范对称性)

现代物理学的基础是对称性.著名的女数学家诺特(Noether)证明了对称性和守恒律的对应关系,如能动量守恒对应时空平移不变性;角动量守恒对

应转动不变性.数学上人们用不同的群来刻画对称性.外尔(Weyl)和泡利等人首先认识到电磁场和 $U(1)$ 局域对称性的关系.基于外尔的局域标度(“规范”的原始意义)变换思想及电荷守恒与 $U(1)$ 规范的关系,Yang和Mills^[1]提出了同位旋守恒和基于局域 $SU(2)$ 对称性的规范场论.规范场论的思想是统一场论的基础,广义相对论也可以看作是一种规范理论.规范场论提出后遇到了规范玻色子质量、量子化和重整化等方面的困难,直到希格斯机制和特霍夫特关于规范场重整化方面的进展后,规范场论才趋于完善.

1.6 核力的统一描述(强相互作用)

强相互作用描述了核子之间的强核力,是自然界已经发现的四种基本相互作用之一.强相互作用在几个费米(fm)的尺度上可以描述把核子束缚成原子核的力;在更小的尺度上可以描述把夸克束缚成强子的作用.量子色动力学(QCD)是描述强相互作用的理论,基于 $SU(3)_c$ 的规范对称性,通过交换无质量的胶子在带“色”的夸克和胶子之间传递相互作用.QCD有“渐近自由”和“色禁闭”等基本性质,在各种实验中得到了广泛检验.核子间的强核力可以看作是夸克间“色力”类似范德瓦尔斯力那样的残留效应.

1.7 电磁作用和弱作用的统一

弱相互作用也是四种基本相互作用之一,描述了原子核的衰变等现象.弱相互作用通过四费米相互作用描述,分为带电流和中性流过程.在弱相互作用中宇称可以不守恒,所以弱作用理论是一种手征理论,相互作用区分左右手.弱相互作用和电磁相互作用强度差别几千倍,看起来很不相同,但数学描述中有某些相似性.格拉肖、温伯格和萨拉姆在上世纪六十年代成功的发展了电弱统一的理论,用基于 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 的规范理论来描述电弱对称性;通过自发对称性破缺机制和希格斯机制,部分带电和中性规范玻色子获得质量,作为弱相互作用的“传递粒子”;而光子仍然是无质量的,来传递电磁相互作用.弱作用和电磁作用都是电弱作用的不同表现.1983年欧洲核子中心发现了理论预言的 W^\pm , Z_0 规范玻色子;2012年欧洲核子中心发现了希格斯粒子^[2].这些发现都验证了电弱统一理论的正确性.电弱统一理论部分统一了物理学中的基本相互作用,是人类认识世界方面的一个重要进步,但距离包括引力在内的统

一场论仍很遥远.

1.8 强作用、电磁作用和弱作用的统一描述 (标准模型)

人们把基于 $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范对称性且包括三代夸克、轻子来描述强作用和电弱作用的理论称为标准模型. 在标准模型中, 理论中有28个自由参数, 包括3种规范耦合常数、9种带电粒子的质量、3种中微子质量、夸克部分的混合以及轻子部分的混合10个参数、强CP相位、希格斯的真空期待值和四次耦合常数. 这些自由参数标准模型不能解释, 需要通过实验来定出. 对于寻求简单和谐的物理学家们而言, 很难相信标准模型是最基本的规律, 而看起来更像一种对基本规律的有效理论描述. 标准模型还有其它的美学和物理学问题, 如电荷量子化的起源、宇宙中重子不对称的根源、精细调节问题、宇宙中的暗物质.

1.9 夸克和轻子统一的尝试(Pati-Salam 模型)

在标准模型中, 带色的夸克和不带色的轻子看起来相互独立的东西. 在上世界七十年代中期, 帕惕(Pati)和萨拉姆(Salam)提出, 轻子可以看作是第四种“色”^[3], 这样夸克和轻子都只是同一硬币的不同方面而已. 另一方面, 该理论中仍然有三种耦合 (如果考虑左右手对称, 则只有两种耦合), 所以仍然没有解释规范耦合的来源.

1.10 强作用、电磁作用和弱作用的大统一

为了真正解释规范耦合的来源问题, 乔治(Georgi)和格拉肖(Glashow)提出了能统一色对称性和电弱对称性的最小形式— $SU(5)$ 大统一模型^[4]. 大统一理论把几种规范群统一在一个更大的规范对称性当中, 所以几种耦合在大统一标度处都有相同的值. 低能下表现的不同规范对称性来自于大统一规范群在大统一能标处的破缺效应. 由于 $U(1)$ 群被嵌入到一个单李群中, 所以大统一理论可以很自然的解释电荷的量子化; 大统一理论可以对宇宙中重子不对称的起源给出解释, 但由于宇宙暴涨的存在, 理论要求宇宙重加热的温度很高, 所以存在一定困难. 大统一理论预言了质子可以通过重的规范玻色子诱导而衰变. 现在日本的超级神冈实验已经限定了质子的寿命在 10^{34} 年以上(下一代的实验将会把质子寿命的限制提

高10倍以上), 这就限定了 $SU(5)$ 大统一能标在 10^{15} GeV以上. Pati-Salam的部分统一理论预言存在重的leptoquark, 能够诱导 K_L 介子到 $e^\pm \mu^\mp$ 的衰变. K_L 介子的衰变实验限制了“轻子色”破缺的标度在 1.9×10^6 GeV左右. 在 $SU(5)$ 大统一模型中, 每一代的物质场被分别放在一个 $SU(5)$ 群的 $\bar{5}$ 和10维表示中; 而在Pati-Salam模型中, 每一代的左右手物质场部分分别处于一个四色的二重态中. 物质场仍然看起来有不同的来源. $SU(5)$ 大统一模型和Pati-Salam的部分统一模型都可以嵌入到 $SO(10)$ 大统一理论, 包括其规范群部分和物质场部分. $SO(10)$ 大统一理论可以真正把物质部分都统一在一个16维旋量表示中, 这样标准模型中所有的汤川耦合都来自于同一项, 都有共同的根源. $SO(10)$ 大统一理论的一个特点是在16维旋量表示中纳入了右手中微子. 其实, 能够自然给出很轻中微子质量的跷跷板模型, 最初就是来自于大统一理论; 另一方面, 跷跷板机制中所需要的很高的右手Majorana中微子质量标度, 可以和大统一能标一致. 中微子部分还可以采用轻子合成机制, 通过宇宙中的轻子不对称用sphaleron效应转化为重子不对称, 很好的解释了宇宙中的重子物质的起源. 夸克-轻子部分混合角的互补性也可能是物质部分大统一的一种反映.

2 目前正在进展的大统一理论

2.1 统一理论对超对称的召唤

在最初的 (非超对称) 大统一理论中, 严格计算会发现, 三种规范耦合并不严格相交于一点. 事实上, 如果用两种较弱的规范耦合 g_1, g_2 相交得到的大统一标度反推强耦合 g_3 在电弱标度处的值, 理论预言和实验观测值会有12个 σ 以上的偏差. 随着温伯格角测量的越来越精确和质子衰变实验的进展, 非超对称 $SU(5)$ 模型已经被排除掉. 另一方面, 人们发现, 当引入低能超对称理论后, 规范耦合统一可以很好的实现. 超对称大统一理论可以很好的结合超对称和大统一理论的优点. 超对称理论是联结玻色子和费米子的一种对称性, 是时空对称性的最大扩充. 超对称变换可以把玻色子变成费米子, 也可以把费米子变成玻色子. 超对称预言每种标准模型粒子都有其相应的超对称伴子. 超对称有很多优美的性质, 能够解决标准模型中的精细调节问题, 能够提供暗

物质候选者,也能给出合适的重子合成机制,而且超对称理论预言希格斯场要小于135 GeV,而2012年发现的希格斯质量正好处在超对称预言的小区间内.尽管现在欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)仍未发现超对称粒子,超对称仍然是TeV标度新物理的最好候选者之一.在Kaluza-Klein统一场论中, KK真空的稳定性要求也倾向于超对称的存在.

2.2 强作用、电磁作用和弱作用的超对称大统一

超对称大统一理论在电弱标度可以回到超对称标准模型,可以给出低能参数间的若干联系.超对称大统一理论一般会存在量纲为五的能诱导质子衰变的有效算符,而且超对称大统一的标度比非超对称的情况要高几十倍,所以在超对称大统一理论中,重规范玻色子诱导的质子衰变是非主导的.由于主导衰变方式的不同,质子衰变的产物也和非超对称大统一的情况不同.现在的超级神冈实验已经排除掉最小的超对称 $SU(5)$ 大统一模型;非最小的 $SU(5)$ 和 $SO(10)$ 超对称大统一模型仍然和实验不矛盾,但很快就可以被最新的实验所检验.另一方面,高维的超对称大统一理论中可以压低量纲为五的质子衰变的贡献,理论仍然可以在未来的质子衰变实验下存活.

2.3 把四种相互作用都统一进来的终极大统一理论

大统一理论可以很好的统一物质和强、弱、电磁三种相互作用,但并没有纳入引力相互作用,这是因为引力场的量子化遇到了根本性的困难.把引力场按照通常的场量子化途径处理会遇到不可重整的困难.毕竟广义相对论是从根本上改变了时空观,其量子化应该和平直时空中的量子场论方法有本质不同.现在主流的量子引力主要有三种途径:超引力、超弦理论和圈引力.

圈引力把广义相对论变成类似规范场论的理论,基本的正则变量为阿希提卡-巴贝罗联络.圈引力只涉及了引力量子化,很难给出规范相互作用和物质场以及物质场相互作用的拉氏量,所以只可能是终极理论的一个组成部分.

超对称的局域化可以得到超引力理论,包含了自旋为3/2的引力微子和自旋为2的引力子,能自然包括引力理论.超引力理论有可能不会遇到普通量子引力中的发散困难.对于四维 $N=8$ 的超引力,早期人

们曾预期该理论没有紫外发散;其后人们构造出在壳的三圈抵消项,认为三圈层次上发散存在;再后来的实际计算发现,三圈层次上发散能抵消掉,发散最早要到七圈层次;最近研究表明,理论在微扰论意义下可能是紫外有限的^[5].尽管该理论不是现实的理论,如不能纳入手征费米子场、没有破缺扩展超对称的机制等,但超引力研究的进展表明理论的紫外特性可能比预期的好.低维的扩展超对称可以由高维的超引力理论通过维数约化得到,如11维 $N=1$ 的超引力理论可以约化到4维 $N=8$ 的超引力理论.11维的超引力是早期的“终极理论”候选者,也有前面所述众多理论上的困难.超引力的困难基本都可以在超弦理论中得到解决.

弦理论发源于对强相互作用的研究.在弦理论中,基本对象都不是点状的,而是具有一维(或高维)结构、特征长度很小为 10^{-32} cm的弦(包括具有两个端点的开弦和没有端点的闭弦),而不同的粒子对应弦的不同振动模式.由于把相互作用和物质都统一用弦描述,所以弦有可能统一包括引力在内的相互作用.量子场论中点粒子的世界线在弦理论中变成了二维世界面或者管道,这样点粒子的相互作用顶角就变得光滑,相互作用的时间和地点不再是不变量而是依赖于观测者的,所以我们可以预期理论不出现发散.弦理论的谱预言了无迹对称张量的存在,可以描述自旋为2的引力子,其长程行为和广义相对论一致.玻色弦自洽性要求时空的维数为26维;而为了引入费米子而包含超对称的超弦理论要求时空的维数为10维.和量子场论中拉氏量的任意性不同,理论研究表明只存在5种自洽的超弦理论: I、IIA、IIB和两种杂化弦理论 $SO(32)$, $E_8 \times E_8$.而基于弦的非微扰性质的进展, Witten等人发现五种超弦理论都可以作为11维M理论的各种极限,相互之间可以通过S, T等对偶相互联系起来. M理论的理论框架仍然没有完全建立起来,特别是其强耦合非微扰区域的性质.规范对称性可以包含在杂化弦理论中,手征费米子也可以在超弦理论中实现.超弦理论可以将引力量子化,而且可以给出有限的结果,解释黑洞熵.理论的自洽性能自然将引力和其它作用统一起来,是终极理论的最热门的候选者.超弦理论是一个仍在发展中的理论,仍然存在一系列的理论问题,例如其形式只对应场论中粒子形式的描述,仍然缺乏波动形式的描述等^[6].另一方面,超弦理论实验检验

很困难，只能在宇宙早期留下某些线索。量子引力方面的新进展也会进一步促进人们对“终极”理论的认识。

3 展望

近几百年来物理学的发展，使得人类对物质世界的基本规律已经有了比较深刻的认识。尽管还有

许多不尽人意的地方，现阶段的理论框架已经在一定程度上实现了爱因斯坦的统一之梦。对物质世界和运动规律统一的追寻是人类文明的标志之一。大统一理论虽然艰难曲折，但具有超高智商的人类最终会找到这个统治万物的终极真理。这正是：宇宙洪波淘英雄，终极统一胸臆中，路漫雾蒙苦求索，前赴后继为追梦。

参考文献

- 1 Yang C N, Mills R L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Phys Rev*, 1954, 96: 191–195
- 2 Yang J M. A brief review of Higgs particle. *Physics*, 2014, 43: 25–32 [杨金民.希格斯粒子之理论浅析. *物理*, 2014, 43: 25–32]
- 3 Pati J C, Salam A. Lepton number as the fourth color. *Phys Rev D*, 1974, 10: 275–289
- 4 Georgi H, Glashow SL. Unity of all elementary particle forces. *Phys Rev Lett*, 1974, 32: 438–441
- 5 Kallosh R. The ultraviolet finiteness of $N=8$ supergravity. *J High Energy Physics*, 2010, 1012: 009
- 6 Witten E. What every physicist should know about string theory. *Phys Today*, 2015, 68: 38–43



杨金民

一直从事粒子物理中的新物理研究，在超对称和大统一方面合作发表了一系列文章。杨金民 1995 年在中国科学院理论物理研究所取得博士学位，然后到美国西北大学、爱荷华州立大学和日本东北大学做博士后研究，2000 年被中国科学院理论物理研究所引进为“百人计划”研究员



王飞

2006 年在中国科学院理论物理研究所取得博士学位（导师为杨金民），然后到清华大学和澳洲的莫纳什大学从事博士后研究，2012 年被郑州大学引进为教授。