

一个探索中的新的物质的统一的图像

——最小的超对称的大统一理论¹⁾

何祚庥 庆承瑞

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要 介绍了一种正在探索中的新的物质统一的图像, 指出这一理论除涉及粒子物理的基本问题以外, 并和宇宙论、宇宙结构问题密切相联系. 还回顾了1972年在云南落雪山上所观测到的一个长寿命带电的重粒子的事例, 指出这一事例有可能成为进一步探索这些理论问题的重要线索. 作者们还怀念曾对云南站大云雾室建造有贡献的几位师长们.

关键词 暗物质, 超对称, 大统一

Abstract In this paper the minimal supersymmetric grand unification scheme (or more precisely, scenario) in particle physics is reviewed, and its relevance with cosmology and large structure in the Universe is emphasized. In particular, an exotic event of a long-life, charged and heavy particle observed in 1972 at Yunnan Cosmic Ray Station (YCRS) is described. We also point out that this event might provide a clue to the further study along this scheme. This paper is dedicated to our teachers, professors Tsien, Chang, Zhu and Xiao, who played decisive role in founding YCRS.

Key words dark matter, supersymmetry, grand unification

物理学的根本奋斗目标之一, 是不断地追求物质世界的统一. 爱因斯坦和海森伯都研究过统一场论. 20年前, 人们在建立了量子色动力学、弱电统一理论的基础上, 提出过一种强、弱、电三种相互作用的统一的大统一理论. 然而这样的大统一理论也失败了. 前几年来, 有些人突发奇想, 希图建立一种“包罗万象”的最终理论 (theory of everything), 亦即所谓超弦理论. 在实践面前, 这一理论也已摇摇欲坠! 所谓“包罗万象”的理论只能是“空间无为”的理论, Theorg of No Hring 的别名! 现在人们总结了历史经验, 开展了所谓最小的超对称的大统一理论的探索. 有迹象表明, 这一新的追求已成为许多不同领域, 如粒子物理、核物理、天体物理、宇宙论物理等领域共同奋斗的目标, 成为领导当代物理学发展的主导的共识. 许多

物理工作者纷纷调整他们的科学工作. 这一探索是怎么一回事? 这一追求能成功吗?

最小的超对称的大统一的理论, 是在总结和分析了大统一的理论的失败的原因的基础上, 提出的一种新的想法.

首先要介绍的是什么是大统一理论? 自70年代以来, 量子色动力学理论在解释粒子强相互作用种种现象上, 获得了巨大成功. 1967—1968年间提出的弱电统一理论, 在解释粒子间弱相互作用和强相互作用方面, 也获得了巨大的成功. 量子色动力学所以成功的原因, 是由于引进夸克(又称为层子)和规范场论; 弱电统一理论所以获得成功的原因, 也是由于引进了夸克再加上带有真空破缺机制规范场论. 既然

1) 1994年4月1日收到

弱相互作用和电磁相互作用能在引进夸克或层子观念再加上带有真空破缺机制的规范场论的基础上,实现了二者的统一,那么人们能否在夸克或层子观念基础上,对带有破缺机制的规范场论进一步加以扩展,从而实现强、弱、电的更大的统一?这就是自1973—1974年代以来,人们普遍关注的大统一理论的基本思想。

为什么这一理论竟然获得许多物理工作者的赞赏?其原因是:(1)有相当多的大理论工作者比较仔细地计算强弱电三种相互作用耦合常数随能量转移尺度的变化,发现这三种耦合常数竟然在能量为 10^{15}GeV 尺度时,相交于一点。这使人们看到在理论上确有统一的可能。(2)由当时称为SU₅对称的大统一理论出发,可算出决定 Z^0 和 W^\pm 粒子质量比值的一个参量 $\sin^2\theta_w$,并和实验相当符合。(3)这一理论能预言质子的寿命是 10^{30} 年,能预言宇宙间必定存在着数量可观的磁单极子,以及一大批暂时还难看到的寿命极短、质量极重的许多粒子。(4)尤有有趣的是,这一理论似乎能解释宇宙间核子数和光子数之间的比值,这就为粒子物理的研究和宇宙论的研究找到一座桥梁,在“宇宙之大”和“粒子之小”之间,也能找到某种的“统一”!

所以,一时之间,很多人都为这一令人振奋的前景所鼓舞,提出了大量的实验方案和理论分析,为这一前景而奋斗!

可惜,好景不长,首先是质子的寿命的测量值并不是 10^{30} 年,而是至少大于 10^{32} 年!其次,大统一理论所预言必然存在的磁单极子,虽然屡经高灵敏的实验装置的探索,并没有能找到!为了克服这一困难,于是不惜修改宇宙论,说宇宙演化早期,有一个暴胀阶段,即在早期宇宙膨胀的极其迅速而冷却,以至于磁单极子来不及产生!当然,暴胀宇宙论所以提出,还有宇宙学上内在的原因。然而,这一新的暴胀宇宙论有一个重要的预言,那就是宇宙的总质量等于一个和哈勃常数相关的临界质量,此临界质量约为现在观测到的宇宙质量的10倍,而其余的90%的未能观察到的暗物质就猜测为中微子。理论

计算表明,如果中微子具有 8eV 的静止质量,就能解释宇宙中何以还有这90%的尚未观察到的质量。于是,在国际科学界就掀起了测量各种中微子静止质量的浪潮。然而,正当人们热衷于弥补这些漏洞的同时,却有一些理论工作者根据已测得的精度更高的强、弱、电相互作用耦合常数的实验数据,又重新计算了这三种耦合常数随能量转移的变化,结果发现这三种耦合常数在能量尺度为 10^{15}GeV ,并不相交在一点,而是在八倍标准偏差以外,分别相交在三点!这就在根本上动摇了大统一理论!与此同时,早年人们通过“精确计算”而算出的 $\sin^2\theta_w$ 的数值,也和最新高精度的实验值不符,相差更大,达到10倍标准偏差以外!

为了弥补大统一理论的许多漏洞,于是人们便把“超对称”理论引进了宇宙论。“超对称”是探索中的一种对称性,其特点是认为玻色子(指整数自旋的粒子)和费米子(指半整数自旋的粒子)之间有某种破缺了的对称性。因而现有已观测到的粒子,均有它的超对称的伴侣,并具有 $R=1$ 的量子数,而现有已知粒子,都只具有 $R=0$ 的量子数。于是,拟议中的粒子物理中的家族,就立刻增加了一倍!可是,这些新增加的粒子家族,大多都有一个特点,那就是它们的重量均极重,寿命亦较短,以致于目前的超高能对撞机上,无法观测这些粒子!

但是,当人们引入这些新添加的超对称粒子后,立即产生两个后果:(1)上述的三个耦合常数将在 10^{16}GeV 的范围内重新交在一点,这就使理论上的统一有可能复活,而且质子衰变寿命得以延长到 10^{34} 年以上,从而和目前实验下限不矛盾;(2)由这一超对称的大统一理论又能精确地算出 $\sin^2\theta_w$ 的数值,这和目前高精度的实验值相当符合。

于是,旧事重提,强、弱、电三种相互作用的统一,就又远景在望了!

为什么这一新的“超对称”的“大统一”理论,还要加上“最少”的形容词。这是因为迄今为止,实验上还没找到任何一个“超对称”粒子,现在却忽然引进了一大族,这未免想得太过

份,为谨慎起见,仅仅引进了为保持理论上的自洽性所需要的“最小”的添加。这就是最小的超对称的标准模型的由来,而它的进一步扩展,就是最小的超对称的 SU_3 的大统一模型。

但是,这一理论也包含有不可避免的太多的磁单极子。所以,也必须同时引进暴胀宇宙论,也就预言了宇宙中必然存在着暗物质。所以,很多实验物理学家又转过来从事宇宙中可能存在的暗物质的探索。

随着人们对暗物质问题研究的深入,人们发现,仅有质量很轻的中微子作为暗物质的候选者,并不足以完整地解释由早期宇宙,直到星云团、星系的形成及其在大尺度上的分布。为了能符合目前天文学上的观测数据,还必须有冷暗物质的参与。例如,由质量为 100GeV 以上的很重的但是中性的不带电的稳定的粒子便是组成冷暗物质的可能成份之一。有兴趣的是,上述最小的超对称的标准模型及其大统一理论,却能提供这样的粒子。

上面曾经提到,由于引进了“超对称”,因而在“超对称”理论中,不可避免地要引进大量的不稳定的,并且质量极重的超对称粒子。但是,在所引进的所有的超对称粒子中,必有一个相对最轻的、中性的,并且是稳定的粒子的存在。因为这些超对称粒子必然带有 $R=1$ 的量子数,这使得这些超对称粒子,将不能转化为通常人们所熟知的夸克、轻子或中间玻色子等粒子,因而必将在宇宙空间中稳定地存在,这就成为冷暗物质的最佳候选者。

近年来,宇宙背景辐射的高精度的观测的实验,亦即称为 COBE 的观测实验表明,宇宙中的确存在满足普朗克黑体分布的宇宙背景辐射,其温度是 $2.73\cdots\text{K}$,其偏离黑体辐射的量,仅仅为 10^{-5} 这样小的相对数值。为了从理论上解释这样的“偏离”,一个最佳的模型是:宇宙中将有 10% 常见物质,30% 热暗物质,亦即是有质量的中微子,60% 冷暗物质。超对称的中性粒子却恰好填补了所需的空缺。这就是当前基于最小的、超对称的标准模型,所提出的关于宇宙组成的可能的图像。

为了验证这一新的理论,日内瓦欧洲核子联合中心 (CERN) 在前一时期正在酝酿决定将它们的质心能量达 180GeV 的正负电子对撞机方案,提高到 220GeV 以寻找由这一理论所预言的质量约为 110GeV 带电的超对称的黑格斯粒子。这一行动也促进了人们进一步思考着,能否在实验上真的看到这种假想中的超对称粒子?

早在 35 年前,亦即在 1958 年,已故著名物理学家、中国科学院院士张文裕教授,曾提议在云南落雪山上建立一个云雾室,以观测高能宇宙线种种物理现象。这一建议立即得到当时的原子能所所长、著名物理学家、中国科学院院士钱三强教授的大力支持和关注,并由当时的研究员,后来是中国科学院院士的肖健教授主持并负责建造。经过许多人的协作,这一大云雾室终于开始运转,性能良好。1972 年,在当时的云南落雪山高山观测站站长霍安祥教授(当时是助理研究员)的主持领导和组织下,在大云雾室里,竟记录到一个质量至少大于 10GeV ,或很可能大于 40GeV ,寿命长于 $0.5 \times 10^{-8}\text{s}$,但飞行速度并未达到极端相对论的带电重粒子^[1]。这一新发现引起了人们的广泛注意,也引起了许多理论工作者的思索,这一粒子能纳入当时已知的粒子家族吗?

已故著名物理学家,后来是中国科学院院士的朱洪元教授反复研究了这一新发现的事例,力图对这一新发现的事例作出合理的解释。但是,反复进行计算的结果,总是表明这样一个重粒子事例,竟然不可能由宇宙线中的极高能量的粒子碰撞到大气层中的氧、氮等原子核上产生!因为要产生这一极重的粒子,在质心系中至少必须有超过此粒子静止质量数倍的高能质子,即令这一新产生的重粒子在质心系内速度很小,但经过坐标变换换到实验系,就必然落在极端相对论的区域。也就是在实验系中,这必然是高速飞行的重粒子,而不是像云雾室中所测到的那种以较低速度但仍接近于光速而飞行的粒子。

为什么仅仅从运动学的角度,就不能给以

合理的说明？我们都感到困惑：是不是这一“粒子”只是云雾室记录到的某种极端相对论的粒子，而只是由于偶然的统计涨落而造成的假象？可学术论文是发表了，但是限于记录观测到的事实，一句也没有涉及它的理论解释。

正是基于上述原因，虽然这一事例是重要发现，是属于首次观测到的稀有现象，新华社记者也赶到现场采访，准备重点报道这一发现。但是，当时主持这一工作的霍安祥站长却坚决谢绝，反对在报纸上突出报道这一事例。

可是，如果认为在宇宙中存在着暗物质，存在着尚未观测到的稳定的中性的超对称的重粒子，那么只要有能量足够高的高能质子对这种中性的超对称粒子撞击一下，就能将这一稳定的超对称粒子，激发成飞行速度接近于光速的、带电的但寿命并不很短的另一超对称的重粒子。这样云南站大云雾室的事例就能自然地得到解释。当然，上述这一解释仅仅考虑到在宇宙中可能存在着由中性的、稳定的超对称粒子作为“靶”的情形。但是，如果在宇宙中可能存在着中性的、稳定的、超对称的但其能量是低能的粒子的话，那么就必然由于某种未知的加速机制使得在能量较高的宇宙线中，也存在着这种中性的、稳定的但是能量是高能超对称粒子。那么当这种粒子轰击到原子核上，实际上仅和原子核中的质子起作用，也就能由碰撞中产生另一带电的、寿命较长的、能量适中的超对称粒子。将上述两种可能的解释用简洁的符号表示出来，也就是

$$\tilde{\chi}^0 + p \rightarrow \tilde{\chi}^+ + p + \pi^-$$

其中 $\tilde{\chi}^0$ 和 $\tilde{\chi}^+$ 分别是中性的和带电的超对称粒子。

当然，如果云南站大云雾室所发现的事例能够由以上方式来解释的话，当然也就可能有

$$\tilde{\chi}^0 + p \rightarrow + \tilde{\chi}^+ + \text{其他强子和轻子}$$
$$\tilde{\chi}^-$$

等过程。而且其中所产生 $\tilde{\chi}^\pm$ 等粒子，也可能有低能、中能以及高能等不同能量，并且也可存在于极低能量的状态，这就表现为重游离事例或迟道粒子。这就启示人们要做进一步实验研

究。

如果科学发展的未来，确实证明了存在着暗物质，存在着这中性的或带电的超对称的粒子，那么云南站大云雾室所发现的寿命较长的带电重粒子事例，就是验证上述可能的物理的统一图像的第一个证据。至少，这一事例为人们物质可能存在的形式的探索，提供了有兴趣的线索。

已故的张文裕教授在生前曾多次对他的学生们（包括作者）说过：“实验物理学家们永远没有权利丢掉他们所观测到的任何一个实验数据，而理论物理学者确总有义务不断修改所塑造的理论模型”。这里的前半句话是彻底的唯物论，后半句话深刻地阐述了辩证法。

云南站大云雾室所记录的这一稀有事例，正是在这种彻底的唯物主义精神的指引下，而整理而公布的，虽然这一事例在当时得不到合理的理论解释。

最小的超对称的标准模型或其延伸的大统一理论能为实验所证实吗？现在，我们还没有任何根据对这一理论未来的发展作出预言。但是，这将不同于前几年很多人所热衷的所谓“包罗万象”的理论，或超弦理论。恩格斯曾深刻指出：“世界的真正的统一性是在于它的物质性。”^[2]所以，物质世界的统一，是物理学家们坚定不移地追求的重大目标。但是，这种统一是由小到大，由部分而整体，由相对而绝对，而逐步地发展的。超弦理论中的许多模型所以摇摇欲坠（例如，由超弦理论计算出来的 $\sin^2\theta_w$ ，就和实验严重不符合），根本原因在于期望值过大！这也再一次说明那种对“终结理论”的追求，何等违背了认识的辩证法！

我们所以要写这篇介绍这一新理论的文章。一是因为这一新理论已经并正在引起许多科学工作者，首先是实验工作者而不仅是理论工作者的普遍关注，二是因为这一理论模型竟然和 21 年前所发现的云南站重粒子事例密切相关！

尤其当我们追忆这一 21 年前的发现的时候，不能不念及前辈科学家钱三强、张文裕、朱

洪元、肖健等教授的献身精神和所作出的贡献。他们“筚路蓝缕,以启山林”,为后人开拓了前进的道路,而他们自身却充当了铺路的石子。1993年,钱三强、张文裕、朱洪元教授均相继谢世。肖健教授已离开我们将近10年。今天回忆这一21年前的发现,也是我们对前辈师长的一个纪念!

南无钱、张、朱、肖!

“南无”在佛经中是光荣啊的意思,亦即光荣归于钱三强、张文裕、朱洪元和肖健教授!

参 考 文 献

- [1] 中国科学院原子能研究所云南站,物理,1-2(1972),57.
- [2] 恩格斯,马克思恩格斯选集,人民出版社,3(1972),83.

新兴的波前工程学¹⁾

杨国桢 顾本源 张国庆 董碧珍

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

摘要 基于光学衍射原理而发展起来的新光学技术,应用于光学掩模设计,可制作逼近临界尺寸的微小元件和极高密度的集成电路芯片。波前工程学可能导致集成电路模板制作上的一场革命,其前景十分引人瞩目。

关键词 光学掩模,光刻蚀术,衍射光学,波前工程

Abstract New Optical techniques (called wavefront engineering) are being developed based on the basic principle of optical diffraction and applied to the design of photomask. They make it possible to fabricate the chips of the integrated circuit with critical-sized elements and extremely high integrated density. Wavefront engineering may lead to a revolution in the design and fabrication of photomasks used for the preparation of integrated circuits. It is expected that this field may have brilliant prospect in future.

Key words Photomask, photolithography, Diffractive optics, wavefront engineering

1 引言

物理学家总是被微小结构的魅力所倾倒而不断的追求研制愈来愈小尺寸的结构元件^[1]。例如,如何使微型计算机制作的更加紧凑、袖珍化,以成为众多科学家孜孜不倦的攻克的目标。在当今的工艺水平之下,存储芯片的个别元件的临界尺寸小到500nm以下。在卫星抛物线天线反射接收机上所使用的微波晶体管,要求栅极尺寸小于 $1/4\mu\text{m}$ 。

微结构元件的制作,通常应用光刻蚀、腐蚀、沉积和插层生长等复杂的工艺技术。光刻蚀技术所依据的基本原理,几乎是维持了近一个世纪而一成不变,它是利用光来实现复制图案的一种技术。最初,这一技术是用于复制雕刻品和照片,随后用于制作印刷干板。早在60年代,就已经发现光刻蚀术是大量复制集成电路的理想技术。这项技术中,首先要设计出复制用的模板。早先时候,这种模板像一种手

1) 1994年8月9日收到