

国际直线对撞机研究现状及未来发展^{*}

高杰[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 文章介绍了国际直线对撞机(ILC)的科学目标及直线对撞机(LC)与强子对撞机(LHC)的关系,结合对正负电子直线对撞机历史的回顾及国际直线对撞机方案的选择,对国际直线对撞机的发展现状及未来发展趋势进行了介绍,对中国科学家在国际直线对撞机中所做的国际合作研究进行了简要的回顾,并强调了抓住国际直线对撞机国际合作机遇对中国科学发展的重要性.

关键词 粒子物理,国际直线对撞机(ILC),希格斯

Status and future developments of the International Linear Collider

GAO Jie[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The scientific goals of the International Linear Collider (ILC) and its relationship with the Large Hadron Collider are introduced. The history of linear colliders and ILC, as well as the prospects of ILC, are reviewed. A summary of China's participation in international collaboration in the ILC program is given, with stress on the important opportunities it provides for China's scientific development.

Keywords particle physics, International Linear Collider(ILC), Higgs

1 引言

不断深化对微观世界的认识是当代科学研究最重要的目标之一.通过试图回答“什么是物质的基本组成单元?它们是如何相互结合而构成整个世界的?除了我们通常感受到的三维空间之外,是否还有更多的维度?自然界的各种力是否都是某个统一体的不同方面?物质是从哪里来的?使星系聚拢的暗物质的本质是什么?”等基本问题,使粒子物理学的研究不断深入,从而使人类对自然界的认识不断得到深化,这些知识的获得极大地推动了人类文明的进步.

标准模型理论的建立是20世纪粒子物理研究的一个重大成就,理论预言的结果经受住了精度达到千分之一的实验检验.然而很多迹象表明,标准模型还远远不是一个终极的理论.有关标准模型的主要问题

主要集中在两个方面:第一,从理论本身看,电弱对称性的自发破缺的机制还有待澄清,这关系到人类对一切物质质量的起源的了解.更进一步还有相互作用力的统一,极小尺度的时空结构等非常基本和深刻的问题,而标准模型尚不能对此提供太多的知识;第二,来自天文观测的数据表明,宇宙中只有4%是由已知的物质所构成,其他部分(23%的暗物质,73%的暗能量)则完全无法用现有的知识所理解,这构成了对当代粒子物理理论的一个重大挑战.另外,对宇宙演化过程中出现的正反物质不对称性等现象的物理机制的理解也依然困扰着当代的粒子物理研究.这些问题显然都不可能标准模型的框架内得到解决,存在超出标准模型的新物理现象应该说已经是不争的事实.面对这些物理前沿问题,有必要在理论的指导下进行

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10525525;10775154)资助项目
2010-08-27 收到

[†] Email:gaoj@ihep.ac.cn

相应的实验研究. 理论指导下的实验研究是物理学向前发展的唯一出路.

2 高能强子对撞机与正负电子直线对撞机的关系^[1]

高能加速器是粒子物理最重要的研究手段. 为了全面研究电弱对称性自发破缺机制和一切质量起源等基本问题, 探索超出标准模型的新物理现象, 理解宇宙观测中暗物质和暗能量的性质, 人类需要建造一个能够达到 TeV(10^{12} 电子伏特)能区的强子对撞机和一个正负电子直线对撞机. 目前在欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)已于2010年3月30日成功地进行了对撞实验, 这标志着LHC正式进入了物理实验阶段. 强子对撞机LHC有能力发现新现象, 但要揭示清楚新物理规律则必须进行足够精确的测量, 这是LHC难以做到的(质子与反质子中各由3个夸克组成, 对撞的初始条件复杂). 然而, TeV能量级的正负电子直线对撞机能够进行非常精确的测量(电子是没有内在结构的基本粒子, 对撞初始条件简单、清晰), 因此, 在今后的粒子物理实验研究中, 这两台高能对撞机的相互补充将起到关键的作用. 这是国际高能物理学界经过二十多年的研究后得到的共识. LHC的成功对撞, 为正负电子直线对撞机最终对撞能量参数的确定创造了条件.

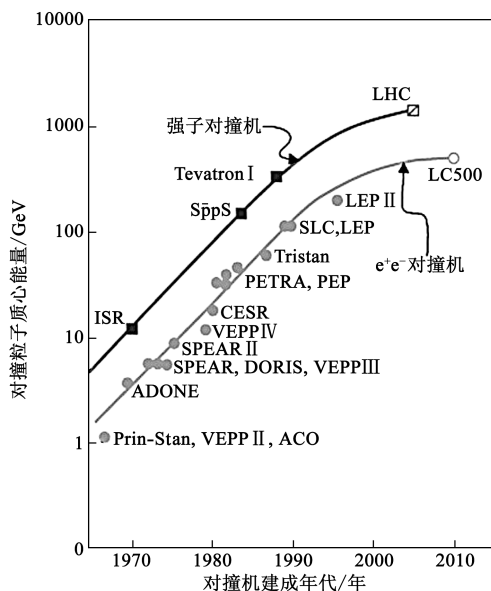


图1 高能粒子加速器能量前沿图

从图1中可以看到, LHC是强子对撞机的能量

前沿, 而LC是直线对撞机(图1中的LC500), 它将是正负电子对撞机的能量前沿, 可以预期这两个大科学装置上的研究工作将成为粒子物理研究的主流. 未来正负电子对撞机之所以采用直线对撞机而不是环型对撞机, 主要是为了避免环型加速器中粒子偏转过程中沿切线方向产生的, 正比于粒子能量四次方的高功率能量损失.

3 国际直线对撞机(ILC)发展历史与现状^[2]

1989年, 在美国斯坦福大学直线加速器中心(SLAC)建成的斯坦福大学直线对撞机(Stanford Linear Collider, 缩写为SLC, 其质心能量约100GeV), 在概念和许多关键技术验证了正负电子直线对撞机的可行性. 其后国际上开始了更大规模开展关于未来正负电子直线对撞机的研究. 在上世纪80年代, 美国SLAC提出了11.4GHz的常温加速结构的下一代直线对撞机(Next Generation Linear Collider, NLC); 日本的KEK(高能加速器研究结构)提出了与美国相似的计划, 即建造日本直线对撞机(Japan Linear Collider, JLC), 后改为全球直线对撞机(Global Linear Collider, GLC)和常温的C波段直线对撞机(C-band (5—6GHz) Linear Collider); 德国的DESY提出了常温3GHz的S波段直线对撞机(S-Band Linear Collider, SBLC)和基于超导技术的1.3GHz的直线对撞机(TESLA); 俄罗斯提出了14GHz的常温直线对撞机(VLEPP); 欧洲核子中心(CERN)则提出常温双束直线对撞机(CLIC), 加速结构频率为30GHz. 除了DESY的SBLC和俄罗斯的VLEPP两个计划于90年代中期停止以外, 另外5个计划分别持续了十几年的研究. 直到2004年8月20日, 国际未来加速器委员会(ICFA)在北京举行的第32届国际高能物理大会上宣布了下一代大型直线对撞机的技术方案确定为低温超导加速技术, 并命名为国际直线对撞机(International Linear Collider, ILC). 目前, 国际上只存在ILC和CLIC两个计划. CLIC与2007年提出了CLIC-12, 即加速器频率从30GHz改为12GHz, 目的是降低CLIC的技术难度和尽可能利用上面提到的NLC及JLC的长期技术研发成果和人员储备, 但CLIC-12的最高加速梯度则降为100MV/m(30GHz CLIC加速梯度设计值为150MV/m). 由于CLIC-12目前无论在技术成熟度方面还是加速技术的通用性方面

与 ILC 相比都不具明显优势(除了其设计最高能量比 ILC 高出3 倍外,这也是其存在的最主要的原因),因此 ILC 吸引了国际上几乎所有相关加速器研究中心的关注和合作。

亚洲、欧洲及北美洲的主要高能物理实验室于 2005 年 5 月 10 日签署了关于国际直线对撞机全球设计工作组的谅解备忘录(Memorandum of Understanding for the ILC Global Design Effort),成立了由亚洲、欧洲、北美洲科学家组成,由 Prof. B. Barish 领导的全球性的 ILC 研制团队。自 2005 年起相关预制研究工作以国际合作的方式大规模展开。目前国际上各大高能物理实验室和相关大学都在积极参与相关的研究工作,并且进展迅速,在一些关键技术上也有所突破。设计中的国际直线对撞机是一台超高能量的正负电子对撞机,它由两台大型低温超导直线加速器组成。首期目标是分别将正负电子加速到 0.25TeV 的能量,质心系能量达到 0.5TeV(并可升级到 1TeV),将建造在总长约 30km 的地下隧道里。按照计划,2005 年完成了 ILC 的概念设计(baseline configuration design,BCD);2006 年完成了 ILC 的参考设计(reference design report,RDR)以便确定参考造价;2007 年 2 月,在北京的 ICFA 会议上对外正式宣布了 ILC 的参考造价;2007 至 2012 年为 ILC 技术设计阶段(Technical Design Phase,TDP)(在 TDP 设计期间会考虑到 LHC 运行的物理结果的反馈);ILC 指导委员会(ILCSC)将于 2011 年初成立 ILC 建设地点要求委员会,2013 年后进入承建国选择和立项申请阶段。2015—2022 年为 ILC 的建造阶段。自 2004 年 8 月

到目前为止,ILC 国际合作的进度按计划向前推进。

在政府层面上,国际上成立了大型对撞机基金委员会(Funding Agencies for Large Colliders,FALC),并定期举行会议。国际直线对撞机的组织管理构架(加速器部分)如图 2 所示,其中 ILCSC 为国际直线对撞机指导委员会(含世界 7 大高能物理研究所所长及三大洲国际直线对撞机指导委员会主席等);项目顾问委员会(PAC),从属于国际直线对撞机指导委员会(ILCSC);加速器顾问团(AAP),从属于全球设计团队(GDE)。

根据目前的参考造价,国际直线对撞机的总投资在 100 亿美元左右(其中加速器为 67 亿美元),总体造价约为 100 亿美元(不含 1.3 万人年约 7 年的人工费)。到目前为止,对 ILC 未来选址公开做过地址调查和勘探的国家和地区有:美国,日本,德国,CERN,俄罗斯。

ILC 由加速器和探测器构成。加速器的主要组成部分为:电子源、正电子源、预加速 1.3GHz 超导直线加速器(5GeV)、正负电子阻尼环(5GeV)、束长压缩器、1.3GHz 超导主直线加速器(正负电子能量分别为 250GeV)、对撞点聚焦传输线等。ILC 的总体布局图见图 3。

为了在直线对撞机上进行粒子物理实验,进而达到 ILC 的科学目标,ILC 需要粒子探测器。由于在直线对撞机上的测量精度更高,要求对反应产物、特别是强子的簇射(jets)进行精确测量,探测器必须能够对强子簇射中的各个粒子(包括带电和中性粒子)的能量和动量进行测量,因此在所采用的探测器技术上有其独特的考虑和设计,将涉及到高场强的

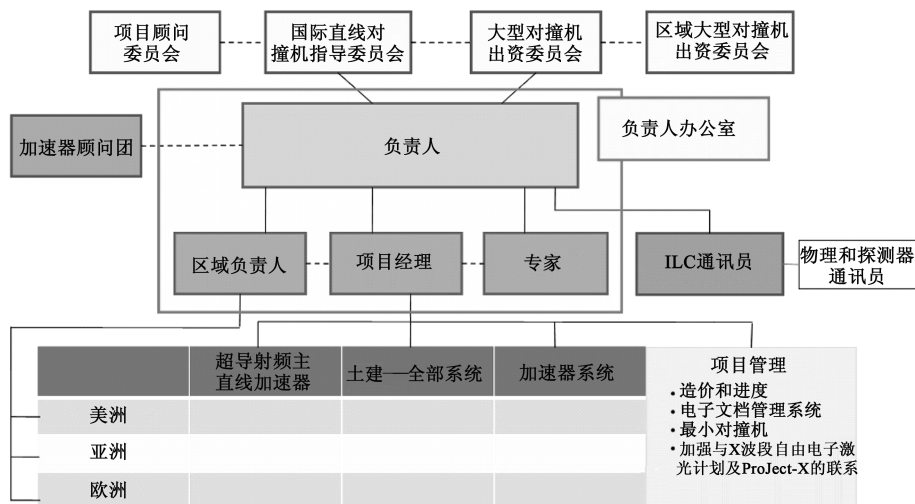


图 2 国际直线对撞机的组织管理构架

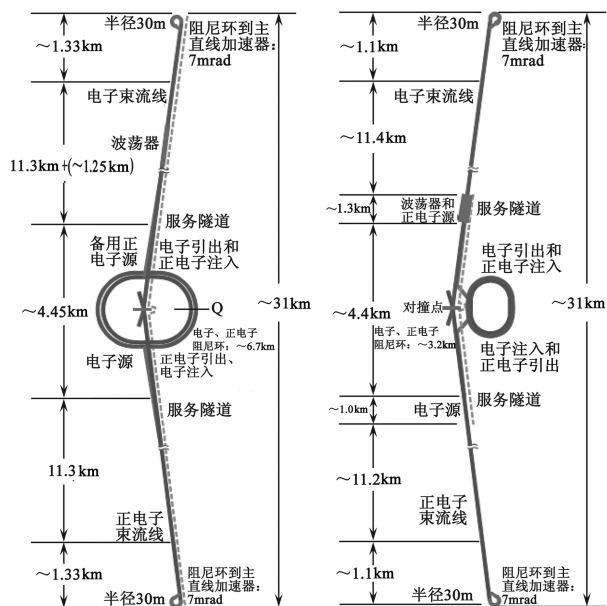


图3 两种 ILC 加速器布局方案。左图中的双环为在 ILC 的参考设计阶段的 6.4km 中的正负电子阻尼环；右图中的双环为在 SB2009 Re-Baseline 设计阶段的 3.2km 中的正负电子阻尼环

超导磁铁技术,高精度的半导体探测器和径迹探测器技术,高精度的量能器等新型的粒子探测技术。

目前国际上已经提出了两种探测器的整体设计方案。在大量的模拟研究基础上,对探测器中各子系统(如径迹探测器、电磁量能器、强子量能器)采用的技术方案和选用的参数等进行了仔细的探讨,并有针对性地在小模型实物上验证模拟研究的结论。2007 年,国际高能物理界推举 S. Yamada 教授领导有关 ILC 探测器研究的国际合作团队,以国际上各高能物理实验室的广泛预研结果为基础,按计划于 2008 年底优化出了两个探测器的整体概念设计,组成国际合作组。目前国际上形成了两个探测器的方案,包括磁场值的选定,初步确定顶点探测器、径迹探测器、电磁量能器、强子量能器的性能要求、几何尺寸、采用的技术和后备方案。这两个探测器合作组正优化设计,并各自在 ILC 的一些重要物理目标上对能达到的测量结果进行研究,并提交建议书。将由探测器顾问委员会对它们进行评估。其后在 2012 年左右完成探测器的工程设计,并确定各参加国的任务和研究队伍,做好技术和经费方面的准备。图 4 为其中一个探测器 ILD 的整体设计剖面图。

在 2006 年 12 月 5—6 日召开的第 294 次 ILC 香山会议上,我国科学家对中国参加 ILC 国际合作达成的共识是:(1)ILC 有潜力回答当代物理学的重大问题,极具科学价值;(2)ILC 涉及大量最先进的加速器技术和探测器技术,中国作为经济、政治和科

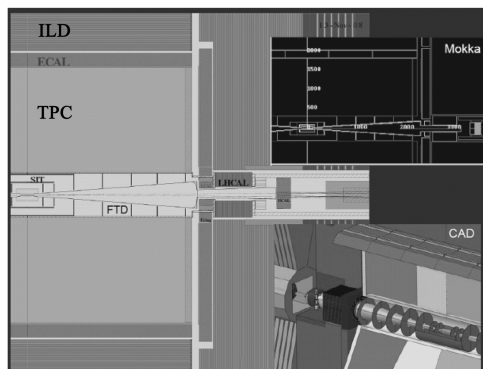


图4 ILD 探测器设计剖面图(含顶点探测器、量能器、径迹探测器、亮度探测器等)

技大国,应该和必须参加,否则中国高能物理界势必偏离国际高能物理主流,失去历史机遇,使我们在未来的几十年中处于落后地位。为此,中国应该未雨绸缪,做出有前瞻性的超前部署,作为有份量的合作伙伴,在 ILC 国际合作中占有一席之地;(3)为了对未来的 ILC 做出有中国特色的贡献,我们除了首先在物理上要提出国际认同的好课题外,还要在加速器技术和探测器技术上围绕物理的需求努力取得更大的进步和成就;(4)ILC 加速器、探测器科技含量高,很多高科技通用技术可应用于我国计划中的重大科研项目,参与 ILC 国际合作必将提升我国有关高科技工业的技术水平和应用水平;(5)ILC 的参与可培养一批高水平科研人才、学术带头人和中青年领军人才,充实具有国际合作能力的创新型科学研究队伍;(6)目前物理研究、探测器和加速器研制方面已经累积了一定的工作,但为了在这一重大国际合作项目中做出重要的实质性贡献,需要一定强度的专项投入,做好关键技术的预制研究工作。

4 我国开展 ILC 粒子物理、加速器及探测器关键技术研究现状

我国科学家在 ILC 粒子物理理论和实验方面已经开展了多方面的研究,例如,通过什么粒子反应过程能探测新物理信号,并为未来的实验提供指导;LHC 和 ILC 的研究相互补充问题;寻找各种新粒子和普遍探测现有粒子的有效相互作用;提出新物理模型等。在 ILC 实验物理方面,开展了利用 Monte Carlo 方法研究 ILC 探测器的性能,探索新物理信号的分析方法,以及粒子的重建方法等内容。

在探测器研究方面,主要集中在以下两个主要的方向上:一是研究将我国现有的、在国际上具有领

先水平的探测器建造技术应用到 ILC 上的可能性；二是大力开展我国目前还比较薄弱、但未来迫切需要并有很好应用前景的相关技术研究。

通过近年来建造国内外的高能物理大科学工程(如北京谱仪 III)和参加 LHC 上的 CMS 和 ATLAS 实验组等国际合作,在探测器研究和建造方面积累了很多具有国际领先水平的关键技术,这些技术在 ILC 上的应用前景是我们参加 ILC 国际合作的一个重要基础。例如,我国在基于 RPC 技术的探测器研制方面掌握了有我们自己知识产权的技术,在北京谱仪的升级改造中起到了关键性的作用。目前正在研究如何做出相应的改进,来适应直线对撞机上的探测器中缪子探测器和强子量能器的技术要求。

清华大学开展了关于时间投影室(TPC)的研究,并于 2007 年正式加入了 LCTPC 国际合作组。在目前 ILC 上探测器的两个方案中,ILD 采用 TPC 作为主径迹探测器。2006 年建成了小模型 TPC(国际上称为 TUTPC)后(见图 5),通过一系列测量实验,性能达到了国外同类小模型的水平。2007 年, TUTPC 在 KEK 的磁场中进行宇宙线测试,为 ILC 上的 TPC 研制提供了重要的数据。

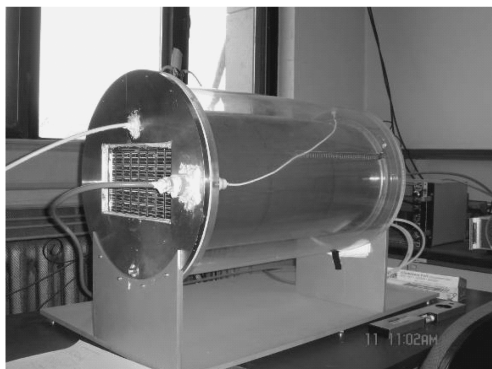


图 5 清华大学研制的小型 TPC

另外中国科学院高能物理研究所(以下简称中科院高能所)、清华大学和中国科学技术大学还联合研究 GEM 探测器和电子学读出等技术,也取得了很好的进展, TUTPC 的读出就采用了 GEM 探测器。

在 ILC 加速器研究方面,我国在 ILC 总体设计、粒子动力学、ILC 阻尼环设计、1.3GHz 9-cell 超导腔制造、低温槽设计制造、高功率耦合器设计、正电子源研究、ILC 功率源研究、ILC-ATF2 束线磁铁制造、ATF2 光学设计及束流实验、束流测量等多方面开展了国际合作研究,取得了国际上认可的研究成果,并成为 ILC 国际合作中的重要参与国家之一。ILC 加速器部分所参与的关键加速器物理设

计及关键技术研究内容见图 6。

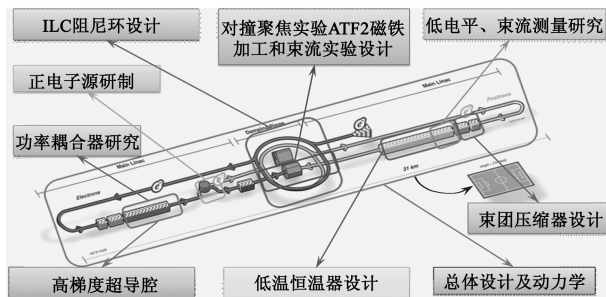


图 6 ILC 加速器关键物理及技术主要研究内容

在 ILC 总体设计方面,提出了中方的对撞机参数选择;推翻了长期以来国际上 TME 结构设计 ILC 阻尼环的方案,采用 FODO 结构给出了 ILC 阻尼环 6km 及 3.2km 两种设计方案。在 ATF2 的束流光学设计方面,通过与法国 LAL 合作,优化了 ATF2 的设计指标,把 37nm 的设计束斑减小到 20nm。在 ILC 实验装置硬件合作方面,自 2006 年以来,中科院高能所为建在日本 KEK 的 ILC-ATF2 实验装置共生产了 34 块四极磁铁和 3 块二极磁铁并已交付使用,现已应用在 KEK 的 ATF2 传输线上,见图 7。这一实质性硬件生产贡献,为中国积极参与 ILC 其他方面的合作争取到了有利的条件。



图 7 安装在 ILC-ATF2 传输线上的中科院高能所研制的四极磁铁

在 1.3GHz 超导加速技术方面,北京大学及中科院高能所都在超导实验室建设 1.3GHz 超导加速腔、低温槽、高功率耦合器、调谐器、低电平控制、低温系统等方面积极开展了国际合作研究,并取得了重要进展。图 8 为北京大学研制的 TESLA 型 9-cell 超导腔,图 9 为中科院高能所研制的低损耗型 9-cell 超导腔,他们均获得了 20MV 以上的加速梯度。

5 ILC 国际合作是我国科学发展的重要机遇

ILC 是继国际热核聚变实验反应堆(ITER)计



图8 北京大学研制的我国第一支 TESLA 型 9-cell 超导腔

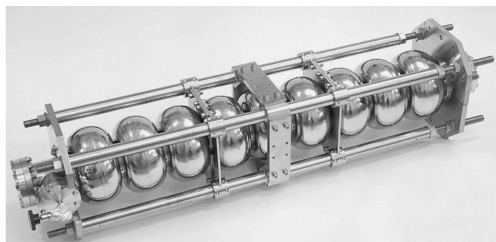


图9 中科院高能所研制的我国第一支低损耗型 9-cell 超导腔

划启动之后人类又在筹划的又一超大规模的国际合作科学工程,涉及大量最先进的加速器技术、探测器技术和先进的高科技通用技术,中国应着眼长远,未雨绸缪,抓住机遇做出有前瞻性的战略部署,为中国

参与或承建 ILC 做必要的人才和技术储备.参与 ILC 国际合作必将提升我国有关高科技工业的技术水平和应用水平,并能培养一大批时代需求的具有国际水平和创新能力的科学研究队伍和一批高水平的领军人才.中国应把握世界科学发展的新特点和新趋势,通过 ILC 国际合作,在综合国力竞争中占据更有利的战略地位,增强国家核心竞争力,带动我国社会生产力的发展,以便在激烈的国际竞争中赢得和保持发展的主动权.

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所李卫国、翟纪元,清华大学高原宁等同事的协助.

参考文献

- [1] 国际直线对撞机——走向量子宇宙(ILC Companion Document). 见:<http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000446>
- [2] 国际直线对撞机参考设计报告(ILC Reference Design Report). 见:<http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>
- [3] 高杰. 中国科技论坛,2007,(4):11

• 物理新闻和动态 •

PAMELA 合作组的测量数据挑战宇宙射线理论

欧洲 PAMELA 合作组的科学家声称,PAMELA 合作组所获得的测量数据对宇宙射线在宇宙中如何加速的理论提出了挑战.根据他们的说法,通过宇宙的质子和氦核的能谱不仅彼此不同,而且不符合宇宙射线理论中用于描述这些粒子的能谱(通量与能量之间的关系)的简单幂律.这种不一致可能意味着物理学家不得不寻找对宇宙射线加速的新的解释.

宇宙射线是在宇宙空间穿过的带电粒子,其能量比地球上的粒子加速器产生的粒子能量高.绝大多数的宇宙射线是质子与氦核,通常认为这些粒子是被超新星爆发的冲击波所加速的.

按照这种机制,冲击波应该以相同的方式加速所有的宇宙射线,最终产生相似的能谱.长期以来,天体物理学家认为,这种关系可用一个简单的幂律来描述,通量在低能处高,随着能量的增加,通量逐渐降低,在约 10^{15} eV 时,能谱曲线形成一个“膝部”,此后通量下降加快.

的确,近几年来有迹象表明,单个的幂律不足以描述在能谱曲线形成宇宙射线粒子能谱曲线形成“膝部”之前的宇宙射线通量.例如,2010 年进行的 CRAEM 气球实验表明,质子及氦核的能谱曲线在 200GeV 以上时,向高处弯曲.另一个气球实验 ATIC 似乎也发现能谱曲线与幂律的偏离,虽然后来的几次实验结果并不一致.

PAMELA 合作组的实验支持了这些发现.由意大利、德国、俄罗斯和瑞典的科学家组成的合作组 PAMELA 的实验是在空间进行的,在那里,来自地球大气层的噪声很小,所测量的宇宙射线的能量在 1GeV—1TeV 之间,在这个能量范围内,其他实验不能精确地进行测量.

PAMELA 合作组的测量结果显示两个重要的特点:一个特点是质子与氦核的能谱形状不同,为了量化,研究人员用一种幂律拟合这两个能谱,发现拟合质子谱的斜率拟合氦谱的斜率大 0.1 左右;另一个特点是对每个谱的幂律拟合都不好.在 30—230GeV 之间,能谱偏离拟合曲线,向下弯曲,而在 230GeV 以上,曲线向上弯曲.有关论文发表在 *Science*. 1199172 上.

天体物理学家需要等待在国际空间站上进行的 α 磁谱仪的实验结果,才可能弄清产生这些差别的原因.

(树华 编译自 *Physics World News*, 4 Mar 2011)