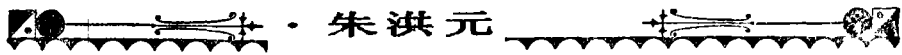


高能物理学发展的回顾与展望(下)



· 朱洪元 ·

(续上期)

标准模型理论显然还需要提高。但今后一段时期的发展不会像 50 年代、60 年代、70 年代那样快。因为没有出现和理论相矛盾的实验结果来指引理论发展的方向,只能根据现有理论研究的长远目标和理论本身所包含的内部矛盾来进行探索。

回想在本世纪 20 年代,中子还没有被发现,认识到的基本粒子只有两种:电子和质子。当时已经发现的基本相互作用只有两种:万有引力相互作用和电磁相互作用。理论中的基本参数只有六个:

$$\hbar, c, m_e, m_p, e, G_N$$

当时许多理论物理学家期望,假使能建立万有引力相互作用和电磁相互作用、电子和质子的统一理论,从中将三个无量纲常数

$$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836$$

$$\frac{G_N m_e m_p}{\hbar c} = 3.2 \times 10^{-44}$$

推导出来,那末我们就终于达到最终理论(Theory of Everything).

爱因斯坦和爱丁顿在他们的后半生中致力于这种探索,但都没有成功。

从那时到现在又发现了二种基本相互作用:强相互作用和弱相互作用;发现了几百种前所未有的粒子,已知物质的“基本”组元从两种增加到 30 种以上。理

得到类似的结果。近年来,朗道尔(R. Landauer)等仔细分析信息处理中的能量极限,认为在理想化的计算和测量等过程之中,不可避免的能流消耗仅在于将存储的信息抹去,对于一个比特的信息,也正好等于 $kT \log_2 2$ 。这样,殊途同归,结论基本相同。

我们不妨回头来对图 2 所示的西拉德的理想机器的问题作一定量的分析。当妖精对分子的位置在左还是右作出判断,提供正好一个比

特的信息,最少需要 $kT \log_2 2$ 的能量。但他利用信息使单分子气体膨胀作功,这相当于气体容积加倍的真空膨胀,提供的功为 $kT \log_2 2$,两者正好得失相抵。

最近有人来探讨妖精是否有采集信息更经济的方法,提出将 N 个西拉德机器耦合起来,能否有利可图。当等到 N 个分子同样都处在左侧时,妖精才来操纵机器作功。这些对外作功等于 $NkT \log_2 2$,而清除信息所需能量仍为 $kT \log_2 2$,似

论中的基本物理参数从 6 种增加到 21 种。理论上需要解释的无量纲常数从 3 种增加到 18 种。看来即使 20 年代最伟大的物理学家也将宇宙看得太简单了。在 20 年代提出来的问题到今天已经发展为:如何统一地理解轻子、层子、光子、 $W^+ \cdot W^- \cdot Z^0$ 中间玻色子、胶子、引力子、希格斯粒子等一切粒子和它们之间的一切基本相互作用;如何建立一个基本理论,能统一地解释所有的实验结果,又能统一地将 18 个无量纲常数从这个理论本身中推导出来。显然,自从 20 年代以来,我们对自然的认识扩充和深入了很多。在另一方面也使我们进一步认识到宇宙的深广和我们的无知。我想,认识到我们的无知是一大进步。这将激励我们更努力向更高的目标去探索。

标准模型理论和广义相对论中的一小部分参数来自规范场和万有引力场部分,因此和物理规律的对称性有关。要减少来自这方面的参数,看来得探索物理现象深处是否隐藏着更大的对称性。目前理论探索中相当大一部分就属于这一个方面。如

- 大统一理论
- 超对称理论
- 超引力理论
- 超弦理论

在 18 个无量纲参数中,绝大部分来自希格斯场部分,因此和对称性的破缺有关,一切粒子的质量都和希格斯场有关。质量不仅是一切粒子的一个基本性质,而且是万有引力场的源。而且不同代的粒子之间的连系也是通过希格斯场实现的。在另一方面,理论中和

乎有利可图了。但是且慢, N 个粒子都在一侧的几率是非常小的,对应于极其难得的涨落,需要等待很长的时间。类似于斯摩罗柯夫斯基设想的利用布朗粒子来作功的机器,实际上还是行不通的。通过以上的分析,似乎可以得出结论,信息处理所消耗能量的下限还是由热力学第二定律所规定的,否则将导致第二类永动机的问世。到头来,妖精虽然神通广大,还是象孙悟空一样,翻不出如来佛的手掌心。(待续)

希格斯场有关部分的形式还特别繁杂。这和希格斯场的耦合是汤川型有关，没有规范场的耦合方式那样严密。例如希格斯场和轻子场、层子场的对角耦合常数为

$$\begin{aligned} g_e &= 2 \times 10^{-6} \\ g_\mu &= 4 \times 10^{-4} \\ g_\tau &= 7 \times 10^{-3} \\ g_b &= 2 \times 10^{-2} \\ g_t &\approx 6 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

大小相差竟达五个数量级。希格斯场和层子场间的非对角相互作用常数由 CKM 矩阵元表达、决定这些矩阵元的参数的目前的实验值为：

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= 12.6^\circ - 12.9^\circ \\ \theta_{23} &= 1.7^\circ - 3.3^\circ \\ \theta_{13} &= 0.057^\circ - 0.4^\circ \end{aligned}$$

它们相差最大也达两个数量级。因此弄清楚希格斯场的实质是什么？对称性自发破缺的物理机制是什么？是非常重要的问题。目前进行的如：

对称性的动力学自发破缺理论。

人工色理论

等等的研究就是属于这方面的探索。

希格斯场部分之所以包含有如此多参数的另一个原因是：轻子和层子各有三代。假使只有一代，那末这部分的参数就只有 5 个，其中的无量纲参数的大小也就不会相差如此多的数量级。我们对于“代”这个自由度的实质是什么，几乎一无所知，必须对之进行探索。

三代轻子和层子的一部分性质虽然差别很大，但不同代中的轻子的超荷和同位旋相同，不同代中的层子的超荷和同位旋也相同，而且轻子和层子的电荷又相互匹配得恰巧能使标准模型理论具有内部自洽性。可以将轻子和层子排列成为下表：

ν_e	e	u^R	d^R	u^G	d^G	u^B	d^B
ν_μ	μ	c^R	s^R	c^G	s^G	c^B	s^B
ν_τ	τ	t^R	b^R	t^G	b^G	t^B	b^B

这种表在形式上和化学元素周期表有些类似。因此正在探索：轻子和层子是否也是具有内部结构的复合粒子。人工色理论则在探索希格斯粒子是具有内部结构的复合粒子的可能性。也有人在探索 W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间玻色子也是具有内部结构的复合粒子的可能性。因此探索物质结构的下一个层次也是当前高能物理基础研究的一个方面。

从物理学发展的历史看，这两个研究方向从来就是物理学中两个非常重要的，而且又相互密切联系的研究方向。

认识到空间和时间是一个不可分割的四维统一体，将空间的对称性和时间的对称性接合起来，扩大为庞加莱对称性，导致了狭义相对论。

引进空间和时间的定域平移对称性导致了万有引力相互作用的基本理论：广义相对论。而引力相互作用决定星系的结构和太阳系的结构。

电磁相互作用来源于内部自由度中的定域 $u(1)$ 对称性；它决定原子的结构、分子的结构、以及宏观物体的微观结构。

内部自由度中的色空间中的 $su(3)$ 定域对称性导致强相互作用的基本理论：量子色动力学。而强相互作用则决定原子核的结构和强子的结构。

将内部自由度中的同位旋空间中的定域 $su(2)$ 对称性和超荷空间中的定域 $u(1)$ 对称性结合起来，并引进规范对称性的自发破缺，导致电弱相互作用的统一理论。而弱相互作用最后决定轻子、层子、强子、原子核是否稳定。这决定现阶段中宇宙中物质存在的主要形式。

看来当前理论探索中的这两个基本方向是对的。但是迄今为止，这些探索所取得的成就很有限，而且同时带来了新的问题。例如：

大统一理论有可能解释电弱统一理论中的一个重要参数的值：

$$\sin^2 \theta_w = 0.230.$$

但它所预言的质子衰变至今在实验上还没有发现。而且它的规范场部分虽然变得简单了，但其希格斯场部分却变得更复杂了，不仅在理论中带进了更多的参数，而且还带来了“等级问题”。高次近次的辐射修正将低次近似的理论结果修改得面目全非。

“等级问题”可能通过引进“超对称”来解决。但超对称所要求的费米子和玻色子之间的对称性迄今在实验上还没有发现任何迹象。超对称粒子一个也没有发现。此外，即使引进超对称，还无法解决量子万有引力理论中的发散困难。

超弦理论将一维弦的概念取代点粒子的概念。为了保证理论的自洽性，将表达外部自由度的时空流形从四维扩大到 10 维，将表达内部自由度的流形从 12 阶群 $su(3) \times su(2) \times u(1)$ 的表示空间，扩大为 496 阶群 $E_6 \times E_6$ 或 $SO(32)$ 的表示空间。一部分理论物理学家曾经期望：超弦理论能成为表达物质的所有基本组元和它们之间的所有基本相互作用的规律的基本理论，其中包括万有引力相互作用，而且在量子化以后不出现发散困难。但要从这种理论推导出可以和现有的实验结果比较的理论结果，还有很长的路要走。如何将外部自由度和内部自由度的流形紧致化到目前实验上观察到的流形，如何将对称性破缺到现在实验上观察到的对称性都还是有待解决的问题。现在已经在担心：超对称怎样会破缺？怎样会从理论中得到

$$\frac{M_p}{M_{pl}} \approx 10^{-17}$$

这样的质量等级? 怎样能得到

$$|A| < 10^{-120} r_{pl}^{-1}$$

这样小的宇宙常数? 其中 M_{pl} 和 r_{pl} 分别代表普朗克质量和普朗克长度。

至于复合模型的研究, 目前还处于更原始的阶段。

看来要在这两个方向上的理论探索取得实质性的进展, 还需要物理概念上的创新和突破。这种创新和突破看来还得由突破性实验来指引探索的方向, 可惜迄今为止, 实验还没有能冲出标准模型理论所反映的物理规律起作用的范围的边界。现在美国已经批准建造 $E_{cm} = 40\text{TeV}$ 的 SSC, CERN 正在筹划将 LEP 扩建为 $E_{cm} = 16\text{TeV}$ 的 LHC。正在讨论建造 B 介子工厂、 D 介子工厂和 ϕ 介子工厂。这些规划中的工程建设不仅是为了能在实验上发现 t 层子和希格斯粒子, 将标准模型理论中的参数定得更准, 进行更精密的实验来更严格地检验标准模型理论; 还希望在比目前高得多的能量领域的实验中、在现有能量领域中精密度比现有实验更高的实验中发现突破标准模型理论的新现象。甚至原子物理实验技术和理论计算技术现在也已经提高到能够进行宇称不守恒的原子电磁跃迁的研究, 用来定标准模型理论中的某些参数。在精密度进一步提高以后, 这类实验还可以用来对标准模型理论进行严格的检验, 希望实验研究在本世纪末以前能取得突破性的进展。

历史上也出现过这样的情况: 关键实验结果早就出来。但理论家长期没有认识到它的重要性。例如: 早在 1890 年, 厄缶就发表了他的关于引力质量等于惯性质量的精密实验结果。但直到 1915 年爱因斯坦才建立了广义相对论。其重要的实验基础之一就是厄缶的实验, 其实已经出现了许多问题有待理论解答。如:

(1) 希格斯场和希格斯机制的实质是什么?

(2) 量子万有引力理论的发散困难不能重正化, 问题出在那里?

(3) “代”自由度的实质是什么?

(4) 是否存在其它尚未发现的自由度?

(5) 是否存在其它尚未发现的相互作用?

(6) 相互作用的传递者为: 光子、中间玻色子、胶子、引力子的存在及其所属群表示由定域对称性决定。是什么原理决定轻子和层子的存在及其所属的群表示?

(7) 为什么有些对称性是定域性的, 而有些对称性是整体性的?

(8) 为什么轻子和层子的质量谱如此特殊?

(9) 狭义相对论表达了外部自由度空间流形和时间流形之间的连系。定域规范不变性表达了外部自由度流形和内部自由度流形之间的连系。电弱统一理论

表达了内部自由度中同位旋空间和超荷空间之间的连系。是否在表达一切物质存在形式的流形, 包括外部自由度流形和一切内部自由度流形之间都存在着有机的连系? 如何在理论上统一地反映所有这些连系?

(10) 广义相对论反映了物质存在的普遍形式: 动量和能量如何影响外部自由度时、空流形的结构。物质存在的特殊形式是否也会影响内部自由度流形的结构?

(11) 能否给予已知的一切粒子和它们之间的一切已知的相互作用统一的理论反映?

以上只是我们所面临的、有待解答的一部分问题的罗列, 远不是全部。有些问题已经在理论上进行探索。这些探索虽然还没有取得显著的进展, 但是这种探索应该继续下去。不能因为十几年来的努力没有取得突破就放弃。在人类认识客观世界的过程的历史长河中, 十几年只能算是小小的一段历程。

北京正负电子对撞机在高能物理将来的发展过程中应该能够作出有意义的、系统的贡献。在这一能区中的探索虽然已经进行了 16 年, 但仍有相当大的领域有待深入探索, 当然在粲粒子物理这一领域, 竞争也还是激烈的。固定靶实验在 D 介子研究方面正在作出很好的贡献。甚至美国的 CESR 和德国的 DORIS 也正在对粲粒子物理作出贡献。因此必须尽力竞争。

目前在国际高能物理界就有中国、日本、西欧、美国、苏联、德国这几个国家和地区有自己的高能加速器或对撞机。过去作出贡献的主要是美国和西欧。其次德国在 B 粒子物理实验研究方面也作出了一系列贡献。但日本并不成功。TRISTAN 的能量虽然比北京正负电子对撞机高十倍, 性能也相当好, 但不幸这一能区下面没有“矿”, 正像 PEP 和 PETRA 一样, 做不出什么有重要意义的工作。至于苏联, 在高能物理实验研究方面投资相当可观, 但在科学上的贡献不多。我国的北京正负电子对撞机能量虽然不高, 但亮度高, 而且在相应能区下面有“矿”。只要能够充分发挥这一优势, 是能够作出系统的、有意义的贡献的。只要做出了这种贡献, 我国就能在国际高能物理界占有有影响的一席之地。

在出成果的同时, 一定会出一大批人材。现在高能物理实验研究是一个科技涉及面广, 需要一个大集体承担的科学研究领域。参加国际合作当然也能作出贡献, 但贡献的面比较少而且窄。北京正负电子对撞机要在科学研究上取得成功, 需要全面的高水平。从对撞机到谱仪到数据获取和分析都需要全面的高水平。估计在这一过程中, 我们的队伍一定会感到很累。但攀登高峰哪有不累的?! 正是在这种全面攀登的过程中才能锻炼出各兵种齐全、各层次人材齐全的队伍, 这对持续保持并进一步提高我国在国际高能物理界的地位是至关重要的。