

评述粒子物理学未来发展

何红建

(清华大学近代物理研究所和高能物理研究中心 100084)

我很高兴看到美国 P5 报告对粒子物理未来发展作了积极展望, 对美国今后 10 ~ 20 年的发展作了总体规划与部署, 试图促进新物理的发现并保持美国作为全球领导者的地位。这个报告特别强调了粒子物理(高能物理)的发展是以“发现”新物理为根本驱动力, 而非单纯验证标准模型; 强调了粒子物理发展的全球性, 并充分挖掘美国高能界现有的优势和资源。

众人皆知, 美国高能物理曾经有过令人瞩目的辉煌, 随着费米实验室 Tevatron 于 1995 年发现顶夸克而达到了顶峰。然而, 这个顶峰恰恰也是美国高能物理在全球领导地位全面衰退的开端。因为就在发现顶夸克两年之前美国参众两院联席会议于 1993 年 10 月表决终止 SSC(Superconducting Super Collider)的建造, 这是一个质心能量为 40 TeV 的质子-质子(pp)对撞机, 对撞能量比欧洲大型强子对撞机 LHC 的 13 ~ 14 TeV 对撞能量高出 3 倍, 具有发现新物理的绝对优势, 原计划 1999 年完工, 与 CERN 在 2000 年关闭大型正负电子对撞机 LEP 正好衔接; SSC 总造价投入在 1993 年终止时预算为 118 亿美元。美国众议院转而支持花钱更多的国际空间站 (Space Station) 的建造, 其造价在 1998 年发射时的预算为 960 亿美元, 远远高于 SSC 造价。因此, 美国国会终止 SSC 项目并非因为美国无钱投入大科学项目, 这一决定主要是由于: (1) 美国两大政党(共和党与民主党)的政治斗争, 特别是与老布什在海湾战争完胜之后未能连任总统直接相关; (2) 国内地区之间(德克萨斯州, 纽约州, 加州)的非良性竞争; (3) 预研与管理不善, 以及国际合作参与不够等因素。美国前总统克林顿在 2013 年 4 月接受采访时公开承认取消 SSC 计划的失误,

“It made me physically ill to let it (SSC) go”, 并说 “I hated to give it up”。SSC 的停建极大地挫伤了美国科学家们追求科学梦想与探索大自然奥秘的信心, 美国错失了保持其在高能物理领域国际领先地位的关键机会, SSC 的终止不仅对美国高能物理, 而且对美国整个基础科学投入与发展均产生了严重的负面影响和打击, 美国高能界从此一蹶不振, 开始了全面衰退的局

面。事实上, 除了国际空间站之外, SSC 的终止并没有使得美国其他众多的基础科研领域因此获得额外的经费增加, 其他一些曾参与反对 SSC 项目的美国学者也并没有因此使得自己的研究领域获得更大利益。SSC 的教训成为美国科学家心中挥之不去的、永远的痛。这样的关键机会一旦错失, 就会一错再错, 越来越被动, 失去更多的生存与发展机会, 从此一蹶不振。目前美国能源部支持高能物理的经费继续缩减(拨到粒子物理研究的预算为 7.52 亿美元), 与过去 10 年相比缩水 15%。费米实验室的 Tevatron 强子对撞机在升级后的能量约为 2 TeV, 但因能量所限, 未能有重大建树, 已于 2011 年 9 月正式关闭, 这标志着美国以高能加速器为主导的重大前沿项目的终结。目前的美国 P5 报告试图重整旗鼓, 幻想保持其昔日的国际领导地位, 但时过境迁, 老骥伏枥, 却早已雄风不在。历史是一本很好的教科书。

与此相反, 欧洲却借此机会, 在国际高能物理发展的激烈竞争中胜出。这也表现出欧洲高能物理学界和 CERN 领导人的高瞻远瞩, 他们坚定地支持和推动高能物理发展。1989 年 CERN 建成周长 27 km 的大型正负电子对撞机 LEP, 并在随后十余年中成功运行, 在量子层次上奠定了标准模型, 为 Tevatron 寻找顶夸克提供了重要依据, 并直接导致了 1999 年诺贝尔物理学奖的颁发。就在美国国会终止 SSC 之后一年左右, CERN 的 LHC 项目在 1994 年底得到了欧盟正式批准。欧洲逐步成为引领国际高能物理的前沿阵地。2008 年 LHC 建成之后, CERN 便毫无悬念地成为全球高能物理中心, 同时也是全球最大的科学中心。2012 年 LHC 不负众望, 在大大低于其原计划的最高对撞能量 (14 TeV) 的情况下, 只在 8 TeV 对撞能量下运行两个月左右就发现了“上帝粒子”(Higgs Boson), 取得了整个物理学期盼已久的一个历史性突破, 并直接导致了两位理论家希格斯和恩格勒特迅速荣获 2013 年诺贝尔物理学奖。CERN 高能物理学家们在发展高能对撞机 LEP 和 LHC 的同时还于 20 世纪 90 年代发明了 World Wide Web (WWW) 和网页浏览器, 从此

推动人类文明进入互联网的崭新信息时代，这是一个划时代的伟大贡献，大大促进了全球科学与工业的迅猛发展，并且改变了全人类的生活与工作方式。这样伟大的成就是当初对 LEP/LHC 所投入的经费所根本无法度量的。这一系列革命性突破与进展在欧洲发生了，而未能在美国出现，难道是偶然巧合吗？这实在值得高能物理界与整个科学界，还有政府科研管理机构与最高层决策领导们认真反思。这也恰恰说明正确地进行长远规划、抓住关键机遇和确保科学计划与科研队伍的持续性发展是至关重要的。美国的沉痛教训和 CERN 在过去 20 年来的辉煌成功（也包括其实验计划直接导致的 1999 年和 2013 年两次诺贝尔物理学奖，以及 2013 年的基础物理学突破奖等一系列重大奖项）形成鲜明对比，也值得中国高能物理学界认真思考。

美国 P5 报告把“发现新物理”作为整个高能物理发展的根本驱动力，提炼了高能物理的五个重大前沿课题：（1）将 Higgs 玻色子作为完成进一步新发现的新工具；（2）继续开展与中微子质量有关的物理研究；（3）确认与暗物质相关的新物理；（4）理解宇宙的加速膨胀、暗能量和暴涨；（5）探索所有可能的未知现象：新粒子、新相互作用和新物理原理。P5 推荐了与这五个导航性课题相关的实验的优先性和最佳时间表。从时间顺序上，主要项目包括测量 μ 子的 $g-2$ 实验和在费米实验室的 μ 子-电子（muon-electron）转换（Mu2e）实验，在 LHC 高亮度升级方面的大力合作，以及美国本土建造的长基线中微子设施（LBNF），这个设施要接受费米实验室改装加速器（PIP-II）产生的世界最高强度的中微子束流。由于高能物理经费近年来持续削减，美国方面希望仅仅通过中等或小规模投资并在近期有可能做出发现的那些领域来实现美国的领导地位，例如，暗物质直接探测，大型巡天望远镜（LSST），暗能量谱仪（DESI），宇宙微波背景（CMB）实验，以及包括短基线中微子实验的小项目。然而，必须注意到，欧洲、日本、澳大利亚等也在积极开展类似的中小型项目，美国有自己的一些优势，但能否在这些项目的竞争中取得国际领导地位还有待观察。这个 P5 报告与 CERN 所长霍耶尔（Rolf Heuer）在 2013 年 12 月 1 日签署的委任状（Mandate）Future Circular Collider Study——FCC 中提出的建造周长为 80 ~ 100 km 的环形对撞机（包

括 ee（250 ~ 350 GeV）和 pp（100 TeV）的宏伟计划形成鲜明对比。

还需要澄清的是，科学研究通常按照“学科”进行机械地划分和规划，从而不同学科的发展潜力常常被孤立看待和评估，科研人员也受到“学科”划分的禁锢，被贴上相应标签，这是非常的不幸，因为这样做忽视了各学科自身的演变与内在关联、不同学科的交叉与融合，以及由此开辟的新领域和引发的科学创新。科学史一再表明，学科划分不是僵化和一成不变的。从公元前 3 ~ 6 世纪开始，电学和磁学被当作两个完全独立的分支进行研究，互不相干，直到 1831 年法拉第发现电磁感应，人类才认识到电与磁不可分割，在此基础上，麦克斯韦创立了统一的电磁学理论——麦克斯韦方程组。从伽利略和牛顿时代直到 20 世纪初，力学与电磁学被当作互不相干的两大学科独立研究，力学家和电磁学家各自为阵，然而 1905 年爱因斯坦创立狭义相对论恰恰统一了力学与电磁学，由此导致一系列划时代的新发现。20 世纪初人类探索更深层次的物质结构——亚原子领域，由此开创了全新的量子力学，它既非经典力学，也非经典电磁学。在量子力学与狭义相对论的基础上才进一步演化出核物理、凝聚态物理、粒子物理这些新兴学科。爱因斯坦推广狭义相对论到引力领域，于 1915 年创立广义相对论，并由此开创了现代宇宙学。宇宙学以广义相对论为基础，其发展则紧密融合了粒子物理的关键要素。20 世纪中叶从量子力学中分化出核物理和凝聚态物理，随后又进一步分化出粒子物理。然而粒子物理与凝聚态物理的演变与发展却一直是相互促进和相互依存，而不是无关与对立的。粒子物理学家南部（Nambu）首次在相对论性量子场论中引入对称性自发破缺的概念，是源于凝聚态物理中的 Ginzburg-Landau 理论和 BCS 超导理论，这进一步导致粒子物理学家希格斯（Higgs），凝聚态物理学家恩格勒（Englert）与布鲁特（Brout）提出规范对称性自发破缺的希格斯机制（又称 Brout-Englert-Higgs 机制）。他们 3 人分享了 2004 年沃尔夫奖。2012 年高能物理实验家们在 LHC 上发现希格斯粒子，直接导致希格斯和恩格勒共同荣获 2013 年诺贝尔物理学奖。这些辉煌成就是粒子物理与凝聚态物理交叉结合、一体化的典范。科学史表明，以整体眼光来学习物理、研究物理、规划物理学发展具有致命的重要性；不同分支的物理学家们需要相互

美国粒子物理战略计划暨有关讨论

学习、相互理解和相互支持，这是孕育物理学革命性突破、推动物理学重大发展的关键因素。

下面我要着重阐明的，就是关于 LHC 发现 125 GeV 希格斯粒子之后探索新物理的动机和方向，这与 P5 报告中提炼的课题 (1) ~ (5) 均有关系。人们通常晓知的是标准模型包含自然界 3 种规范相互作用力：电磁力、弱力和强力。但是，我要强调的是，希格斯粒子参与了 3 大类基本相互作用力：(1) 希格斯的规范作用力；(2) 希格斯与费米子的汤川作用力 (Yukawa Force)；(3) 希格斯的自作用力 (h^3 和 h^4)。这 3 类由希格斯引起的相互作用中只有第 (1) 类属于规范作用力；而其他两种力 (汤川作用力和希格斯自作用力) 都是全新的相互作用力，他们是独立于规范作用力的两种崭新的相互作用力！而且在这今为止的所有实验中尚未被直接检验。对于希格斯传递的汤川作用力的探测将涉及费米子质量的起源与产生机制，对于希格斯自作用力的探测将进一步揭示电弱破缺机制和电弱相变的根源，以及探明希格斯与早期宇宙暴涨的关联等重大科学问题。目前 LHC 在 7 ~ 8 TeV 对撞能量上仅仅对希格斯的第 (1) 类作用给予了初步检测，尚有较大的误差；但是对于希格斯的第 (2) ~ (3) 类新相互作用力还无法给予有效探测。因此，如何探测希格斯粒子的第 (2) ~ (3) 类相互作用是下一代高能对撞机，特别是高能环形对撞机 pp (50 ~ 100 TeV)，能够进行探索的主要任务。

需要强调指出，标准模型中汤川作用力的耦合常数对于所有轻费米子 (除了顶夸克外) 都是不自然的，需要在树图就进行精细调节，例如电子的汤川耦合常数必须人为精细调节为 $O(1/10^6)$ 才能符合电子质量的实验值。但是轻费米子质量起源与顶夸克可能很不相同，也许来自不同的新希格斯粒子等，从而避免树图汤川耦合的不自然性问题。这一切清楚表明，轻费米子质量产生要求超越标准模型的新物理。那么费米子质量产生的能量标度在哪里？早在 10 年前，我与合作者就对探索标准模型中所有费米子的质量产生标度作了模型无关的系统研究，给出了一切费米子质量产生的普适上限，对于标准模型中所有的夸克，其质量产生标度的上限位于 3.5 ~ 84 TeV 范围；而对于所有带电轻子，其质量产生标度的上限位于 34 ~ 107 TeV (参见 Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 221802, *Scales of Mass Generation of Quarks, Leptons and Majorana Neutrinos*

和 Phys. Rev. D 71 (2005) 093009)。这恰恰给环形对撞机 pp (50 ~ 100 TeV) 所覆盖的能量区域提供了一个可靠的关键物理依据。作为此环形对撞机的 Phase-I 的正负电子对撞机 (希格斯工厂) 将会对希格斯的 (1) 类作用给予特别灵敏的探测，能发现新物理可能引起的偏差。还将对希格斯粒子的部分汤川作用力进行有效探测，同时将精确测量希格斯 CP 性质，等等。

另一个要求超越标准模型的重要物理动机涉及希格斯的自作用，即上面提到的希格斯第 (3) 类作用力。希格斯发现后，我们首先要问一个非常基本的问题：标准模型的希格斯粒子是否真是“上帝粒子”？一个名符其实的“上帝粒子”应该不仅仅产生基本粒子的质量，还应该能够充当暴涨子 (Inflaton) 来产生整个宇宙的暴涨，进而导致宇宙热大爆炸 (Hot Big Bang)。否则，标准模型加上广义相对论就无法解释暴涨。因此，希格斯粒子能否真正担当暴涨子 (从而成为名符其实的上帝粒子) 是当前物理学的一个重大前沿课题。标准模型表面上看似完备，但它却无法解释宇宙暴涨，因为暴涨的能量尺度位于 10^{16} GeV 能标 (大统一能标)，而标准模型希格斯势能因其自作用耦合常数的重整化群跑动在 10^{11} GeV 附近就失去稳定性。因此标准模型自身无法在暴涨能标成立，必须引入新物理。如果仍然假定标准模型在暴涨能标至普朗克能标依旧成立，那么就不得不要求顶夸克质量比目前的测量值低至少 2 ~ 3 个标准偏差，从而与高能物理实验矛盾。因此，一个有效的解决方案是在 TeV 能标引入新物理粒子，从而改变希格斯自耦合常数的跑动，保持希格斯势能在暴涨尺度的稳定性，以成功地实现希格斯暴涨 (参见: JCAP 10 (2014) 019, *Extending Higgs Inflation with TeV Scale New Physics* 以及超对称推广 Phys. Rev. D (2015) (R), in Press, arXiv: 1411. 5537, *New Higgs Inflation in No-Scale Supersymmetric GUT*)；我们发现理论预言的新物理粒子质量位于 $O(\text{TeV})$ 范围，恰好可以在 LHC (14 TeV) 和高能环形对撞机 pp (50 ~ 100 TeV) 上给予系统探测。这为 LHC 和未来高能环形对撞机发现新物理提供了另一个强有力的物理佐证。

关于探测新物理的其他物理动机还有不少，除了上面提到的标准模型希格斯势能的不稳定性和如何产生宇宙暴涨与暴涨子的来源，还包括正反物质非对称性和暗物质问题等。这里，我对希格斯圈图修正的精

细调节问题给予必要的澄清。这是一个十分流行的论点，这个问题本身是一个相当哲学化的问题，而且需要引入很强的人为假定，在行内一直存在很多争议。其中一个首要假定就是：假设标准模型之外一定要存在新物理，而且此新物理以紫外动量截断的方式进入希格斯质量圈图修正。众人皆知，标准模型是一个可重整化理论，其所有圈图发散（包括二次发散）通过重整化被严格消除，二次发散在一个可重整化的理论中不具备任何可观测效应；因此自然性（Naturalness）论点必须人为假定存在标准模型以外的新物理，而且此新物理以紫外动量截断的方式进入希格斯质量的微扰圈图修正；否则，标准模型自身根本不存在自然性问题，这是高能界行内众所周知的事实。由于量子引力在普朗克能标不能被忽略，而且广义相对论（Einstein-Hilbert 作用量）不可重整，人们通常猜测量子引力效应将作为新物理在普朗克能标给标准模型提供紫外截断；但是目前尚无成功的量子引力理论，而且已经知道普通的微扰量子引力场论不可能成为普朗克能标的终极量子引力理论。因此，自然性论点只能人为假定量子引力效应仍然以普通场论中二次发散的简单方式进入微扰圈图计算，同时假定普通场论的微扰圈图展开在紫外截断附近还依然有效。但是，由于根本不存在完备的量子引力理论对此给出可靠预言，人们对普朗克尺度附近的紫外行为知之甚少，并无准确把握。因此，上述任何一个人为假设都可能不成立，一旦如此就会导致自然性论点失效。事实上，自 2010 年以来 LHC（7 ~ 8 TeV）的实验数据对这个自然性论点并未提供任何支持，反而加强了高能界对此论点可靠性的严重质疑；由于 LHC 运行迄今没

有找到自然性论点期望的任何新粒子，国际上对直线对撞机 ILC（500 GeV）项目的物理潜力逐渐失去兴趣和信心。最近 CERN 的著名理论家阿尔塔莱利（G. Altarelli）教授就在其综述报告中对希格斯自然性问题进行了系统分析和质疑（参见：arXiv:1407.2122, *The Higgs and the Excessive Success of the Standard Model*），值得读者们认真学习和参考。因此，对于高能物理研究人员重要的是保持开放的头脑和心态，不带偏见和迷信，不盲目随波逐流，能够独立和深入思考物理本质，客观地对探索新物理进行系统分析与规划。

未来高能环形对撞机（包括希格斯工厂和高能强子对撞机）的计划是目前国际高能界普遍关注的重大前沿课题，已被列入 ICFA（国际未来加速器委员会）的正式支持项目。目前 CERN 和中国均在积极组织环形对撞机的预研，引起国际上广泛关注和积极支持，也包括美国高能界；继 2014 年 2 月 CERN 在日内瓦举办 FCC Kickoff Meeting 之后，美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）和费米国家实验室（Fermilab）已先后举办国际研讨会认真讨论环形对撞机项目；虽然美国政府自从终止 SSC 以来对基础研究的财政预算持续削减，从而无法支持建造这样的高能对撞机，不过美国高能界仍拥有很强大的高能物理队伍，他们的积极参与对于 CERN 和中国，以及国际高能物理发展都大有裨益。所以 P5 报告中强调高能物理研究与发展规划的全球性是完全正确的。这个环形对撞机项目对于中国高能界和 CERN 的未来发展均是一个重大机遇和挑战，值得国内外高能物理同仁们积极研讨、精诚团结和相互支持。



美国粒子物理 P5 报告的一些评论

杨海军

（上海交通大学 200240）

美国粒子物理 P5 报告综合了全球同行广泛的意见和二十多位世界著名专家的评审意见，在全球化的大背景以及有限的资源配置下构筑美国粒子物理中长期的战略计划，使得美国在粒子物理的最前沿能继续保持领先的地位和促进新的重大发现。报告中建议优先获得资助的前沿研究课题对中国粒子物理学界未来的发展规划极具参考价值。例如希格斯物理，研究与中微子质量相关的物理，寻找暗物质，了解宇宙的加速机制：暗能量和暴涨，以及探索其他未知的物理现

象和原理等一系列 21 世纪极具挑战性的前沿研究课题。

迄今为止，粒子物理标准模型取得了巨大的成功，准确地描述了几乎所有粒子物理实验观测结果。2012 年希格斯粒子的发现为标准模型的完备奠定了最后的基石。然而标准模型无法解释宇宙中存在大量暗物质和暗能量的事实，这预示着有超出粒子物理标准模型的新物理或未知物理现象存在，这将是未来几十年物理学和宇宙学需要破解的最重大的科学难题。