



粒子物理及高能加速器的未来——新原理加速器能行吗？

王贻芳^{1*}, 鲁巍²

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

2. 清华大学工程物理系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: yfwang@ihep.ac.cn

近年来, 伴随着对大型环形正负电子对撞机的讨论, 社会大众似乎对高能物理及相关加速器的未来有了很大的兴趣, 发表了各种观点. 比如说, 可以不用加速器, 用宇宙线研究就可以了; 再比如说, 可以用直线对撞机、缪子对撞机, 或者用新加速原理建造未来的高能加速器, 等等.

这是一个非常专业的问题, 没有受过专业训练的普通大众很难体会和理解其中的关键点及各种选择的理由和原因. 即使是物理学家, 如果没有在实验高能物理专业或加速器专业的前沿浸淫多年, 没有直接参与近5~10年的前沿研究和领域内关于未来的讨论, 要体会、理解未来发展的方向和路径选择也是很难的, 更不要说自己做预言和判断了.

本文试图用比较通俗的语言, 介绍粒子物理未来发展的目标及必须采用的手段, 以帮助大家理解粒子物理、高能加速器及其未来的发展方向.

1 粒子物理可以不用加速器吗？

自20世纪50年代开始一些新的基本粒子被发现之后, 粒子物理这个新的学科就开始独立于核物理而存在. 其后各种重大发现层出不穷, 比原子核更深一个层次的基本粒子的物理规律被发现和理解, 一个新的物理体系理论——粒子物理标准模型得以建立. 其中, 如果以诺贝尔奖为标准的话, 依赖于加速器的重大发现占90%以上. 由于加速器可以将粒子加速到很高能量, 基于加速器的粒子物理研究有时也称作高能物理. 事实上, 由于高能物理在粒子物理研究中的主导作用, 高能物理和粒子物理这两个词经常通用. 由于人们研究的基本粒子越来越小, 质量越来越重, 寿命越来越短, 需要的能量越来越高, 加速器的造价也就越来越高, 大家自然会问一个问题: 有没有可能不用加速器?

早年人们从宇宙线中发现了正电子、缪(μ)子和派(π)介子等, 现在还可以依赖宇宙线研究粒子物理吗? 回答是不行. 人们能够津津乐道的也就这几个粒子, 20世纪50年代以后就再也没有新发现了. 一个原因是能量提高后, 宇宙线中的新粒子自然变少了, 要想发现新粒子, 就需要提高接收度, 探测器就需要有巨大的接收面积(平方公里以上); 而要想鉴别这类新粒子, 就需要极为复杂的探测器(类似于大型强子对撞机上的探测器, ~20



王贻芳 中国科学院高能物理研究所所长, 中国科学院院士, 实验粒子物理学家, 主要研究方向为中微子振荡和正负电子对撞机. 领导完成了北京正负电子对撞机上的北京谱仪III(BESIII)的研制; 领导完成了大亚湾中微子实验并发现了一种新的中微子振荡模式; 提出并领导了江门中微子实验(JUNO)和环形正负电子对撞机(CEPC)的设计和研制.

亿人民币/0.01 km²). 面积巨大且复杂的探测器, 造价绝不会比高能加速器低. 而且, 由于是守株待兔, 不易重复, 很难确认这是一个真粒子还是仪器的统计涨落.

现在很多人依赖地下和空中实验寻找暗物质、暗能量及研究中微子, 这能代表或覆盖粒子物理的未来吗? 回答是不能. 虽然中微子研究可以依赖地下实验, 但中微子振荡的下一个未知参数——CP相角的测量仍然需要加速器. 暗物质的寻找在相当程度上也需要加速器. 况且, 暗物质、暗能量的存在形式完全未知, 目前的寻找方式基于许多假设, 成功的可能性很低, 显然这类研究和寻找只能是粒子物理领域中的一个分支, 不能成为唯一方向. 事实上, 世界各国也都是这么安排它们的粒子物理投入的.

粒子物理研究的主要方向还是要从标准模型出发, 研究其破绽、困难、不自洽处和尚未回答的问题. 关于粒子物理发展规划的一个完整描述和讨论请参考文献[1]. 其中介绍了粒子物理最主要的优先研究目标是希格斯粒子, 这也是国际共识[2]. 这是因为, 新物理最有可能出现的窗口是希格斯粒子的性质偏离标准模型预言, 暗物质粒子最有可能耦合的对象也是希格斯粒子, 宇宙演化早期的重大问题(如弱电相变)也与希格斯粒子的性质相关. 因此, 未来发展的首要目标被定为将希格斯粒子性质测量的精度提高1个量级, 对应于寻找新物理的能标提高近1个量级, 而这个新能标也对应于许多物理学家认为新物理应该出现的地方. 这个物理目标依赖于未来的“希格斯工厂”, 即束流能量为125 GeV的正负电子对

撞机,可以是直线,也可以是环形.粒子物理的未来依赖于加速器,也依赖于我们选择什么样的加速器.

2 加速器的种类有多少? 其核心能力限制在哪里?

加速器使带电粒子通过一个电场,并获得动能,粒子就被加速到一个较高能量.早年的加速器采用静电场加速方式,即电极两端加上电压等带电粒子通过.但由于大部分时间静电场中没有待加速的带电粒子(如电子或质子),能量利用效率很低;并且,由于受到高压绝缘技术的限制,粒子能量很难提高,静电场逐渐被现代的微波电场取代,即只有带电粒子来时才有电场,其能量利用效率(从墙电到微波再到粒子)可以达到30%~50%.这种微波加速器件叫作微波高频腔,是加速器的核心部件.最近20年,这类微波高频腔又利用了超导技术,称作超导高频腔,能量利用效率和束流品质更高,逐渐成为主流.

评价加速器的核心指标有两个:一是最高加速能量,这个好理解,与使用的超导高频腔数量和质量有关;二是亮度,正比于目标事例率,它与加速器中带电粒子的束流流强成正比,束斑大小成反比.对精确测量而言,亮度是降低统计误差、发现稀有事例的核心关键.

按粒子种类分,加速器有电子和正电子加速器、质子和反质子加速器、重离子加速器,近年来人们也在讨论缪子加速器.

按使用方式分,加速器有固定靶加速器和对撞机.顾名思义,固定靶加速器就是将粒子加速到设计能量后,轰击一个静止的靶,例如金属或石墨.固定靶加速器对束团的大小和位置的控制要求相对较低,但缺点是一部分能量被束流粒子和靶核的动能带走,不能完全转换为碰撞势能,能量利用率低.对撞机是让两团带电粒子对头碰撞.显然,要使飞行中的高速粒子团撞上另一个高速粒子团,需要对粒子团的大小和空间位置做精确控制,技术上难度极大.但好处是粒子的动能可以全部转化为势能,能量利用率为100%.因此,目前的高能加速器几乎清一色是对撞机.

按形状分,加速器有直线和环形两种.直线加速器就是沿直线将高频腔一字排开,将一团粒子的能量从零加速到设计值,然后对撞,扔掉没有撞上的粒子(绝大部分),再从零开始加速下一团粒子.可以想象,这种方式能量利用率较低.其另一个缺点就是束流强度(束团中的粒子数)不会太高,且需要极小的束流尺寸以获得亮度,技术困难;几千个这样的超导高频腔布置在一二十千米的隧道中以获得100~200 GeV的束流能量也极为昂贵.环形加速器将高频腔布置在环上少数几个地方,一团粒子在环中多次小步加速(遇到高频腔时),达到设计能量后对撞,没有撞上的粒子沿着轨道继续前行,绕回来之后可以继续下一次对撞.环形加速器可以积累较高的束流流强(目前可达1 A,比直线加速器高1~2个量级),对束斑大小的要求没有对直线加速器那么高,而且加速也只需要少量高频腔,造价低,没撞上的粒子还可以重复使用,能量利用效

率高,显然是个理想选择.但带电粒子在环形加速器中有同步辐射能量损失,其损失的功率与环半径的平方成反比,与粒子能量的4次方成正比,与粒子质量的4次方成反比.因此,对电子加速器,高能对撞环需要较大的周长,只适用能量没那么高的对撞机(<300 GeV).质子加速器则不存在这个限制.

加速器的另一个核心部件是二极偏转磁铁,它的作用是让带电粒子沿着设计的环形轨道弯转.这在环形加速器上是必备部件,直线加速器则基本不需要.按照洛伦兹定律,粒子的弯转半径与磁场强度和粒子的速度有关.换句话说,粒子的速度越高(能量越高),所需要的弯转半径就越大,磁场强度也需要越强.因此,要提高环形加速器粒子的能量,一方面需要足够数量的高频腔来加速(小问题),另一方面需要较高磁场强度的二极偏转磁铁来让粒子“拐弯”(大问题).

总结起来,对环形电子加速器,为克服同步辐射,需要一个较大的环以实现较高能量(~300 GeV),技术上“拐弯”和加速都不是问题;对环形质子加速器,为解决“拐弯”问题,即使采用目前及未来技术可能实现的最高磁场(~20 T),也需要一个较大的环以实现较高能量(~100 TeV).两者结合,未来环形加速器的周长应该越长越好,但考虑经济和技术、科学的平衡,100 km左右是一个较好的选择.采用环形加速器的另一个好处是,隧道可以同时(或先后)用于电子和质子加速器,大大节省造价.

对高能电子直线加速器,目前能量受限于加速能力(以加速梯度来表征,即每米能加速的粒子能量)的提高,其亮度也受限于束斑大小;而高能质子直线加速器与环形相比,没有任何优势和竞争力.

3 基于新加速原理的等离子体加速器可以拯救我们吗?

既然高能加速器这么昂贵,大家自然会想到,新加速原理是不是能拯救我们.不过从前面的介绍可以看到,不是所有的加速器都受限于加速能力,而是只有直线加速器才对加速梯度敏感.我们要研究和比较的是:(1)新加速原理离实用还有多远;(2)利用新加速原理的直线加速器与环形加速器比较是否有优势?

自1979年被提出以来,特别是最近20年,基于新加速原理的等离子体尾波电子加速研究取得了突破性的进展,具体表现在:(1)加速梯度已经达到1~100 GV/m,比目前超导高频腔能做到的~40 MV/m高了2~3个量级,这就意味着可以将直线加速器的长度缩小2~3个量级,从理论上说,造价也可以大大降低;(2)束流品质有了极大提高,与要求较高的实用需求相比,有些只有不到1个量级的差距.事实上,等离子体加速按其驱动源可以划分为激光驱动和高能粒子束驱动两类,因其在束流品质、能量转换效率等方面存在较大差别,因此下面分开讨论.

对激光驱动而言,以下几个问题还有待解决:(1)飞秒超强激光驱动源的平均功率目前在千瓦以下(~300 W),不到对

撞机需求的万分之一,且过去20年飞秒激光器的平均功率只提升了约30倍。通过发展新的激光体系结构并充分利用高效率半导体泵浦激光技术,未来10年人们有可能发展出平均功率10~100 kW的飞秒激光器系统,但距离对撞机的要求仍然有2~3个量级的差距。(2)从激光驱动器到高能电子束流的能量转换效率较低,目前在百分之几量级,未来有望优化到20%左右。考虑到从墙电到激光驱动器的能量转换效率也较低(目前只有不到1%,未来通过全半导体激光泵浦有望达到10%~20%),整体的从墙电到电子束流的转换效率就更低,远低于目前传统高能加速器从墙电到电子束流可达到的能量转换效率(30%~50%)。(3)目前激光加速产生的电子束归一化发射度在微米弧度量级,需要再降低1个量级。(4)目前较高束流品质的激光加速实验结果是在较低电荷量情况下实现的,在实用条件下(增加1~2个量级的电荷量),能散、稳定性方面(差1个量级)还有较长的路要走。

对带电粒子束流驱动的尾波加速器而言,上述激光驱动情况下的低转换效率问题基本不存在,因为一方面利用传统加速器产生的驱动束流本身效率可以很高,另一方面从驱动束流到被加速束流的效率也较激光驱动的情况高3~5倍。此外,在束流品质(电荷量、能散等)及稳定性等方面,束流驱动方案也与高能应用的需求比较接近,是距离实际应用最近的新加速原理方案。但同时需要指出的是,束流驱动因为需要传统加速器作为驱动器,只适用于高能加速。对于较低能量的应用,还需要依赖激光驱动或者传统加速器。

无论是束流驱动还是激光驱动,都需要解决级联的问题,即如何实现多级加速时束流的稳定性和超高效率(>99%)的级联问题。对高能正负电子对撞机而言,还需要解决正电子加速机制的问题,并开展大量的实验验证。同时,基于新原理的质子加速研究才刚刚起步,跟上述电子加速相比还有很长的路要走。

以上这些问题大都需要量级的提升,估计全部解决至少还要二三十年,届时,我们也许可以设计一个等离子体加速器代替现在的电子直线对撞机,但其亮度却永远无法与环形电子对撞机相比,低1个量级以上。因此,环形的电子/质子对撞机是无法取代的,特别是对需要亮度的工厂类加速器而言。如果未来物理需求强烈,亮度要求可以降低,则等离子体加速器可以用于超高能(如1~10 TeV)电子对撞机,以发挥其优势。当然在此过程中,等离子体加速器还是有用武之地的,如

应用型的电子加速器(辐照、成像、自由电子激光等)。事实上,我们在中国的大型环形正负电子对撞机(Circular Electron-Positron Collider, CEPC)的注入器中加了一个选项设计,在等离子体加速器前后均植入传统加速器,通过这种国际首创的结合,实现优势互补,克服缺陷,实现降低造价的目标。如果成功,它将成为国际上第一个将等离子体加速器用于高能加速器的范例。

4 应该如何选择未来的发展方向和路径?

通过上面的讨论,未来20年粒子物理和高能加速器的发展路径已经很清楚了。环形质子对撞机目前技术不够成熟,造价太高,物理目标也不够明确,需要等待高温超导技术的成熟。高能的正电子直线对撞机目前没有技术优势。能量在希格斯粒子质量附近的正负电子对撞机可以大量产生希格斯粒子,物理目标明确,意义重大。但直线的正负电子对撞机亮度不如环形,造价高。环形正负电子对撞机在300 GeV以内有更好的性价比,即使等离子体加速器的技术成熟,也无法替代。而且,它还有提供高能同步辐射的能力,成为世界仅有的1~100 MeV高通量、单能同步辐射光源,为核物理、多学科研究、工业制造、辐射研究等提供前所未有的手段^[3,4]。

除此之外,我们还应该关心并开展新技术的研发,特别是铁基高温超导磁铁的研究,以解决质子加速器的“拐弯”问题;开展等离子体加速电子和正电子的物理和技术研究,争取用在CEPC的注入器上,同时为未来的1 TeV甚至10 TeV的正负电子直线对撞机做好准备;研究等离子体质子加速方案,以探索低能质子直线注入器采用等离子体技术的可行性;跟踪国际缪子加速器的研究进展,不缺席任何可能的重大突破。最近,美国SLAC国家加速器实验室的科学家们提出了一种液氮温区的微波高频腔方案^[5],加速梯度比超导高频腔高1倍以上,且造价大大低于超导高频腔。这个技术虽然不可能替代环形对撞机,但可能替代现有的基于超导高频腔的国际直线对撞机(International Linear Collider, ILC),在未来的直线注入器和自由电子激光方面也可能有广泛用途。

粒子物理研究的科学目标宏伟重大,技术卓越超群,是任何一个现代化国家都不能缺席的重要研究领域。我们应当认真思考,细致规划,认真实施,争取在20年内实现高能物理在国际上的全面领先。

推荐阅读文献

- 1 Wang Y F. Exploring physics laws of the deepest level of matter structure: Thoughts about strategies of particle physics in China (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2021, 39: 52–58 [王贻芳. 探究物质最深层次的物理规律: 中国粒子物理发展规划的思考. *科技导报*, 2021, 39: 52–58]
- 2 The Europe Strategy Group. Deliberation Document on the 2020 Update of the European Strategy for Particle Physics. Geneva: CERN Council, 2020
- 3 The CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 1-Accelerator. 2018, arXiv: [1809.00285](https://arxiv.org/abs/1809.00285)
- 4 The CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2-Physics & Detector. 2018, arXiv: [1811.10545](https://arxiv.org/abs/1811.10545)
- 5 Bai M, Barklow T, Bartoldus R, et al. C3: A “Cool” route to the Higgs boson and beyond. 2021, arXiv: [2110.15800](https://arxiv.org/abs/2110.15800)

Summary for “粒子物理及高能加速器的未来——新原理加速器能行吗？”

The future of particle physics and high energy accelerators —New acceleration mechanism possible?

Yifang Wang^{1*} & Wei Lu²

¹ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: yfwang@ihep.ac.cn

Recently, the future of particle physics and high energy accelerators aroused extensive attention from society. The view that current accelerators will soon be replaced by those based on the new acceleration mechanism, is widely spread. This view implies that next-generation high energy accelerators shall not be built until the new mechanism is ready. This paper introduces the near and mid-term science goals of particle physics, and the needed accelerators with the energy and luminosity requirements. By analyzing current status and possible future achievements of the new acceleration mechanism, or more precisely, plasma wakefield acceleration mechanism driven by laser or particle beams, we conclude that traditional accelerators will still be the main choice in the next 20–30 years.

First of all, we argue that studies such as neutrino physics, cosmic-rays physics, dark matter searches and dark energy studies may not rely on accelerators, but they do not represent the main-stream of particle physics. After the discovery of the Higgs boson, the particle physics community reached a consensus that our next priority is the study of Higgs couplings with all the other elementary particles. This study will not only test precisely the Standard Model, but also be the best probe to new physics beyond the Standard Model. For this purpose, a very high luminosity Higgs factory, based on the electron-positron collision, is needed.

After a short introduction of different types of traditional accelerators and their related technologies, we conclude that linear electron (positron) accelerators are limited by their acceleration capabilities while their luminosity is much smaller than circular electron (positron) accelerators. Circular electron (positron) accelerators are limited by the synchrotron radiation hence their energy cannot reach 300 GeV or above for a reasonable power consumption. Below this energy limit, circular colliders have advantages on luminosity, power consumption, cost, etc., over linear ones. Circular proton accelerators have very little synchrotron radiation, hence the acceleration goal is easy to achieve but the bending power of the magnet becomes the limit of energy. For linear proton accelerators, they have no advantages at all on energy, luminosity, power consumption, cost, etc., except at very low energies.

From the above analysis, it is evident that the plasma-acceleration mechanism can only play a role on linear accelerators to improve acceleration capabilities if luminosity is not highly demanding. Obviously, even if plasma-accelerators are applicable, they are still not suitable for Higgs factories where the luminosity is a key while the energy is in the comfort zone of circular accelerators.

Laser-driven accelerators are still far away to be applicable since their average power, power efficiency, beam quality and beam intensity are several orders of magnitude off, while beam-driven accelerators are off by a few factors to one order of magnitude. In addition, issues such as positron and proton acceleration mechanism, high efficiency multi-stage cascade acceleration need to be resolved and experimentally demonstrated. It is a common understanding that there are still 20–30 years for the new acceleration mechanism to be a viable choice of high energy accelerators. However, plasma-based accelerators may find applications in irradiation, radiation imaging, free-electron laser, etc. in coming years. It may also be combined with traditional accelerators to form an injector.

The future of high energy accelerators becomes then very clear: We shall build a circular electron-positron collider as a Higgs factory while actively working on R&D for possible future very high energy (1–10 TeV) e^+e^- linear colliders, as well as on high T_c superconducting technologies, in particular iron-based superconducting materials for future circular proton colliders.

particle physics, accelerators, new acceleration mechanism, plasma wake-field acceleration, laser, collider

doi: [10.1360/TB-2022-0077](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0077)