

在大型强子对撞机上探索物质本源的大 大型重离子实验*

蔡 勛[†]

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘 要 欧洲核子研究中心的大型重离子实验探测器(ALICE) , 利用 2008 年开始运行的大型强子对撞机(LHC) , 将核物质加热到太阳中心温度的几十万倍 , 研究在高温高密极端环境下生成的新物质形态(夸克胶子等离子体或夸克物质) 的性质. 这样的实验有可能从本源上探索 : 强作用力如何支配物质结构? 夸克作为强作用力的基本量子 , 如何禁闭于质子和中子内部? 夸克作为物质的基本组成单元 , 质量从何而来? 文章介绍了在大型强子对撞机上探索物质本源的大型重离子实验 , 内容包括 : 强作用力与夸克模型、渐进自由与夸克禁闭、重离子碰撞与夸克物质、LHC 上的 ALICE 实验、连通夸克和宇宙.

关键词 强作用力 , 夸克禁闭 , 夸克物质 , 高能重离子碰撞 , ALICE 实验

A large heavy-ion experiment designed to study origin of matter at the Large Hadron Collider

CAI Xu[†]

(Institute of Particle Physics , Central China Normal University , Wuhan 430079 , China)

Abstract A large heavy-ion experimental detector (ALICE) , scheduled to start operating at the CERN Large Hadron Collider (LHC) in 2008 , has been specifically designed for the harsh environment of nuclear matter where it is more than 100 000 times hotter than the core of the Sun , to study the properties of a new state of nuclear matter , called quark-gluon plasma or quark matter , at very high temperatures and densities. The experiments will allow us to explore what is the physics of strongly interacting matter , how the quarks are confined inside protons and neutrons , and where the mass of quarks comes from. In this paper we give a brief introduction to the strong interaction and the quark model , asymptotic freedom and quark confinement , high energy heavy - ion collisions and quark matter , the ALICE experiments at the LHC , and the connection between quarks and the cosmos.

Keywords strong interaction , quark confinement , quark matter , high energy heavy-ion collisions , ALICE experiment

1 引言

1.1 2008 年 9 月 10 日 , 日内瓦

经过了长达 20 年的准备 , 位于风景秀丽的莱蒙湖畔的欧洲核子研究中心(CERN) 宣布 , 2008 年 9 月 10 日 , 大型强子对撞机(LHC) 已正式启动 , 成功地实现了第一束质子束流在 LHC 的贯穿. LHC 是规模最大的科学计划 , 是人类科学和技术进步的里程碑.

LHC 是人类有史以来建造的一台空前复杂的物理实验装置. 这台世界上能量最高的超大型加速器 , 拥有数千台世界上最大规模的超导磁体 , 被安放在法国和瑞士边境地下的一条平均约深达 100m、长达

* 国家自然科学基金重点项目(批准号 :10635020) , 教育部科学技术研究重大项目(批准号 :306022) , 高等学校学科创新引智计划资助项目(批准号 :B08033)

2008 - 09 - 16 收到

[†] Email : xcai@mail.ccn.u.edu.cn

27km 的环形隧道内. LHC 将在实验室内制造出一个宇宙中最冷的低温环境, 温度降低到 -271°C (1.9 K), 令能量高达 7 万亿电子伏特(质子)或每个核子能量高达 2.75 万亿电子伏特(铅离子)的两束粒子, 以接近于光速的速度, 围绕 LHC 的储存环做相反方向的运行后发生猛烈的对撞轰击, 估计每秒的轰击次数可达数亿次. 这个世界上最大的对撞机将通过粒子轰击, 重建大爆炸后宇宙的初期形态. 用被誉为继爱因斯坦之后世界上最著名的科学思想家和最杰出的



理论物理学家斯蒂芬·霍金的话来说: “这项实验计划的实施, 将宣告一个具有重大物理学发现的新的黄金时代到来.”^[1]

斯蒂芬·霍金与数学家彭罗斯因证明著名的关于时空的奇性定理, 共获 1988 年沃尔夫物理学奖. 霍金关于黑洞热辐射的发现, 是时空理论的重大突破. 这种辐射, 被称为霍金辐射^[2]. 霍金于 2006 年秋, 被邀请访问 CERN (见图 1 左).



图 1 (左) 2006 年 9 月, 斯蒂芬·霍金访问 CERN 时参观 LHC 隧道^[1] (右) 2008 年 4 月, 彼得·希格斯出席 CERN/LHC-2008 开放日时参观 LHC 隧道内的实验室^[4]

1.2 2008 年春, CERN/LHC

“为什么要建造 LHC?” 如果物理学家被追问, 并要以一句话来回答, 他们通常会说“寻找希格斯粒子”. 希格斯粒子是科学界关注的焦点, 被认为是物质的质量之源, 是至今最为成功的粒子物理理论“标准模型”中最后剩下的一种尚未被发现的玻色子, 而它的存在却是整个“标准模型”的基石^[3]. 希格斯玻色子被称为粒子物理学的“圣杯”, 或被戏称为“上帝粒子”, 充满了神秘色彩. 自从希格斯预言这一粒子存在以来, 科学家们就一直试图在实验中发现该粒子从而证实其存在, 但至今所有努力均告失败.

40 多年前预言希格斯玻色子存在的著名理论物理学家彼得·希格斯(见图 1 右), 在出席 CERN 的 LHC-2008 开放日时^[4]说: “这是一个激动人心的时刻, 很快就可以发现这种玻色子.” 仅两天的开放日, 来自世界各地的访问者就超过了 7 万 6 千人.

1.3 2007 年冬, LHC 的实验室

站在 CERN 稍高的楼层上, 透过窗户就可以眺望远处山顶终年积雪的勃朗峰. 它是欧洲第一高峰和阿尔卑斯山脉的主峰, 山峰雄伟, 风光旖旎.

2007 年隆冬, 作为世界领先的粒子物理实验室 CERN, 先后迎来了三位诺贝尔物理学奖获得者. 前

两位是奠定“标准模型”基础的理论物理学家, 即 1957 年获奖者杨振宁^[5] (见图 2) 和 1999 年获奖者格拉德·特霍夫特^[6] (见图 3 左); 后一位是实现宇宙微波背景辐射精确测量的实验物理学家, 2006 年获奖者乔治·斯穆特^[7] (见图 3 右).

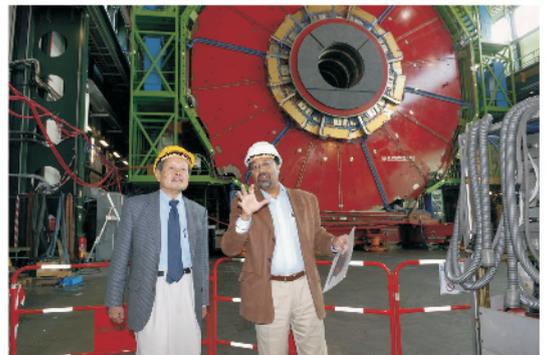


图 2 2007 年 1 月, 杨振宁访问 CERN 时, 在 CMS (CMS 是探测器和相应实验的国际合作组名称) 负责人陪同下参观 LHC 隧道内的实验室^[5]

作为粒子物理学基本理论的“标准模型”, 被认为是科学史上可与牛顿万有引力理论媲美的瑰宝. 特霍夫特在杨-米尔斯规范场理论^[8]方面的工作, 特别是他在做研究生时关于量子非阿贝尔规范理论的重整化的证明^[9], 为奠定“标准模型”基础做出了杰出的贡献. 特霍夫特曾说过, 杨振宁的工作对他的

影响很大,没有杨振宁,就没有“标准模型”。杨振宁在访问中说:“每个人都关注希格斯粒子,都以为它将会被发现”,他又补充指出:“不过,如果它最终未被发现,有可能更加激动人心”。杨振宁相信:“宇宙学正在成为一个激动人心的领域,因为还有许多迄今尚未了解的异乎寻常的概念等待着人们去揭示”。

杨振宁提到的异乎寻常的概念涉及 21 世纪初物理学最重大的科学问题,即宇宙的起源和物质的



基本组成。在宇宙能量分布中,差不多占 23% 的暗物质和占 73% 的暗能量,主导了宇宙结构的形成。今天所有的宇宙结构,源自于宇宙大爆炸后极早期物质分布的微小涨落,而这些涨落会在宇宙微波背景辐射中留下痕迹。斯穆特参与的宇宙微波背景探索者卫星 COBE 项目,被誉为现代宇宙论从猜想发展成为精密科学的起点,标志着宇宙学进入了精确研究的时代。了解暗物质和暗能量很快成为了 LHC 的研究目标。



图3 (左)2007年1月,格拉德·特霍夫特访问 CERN 时,参观 LHC 隧道内的实验室^[6]; (右)2007年2月,乔治·斯穆特访问 CERN 时,参观 LHC 隧道内的实验室^[7]

1.4 2007 年夏, LHC 的实验室

1957 年诺贝尔物理学奖获得者李政道应邀访问 CERN 时正值 2007 年盛夏^[10](见图 4)。他对粒子物理发展的前景,一直保持着激动乐观的态度。他指出,我们今天关于物质是由什么构成的概念,与 50 年前相比已相当的不同了。除了我们不知道的暗物质和暗能量,我们知道的所有物质都是由 12 种粒子组成,即 6 种夸克和 6 种轻子。李政道认为,轻子和夸克的混合现象是粒子物理的重要基石,这个领域正处在新发现的边缘,随着对这些基本组元的进一步探索,新的伟大的物理发现将会诞生。

早在 1974 年,李政道就提出了他的新思维^[11],“将高能量或高密度的核物质分布在相对较大的空间,对于探索新现象具有相当大的意义”。在重核的高能碰撞中,他看到了真空恢复破缺对称性的希望,并由此推动了美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)的超相对论重离子对撞机(RHIC)项目的实现。李政道在 RHIC 实验中,怀着激动的心情见证了强作用夸克胶子等离子体(sQGP)的产生的成就^[12],看到了重离子对撞物理与暗能量物理之间可能的联系。李政道说:“我深信在 LHC 上进行的重离子项目对于探索这种可能性十分重要。这将成为一个转折点。我们期待 LHC 呈现给我们一个充满新发现的世界,这些发现将为我们未来的探索指引方向。”



图4 2007年8月,李政道访问 CERN 时,在 ATLAS(ATLAS 是探测器和相应实验的国际合作组名称)负责人陪同下参观 LHC 隧道内的实验室^[10]

1.5 2006 年秋,上海科学会堂

2006 年 11 月 14 日,在中国科学院上海分院副院长朱志远和本文作者共同担任大会主席的第 19 届国际超相对论核-核碰撞(夸克物质 2006)会议^[13,14]的开幕式上,大会名誉主席李政道在报告中发表了一首题为《完美的液态 sQGP》的英文诗:

Eight Gluons for the Universe,
To set her gauge.
Six Quarks for the Humankind,
Searching for the truth.

One Plasma with superstrength ,
 One Plasma to bind them.
 Through Dark Energy ,
 One Plasma to quench them.
 And from the Big Bang ,
 One Plasma to shape them all.

(中译文 :宇宙兮 ,倚胶子八重以建规范 ;人类兮 ,取夸克六种欲揭帷幔。汤浓浓其混沌兮 ,斡维焉系 ,能闇闇其朦胧兮 ,猝灭焉急。遂古之初 ,上下未形 ,天何所沓 ,列星安行。)

李政道深信“对于物理学来说 ,21 世纪初叶的重要性等同于 20 世纪初叶。而 LHC 将会是做出第一批发现的第一台机器。我们都非常荣幸能亲历其境。”

2 强作用力与夸克模型

2.1 基本粒子不基本

探索物质微观结构和基本作用力的性质 ,是科学研究的重要领域。自从有人类出现以来 ,这种探索从来没有停止过。原子作为物质不可分割的最小单元 ,可以追溯到古希腊德谟克利特的哲学猜测。原子的真实存在 ,一直到 19 世纪初 ,才被英国化学家道尔顿实验证实。然而原子不可分割的观念 ,却是由于 19 世纪末的一系列实验 ,才开始发生动摇 :1895 年 ,伦琴发现 X 射线 ;1896 年 ,贝克勒尔发现原子放射性 ;1897 年 ,汤姆孙发现电子 ;1898 年 ,卢瑟福发现 α 和 β 射线。1910 年前后 ,卢瑟福设计了著名的“ α 粒子散射实验” ,建立了原子的有核模型 ,电子在原子核外 ,受光子作为力的传播载体的电磁作用力约束 ,形成原子。1932 年 ,查德威克发现中子 ,人们才认识到原子核是由质子和中子构成的。

在原子核层次下面 ,质子和中子是否还有其内部结构 ? 起初 ,理论物理学家认为 ,被统称为核子的质子和中子如同点粒子 ,是基本粒子。根据狄拉克理论 ,质子带电 ,磁矩是一个单位核磁子 ;中子不带电 ,磁矩是零。但出乎意料的是 ,实验物理学家斯特恩于 1933 年测得的数据与点粒子理论的结果相悖 ,质子磁矩为 5.6 个单位核磁子 ,中子磁矩不是零 ,而是 -3.82 个单位核磁子。这是“基本粒子不基本”一种象征。核子具有内部结构的实验证据是 ,1956 年由霍夫斯塔特领导的实验组采用长达 3km 的斯坦福直线加速器 (SLAC) 进行高能电子弹性散射实验找到的。霍夫斯塔特因此获得 1961 年诺贝尔物理学

奖。

1968 年以后 ,由于有了更高能量的粒子加速器 ,人们开始进行电子非弹性散射实验。把电子打入核子内部深处 ,实验测到了很大的电子动量转移和散射角 ,似乎电子在核子内部遇上类似点状的硬颗粒。这些硬颗粒有带电和不带电的 ,被粒子物理学家起名为部分子^[15] ,它们在核内准自由地运动着。(见图 5)

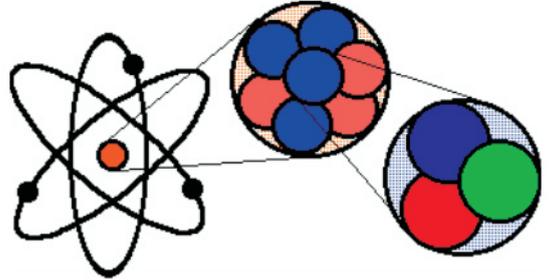


图 5 物质结构的模型 :原子的有核模型→原子核的核子模型→核子的夸克模型

2.2 核力与 π 介子

17 世纪初 ,开普勒根据前人观测的资料和星表 ,归纳出行星运动规律 ,被称为开普勒三定律。17 世纪末 ,牛顿在开普勒的基础上 ,基于他发明的微积分导出了星球间的引力 ,引力的大小与星球质量成正比 ,与星球间距离的平方成反比。牛顿推断 ,所有物体之间都存在这样的引力 ,这引力被称为万有引力。

18 世纪中期 ,富兰克林用实验证实天空雷电与人工摩擦生电性质相同 ,他还发现电荷有正负两种 ,电荷间的作用力 ,同性相斥、异性相吸。18 世纪末 ,库仑测量出电荷间的作用力的大小 ,与电量成正比 ,与距离的平方成反比。19 世纪初 ,安培发现电力和磁力的关系 ;19 世纪中期 ,法拉第总结出法拉第电磁感应定律。20 世纪初 ,量子力学出现。在原子尺度 ,须用量子化的电磁场来描述 ,这种描述方法就是把两粒子之间的电磁作用看成是在交换光子。有关的理论被称作量子电动力学。

中子被发现后 ,原子核的结构问题突现出来 ,量子力学创始人海森伯等尝试引入一种新的强的作用力 ,被称为核力 ,可以把质子和中子紧紧束缚在原子核内。当时(1935 年)正在攻读博士学位的研究生汤川秀树 ,联想到传播电磁力靠的是交换无质量的光子 ,提出只在原子核的很小范围内起作用的核力 ,是靠交换一种质量较重的粒子来传播的。这种粒子于 1947 年被鲍威尔在核乳胶实验中发现 ,称之为 π 介

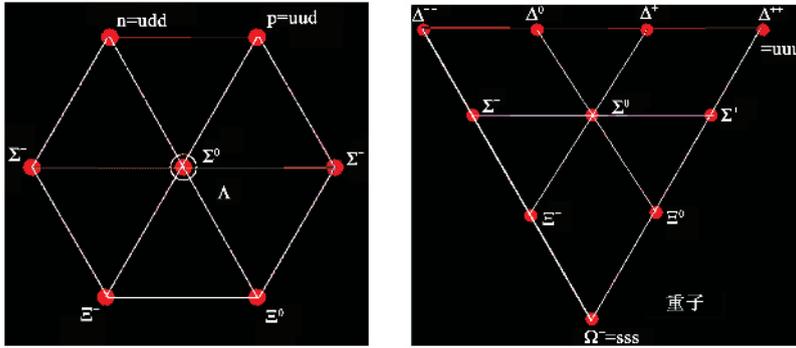


图6 强子结构的八重点点阵模型

子. 汤川秀树因此于 1949 年获得诺贝尔物理学奖.

20 世纪 50 年代初,物质结构的基本粒子图像似乎很美妙:质子和中子由核力束缚,组成原子核,传递核力的是 π 介子;电子和原子核由电磁力束缚,组成原子,传递电磁力的是光子. 然而随着加速器能量的增加和探测技术的提高,与质子、中子和 π 介子类似的参与强作用的粒子愈来愈多地被发现,使被称为强子的基本粒子的总数迅速上升到 200 多种. 难道它们都是基本的吗?

2.3 夸克模型

1869 年,门捷列夫面对杂乱无章的几十种化学元素,按重量和化学性质分类排队,发现元素周期表,奠定了研究原子结构的基础. 100 年后(1961 年),盖尔曼研究发现了强子的“周期表”,即“八重态法”的点阵模型^[16](见图 6). 根据对称性,他预言点阵的最下面还有一个质量和电荷都可给出的未知粒子,后被取名为 Ω^- . 1964 年, Ω^- 在美国的布鲁克海汶实验室被发现,盖尔曼因此获得了当年的诺贝尔物理学奖.

八重态法预示,强子有更深层的结构. 盖尔曼发现,强子可以由非常古怪的 3 种带电的基础粒子构成,电荷是基本电荷的 $1/3$ 或 $2/3$,可从来没有见过. 盖尔曼给这 3 种基础粒子取了一个带幽默的名字——“夸克”. 他说:“即使夸克真是具有有限质量的物理粒子,也无法推测它的行为方式”,因为“它们被永久地禁闭在强子内部”.

在夸克模型中,介子由一对正反夸克组成,重子由 3 个单夸克组成. 强子在相互作用中的产生、湮灭和转化,都可归结为夸克的产生、湮灭、转化和重新组合. 这种模型的奇妙之处,还在于模型所不允许的组合,在实验中也并没有发现所对应的粒子. 然而有些强子由 3 个相同夸克组成,违反量子力学中的泡利

不相容原理. 为了解决夸克模型的这一矛盾,格林伯格假设^[17],夸克还有一个被称为“色荷”的内部自由度:夸克的色荷有红、蓝、绿 3 种类型,反夸克则有反红、反蓝、反绿 3 种. 如同带负电的电子与带正电的原子核组成不带电的稳定原子一样,带色荷的夸克与带反色荷的反夸克组成的介子,带不同色荷的 3 个单色夸克叠加而成的重子,都是无色的.

早期的夸克学说主张有 3 种夸克,分别称为上夸克 u 、下夸克 d 和奇异夸克 s ,由它们组成强子. 这种分类,被物理学家称之为“味”. 然而要解释电荷宇称不守恒和某些重子的 β 衰变的差异时,表明存在第 4 种味的夸克. 1973 年,丁肇中和里希特的实验几乎同时发现了后来被称为 J/ψ 的新粒子,它是第 4 种味(粲夸克 c)的束缚态. 他们因此分获 1976 年诺贝尔物理学奖. 以后,里德曼等人于 1977 年找到第 5 种味(底夸克 b)存在的证据,美国费米实验室的实验组于 1994 年又找到第 6 种被称为顶夸克 t 存在的证据. 6 种味的夸克 (u, d, s, c, b, t),它们和 6 种轻子(电子、 μ 子、 τ 子及其相应的 3 种中微子)、规范粒子(1 个传播电磁作用力的光子、3 个传递控制夸克轻子衰变的弱作用力的中间玻色子和 8 个传递强作用力的胶子)一起组成了粒子物理世界(见图 7).

从高能散射实验研究强子动力学行为,得出强子由部分子构成,而从对称性理论分析强子分类特性,得出强子由夸克组成. 二者殊途同归,结论一致,证实了基本粒子确实具有更深一层的复杂结构.

1954 年,杨振宁等把对易的 $U(1)$ 规范群对称性的定域化方法,推广到非对易的 $SU(2)$ 规范对称性的情形,建立了定域化的杨-米尔斯规范场理论^[8]. 把色自由度的 $SU(3)$ 非对易规范对称性定域化,得到有关色 $SU(3)$ 的杨-米尔斯场的动力学,被称为色动力学.

基本粒子						
夸克	u (up)	c (charm)	t (top)	g (gluon)	力的载体	
	d (down)	s (strange)	b (bottom)			
轻子	ν_e (e neutrino)	ν_μ (μ neutrino)	ν_τ (τ neutrino)	W (W boson)		
	e (electron)	μ (muon)	τ (tau)	Z (Z boson)		

图7 粒子物理世界：夸克有上夸克 u、下夸克 d、奇异夸克 s、粲夸克 c、底夸克 b、顶夸克 t 轻子有电子、 μ 子、 τ 子及其相应的 3 种中微子；力的载体有传播电磁作用力的光子 γ 3 个传递控制夸克轻子衰变的弱作用力的中间玻色子和 8 个传递强作用力的胶子

电磁场的麦克斯韦方程的量子化是量子电动力学 (QED)。量子电动力学研究电子和光子的量子碰撞。仿照关于电磁力的量子电动力学，可以建立一种关于强力的量子色动力学 (QCD)。按照这一理论，夸克之间的强相互作用是由夸克带有的色荷所形成的色场来传递的。色场的量子被称为“胶子”。胶子不带电荷，但带有色荷，包括由红、蓝、绿三种色荷组成的 8 种类型。强子之间的相互作用（例如核力）可以看作是夸克之间的强作用的剩余力，正像分子力是原子内电磁作用的剩余力一样。量子色动力学研究夸克和胶子的量子碰撞。在 QED 理论中，电子之间的电磁作用是交换光子，光子只有一种，本身不带电荷，1 个光子不能变成 2 个光子。而在 QCD 理论中，夸克之间的强作用是交换胶子，胶子有 8 种，本身带有色荷，因此还能产生胶子，胶子可以有 3 个或 4 个在一起的作用。所以两夸克之间的胶子 1 个可变成 2 个、3 个、多个，距离远时胶子就更多，作用力就更大。胶子场比光子场复杂，因而出现了许多不同寻常的现象和性质，其中最重要的恐怕要数“渐近自由”和“夸克禁闭”了。

量子色动力学和弱电统一理论，构成粒子物理“标准模型”理论的全部内容。

3 渐进自由与夸克禁闭

3.1 重整化与渐进自由

电子对核子的“深度非弹性散射”实验，使夸克

从“假设”变成“事实”。然而实验的另一项结论，对于理论物理学家来说却是一大难题：夸克之间的色荷作用力与它们之间距离的关系，与服从库仑定律的电荷作用力相反，距离近的时候好像没有作用力，距离远时作用力反而变大了，而且愈远作用力愈大。

“荷”这个耦合参数通常被用来描述作用力的大小。粒子间作用的强度以它们所带的荷来标度，荷越大，强度就越强。电磁力的荷是电荷，它是电磁相互作用强度指标。在量子色动力学中，色荷是强相互作用的强度指标，而作为规范场粒子的胶子还具有自相互作用，即胶子与胶子之间的相互作用。由于在这个理论中，荷的可重整化性表现为反常的“真空反屏蔽效应”，即夸克与周围真空的相互作用，导致由真空极化产生的虚胶子和正反虚夸克的极化分布，最终效果使夸克色荷变大。从离夸克较近的距离上来看，远距离的夸克比它带的色荷多，所以近距离的强作用相对而言变弱了，这就是“渐近自由”。出现在量子场论的高阶量子修正计算中的高能无穷发散，可以重整化到实验观测中，因而具有重整化点的选取自由性。戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克三位理论物理学家，因为证明在强相互作用理论中夸克具有这种渐近自由的特征而获得 2004 年诺贝尔物理学奖^[18]。渐近自由是非常奇特的性质，一般的场论没有这种性质，杨-米尔斯场是唯一的例外，恰好可以用来解决长久以来令人困惑的强子结构之谜。因此，杨-米尔斯非对易规范场在现代物理学理论中占有特殊地位。渐近自由使量子色动力学的微扰理论计算在高能和近距离情况下的研究相当有效，所以通常的文献常称其为微扰量子色动力学 (pQCD)。

3.2 夸克禁闭

但是，在低能和远距离情况下，由于耦合常数变强而出现禁闭力，微扰方法已不适用，计算变得不可能，成为量子色动力学的巨大难题。“夸克禁闭”，指的是夸克无法从强子中逃逸出去。红蓝绿三色夸克组成无色的强子态。一旦夸克可以从强子中跑出来，自然界就会存在带色的粒子，带色的粒子又引起真空的进一步极化。由于色荷之间的禁闭势能很大，整个真空都带上了颜色，能量越来越高，最终导致真空爆炸。当然，这种情形实际上并没有发生，暗示自然界其实不存在游离的夸克。

夸克到底是一个数学技巧，还是一个物理实在？由于实验上已有了夸克存在的间接证据，物理学家

相信夸克的确存在. 夸克为什么会被禁闭, 理论物理学家提出一些模型. 譬如, 口袋模型, 认为强子是一只受真空挤压的口袋, 可将夸克装住而逃不出来, 弦模型认为强子内的夸克被绑在弦两端, 弦拉长时很难断裂, 一旦断裂, 断裂处生成一对正反夸克, 使原来的一个强子碎裂为 2 个新强子, 而夸克仍不可能自由出现. 此外, 还有线性禁闭势模型、真空色电极化模型、磁单极凝聚禁闭模型等(见图 8).

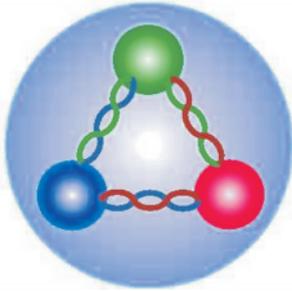


图 8 夸克禁闭

尽管现有的理论和实验, 对强作用力已有深入了解, 却仍有 2 个重大的问题: 一是夸克禁闭的机制; 二是质量产生的机制. 此外, 核子由 3 个夸克组成, 它们的质量之和却只占核子质量的百分之一. 核子的另外 90% 以上的质量从哪儿来? 是否夸克禁闭的机制与质量产生的机制也有关? 夸克禁闭的根本原因到底是什么? 夸克禁闭是永久的还是暂时的? 在什么环境下夸克可能解除禁闭? 极端高压? 极端高温? 这些已成为 21 世纪人类面临的重大科学问题之一(见图 9).

4 夸克物质与重离子碰撞^[19 20 21]

4.1 小爆炸

在量子物理中, 粒子间越近的距离, 对应着能量越高的碰撞. 因此, QCD 的渐近自由只有在超高温、超高密的环境中才会表现. 这个理论预言, 在异常高温和异常高密的极端环境中, 核子有可能被“熔化”, 夸克和胶子有可能不再被禁闭在核子内部, 形成一种夸克和胶子自由存在的新的物质形态, 被称为夸克-胶子等离子体, 或夸克物质. 要实现由通常核物质状态到夸克物质态的相变, 需要达到大约 2 万亿 (2×10^{12}) 度的临界温度, 这差不多是太阳中心温度的几十万倍. 自从宇宙诞生以来的自然界中, 还没有出现过这么高的温度. 人们推测, 宇宙大爆炸 (big bang) 后的几百万分之一秒前, 温度曾经超过

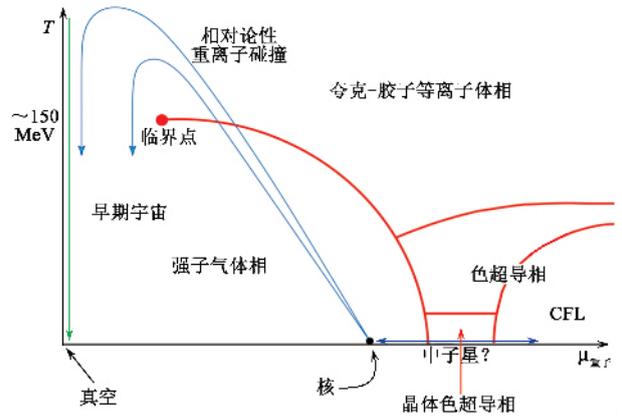


图 9 (上) 极端高压和高温下解除禁闭的夸克-胶子等离子体 (下) 理论给出的核物质相变图

这样的临界值, 因而整个宇宙曾经处于夸克-胶子等离子体状态(见图 10).

根据爱因斯坦相对论, 2 个重原子核以接近光速的速度相互靠拢时, 它们的形状类似于极薄的饼; 经过碰撞造成的极端高温, 把带有强相互作用的色荷的夸克与胶子释放出来. 为了在地球上实现这样的极端环境, 物理学家必须在实验室中重建宇宙大爆炸后最初几微秒内极高的温度、密度与压强. 温度其实是大量粒子系统的平均动能, 压强则会随着粒子系统能量密度的增加而上升. 因此, 我们必须尽可能将最高的能量, 挤进最小的体积中, 才有可能造出模拟宇宙大爆炸那样的小爆炸 (little bang) 来(见图 11). 幸运的是, 大自然提供了重元素原子核这种现成的极紧密的核物质团. 如果将 2 个各有大约 200 个核子的重离子(譬如, 金核或铅核) 进行高能对撞, 会产生比单个质子碰撞猛烈得多的结局. 重离子在超高能碰撞中创造出来的东西, 再不是几十个粒子的火星飞溅而已, 而是由成千上万颗粒子所组成的沸腾火球. 由于涉及的粒子数量多到足以让火球的集体性质(能量密度、温度、压强、热容、熵、黏度、浊度等) 成为非常有用的参数, 甚至给出激动人心的有关相变的信号. 这种差别如同研究整个一滴水的特性与只研究少数几个单水分子的性质一样.

4.2 相对论重离子对撞机实验

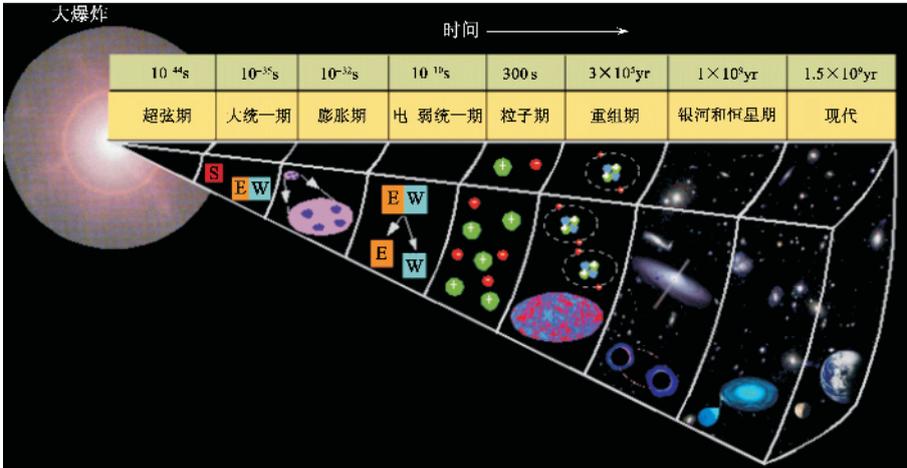


图 10 大爆炸后的宇宙随时间的演化

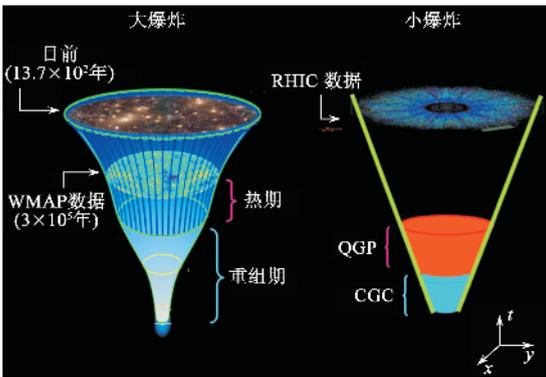


图 11 高能重离子碰撞中形成的小爆炸(右)与宇宙大爆炸(左)的比较

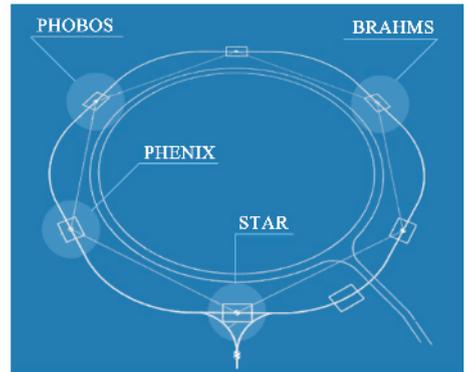


图 12 RHIC 上的 4 个实验: BRAHMS, PHENIX, PHOBOS 与 STAR

2000 年开始在美国布鲁克海文国家实验室运行的相对论重离子对撞机(RHIC),是制造和研究小爆炸的最新设备. RHIC 与以往采用重离子束流轰击静止原子核靶的实验不同,它是让两束高速的重离子束流相对轰击的粒子加速器.同样的速度,迎面对撞所积累的能量要大得多,因而所有的能量都可用来制造火球.在 RHIC 隧道中,原子核以接近光速 99.99% 的速度飞行,核内的每个质子与中子皆可达到 1000 亿电子伏特(100GeV)这样高的能量.2 条由 870 个吨级液态氦冷却的超导磁铁组成串列,引导离子束流在长 3.8km 的交叉环中绕行.粒子束流的碰撞被控制发生在环的 4 个交叉点上.这 4 个交叉点分别装置了取名为 BRAHMS, PHENIX, PHOBOS 与 STAR 的 4 台精密的粒子探测器(见图 12),用来记录从猛烈的轰击中喷溅出来的次原子碎片和新产生的粒子.

当 2 个金原子核以 RHIC 所能达到的最高能量迎面对撞时,原子核与其内部的质子、中子真的被

“熔化”成火球了(见图 13).火球暂时释放出大量的夸克、反夸克与胶子,它们最后重新结合(强子化)末态的产生粒子可达 5000 多个.

RHIC 实验分别由 4 个国际合作组设计、建造与操作,每个合作组的研究人员约从 60 到 500 位不等.不同的合作组的研究方向和研究手段不尽相同,以面对艰难而复杂的挑战. BRAHMS 比较集中地观察核碰撞方向上向前的原始核碎片;PHOBOS 则在较大范围观测产生粒子的角分布;STAR 建造了一个巨大的充气圆柱,好比是世界上最大的“数码相机”,拍摄下环绕射束主轴所有带电粒子的三维相片;PHENIX 探寻碰撞早期产生的夸克与胶子火球中逃逸的粒子,提供火球内部深处的 X 射线照片.

4.3 “完美的”液态夸克胶子等离子体^[22]

科学家们总结 RHIC 几年来 4 个合作组的实验数据,结果表明,同早期基于夸克-胶子等离子体形成的简单模型的理论预言之间存在着差距.他们惊

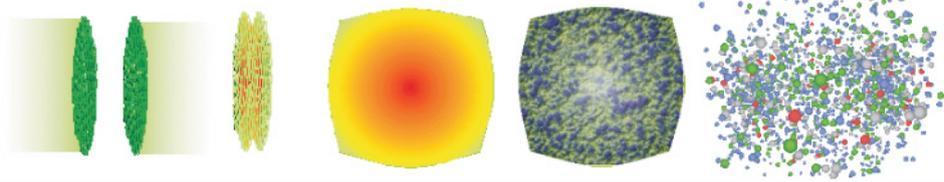


图 13 高能重离子碰撞过程的示意图

讶地发现 ,RHIC 重离子对撞形成的物质不像预期的自由夸克和胶子的气体那样飞散 ,而看起来更像是一种液体. 测量结果显示 ,对撞中产生的原初粒子往往集体移动 ,以应对撞核形成的火球随压强的变化. 科学家们把这个现象称作“ 流动 ”,因为它类似流体运动的特性. RHIC 上形成的物质 ,具有快速的热平衡、极低的粘性和高度协调的集体移动模式 ,成为历来观测到的最近乎完美的液体(见图 14). 实验给出的集体运动 ,显示出“ 完美的液态 QGP ”,具有更高程度的集体运动.

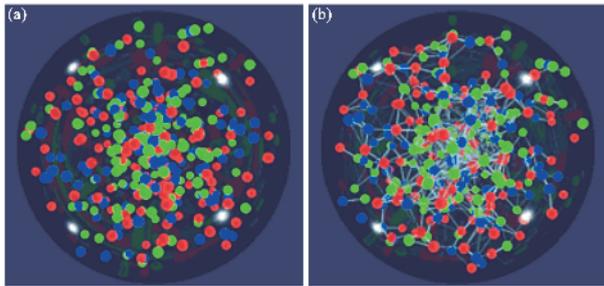


图 14 (a)理论预言的夸克 - 胶子等离子体的气态图像 (b) RHIC 金 - 金对撞观测到的液态图像

这个新发现可能对物理学中的“ 弦论 ”产生影响. 弦论和 RHIC 对撞之间的联系 ,是人们未曾预料到的. 弦论以十维空间的概念来解释宇宙的性质 ,描述重力在黑洞附近的的活动情况 ,并能解释夸克如何在夸克 - 胶子等离子体中运动. 弦论有可能使 20 世纪两大物理成果(广义相对论和量子力学)统一起来 ,将会对 21 世纪的物理产生深刻影响.

5 LHC 上的 ALICE 实验^[23 24 25]

大型强子对撞机 LHC 上配置有 4 个巨型探测器(见图 15) ,其中 3 个主要研究质心系能量为 $14 \times 10^{12} \text{eV}$ (14TeV)的质子 - 质子碰撞. 两束质子束流的能量被加速到 $7 \times 10^{12} \text{eV}$ 时 ,在 LHC 中作多达 4 亿次的反向绕行 ,并在给定的放有探测器的地点发生碰撞. ATLAS 探测器像是一台巨型数字照相机 ,每秒钟可以拍摄出质子之间 6 亿次碰撞的照片 ;

CMS 探测器像是一台多功能摄像机 ,能够捕捉粒子在大型强子对撞机隧道内碰撞时可能出现的各种事件 ;LHCb 探测器的任务是专门测量包含底夸克 b 的强子性质.

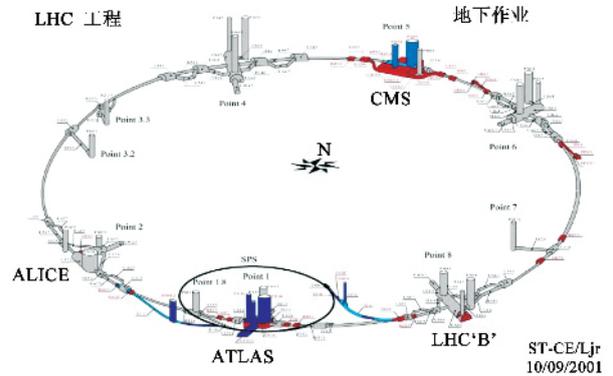
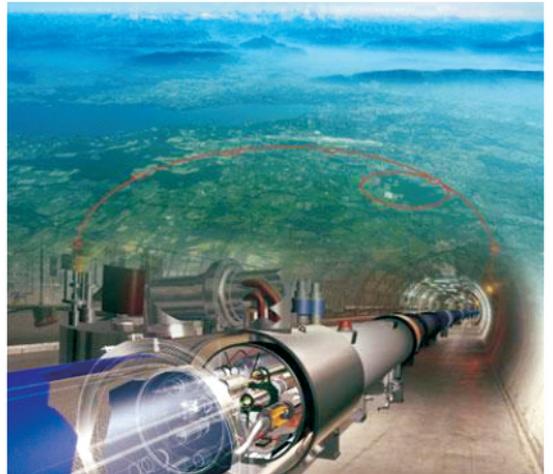


图 15 LHC 隧道(上)和其上的 ALICE , ATLAS , CMS , LHCb 4 个探测器(下)

大型重离子实验 ALICE 探测器利用 LHC 的 27km 长的巨型粒子加速器环 ,将铅核束流加速到接近光速的 99. 99999% . 铅核束流的亮度高达 $10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$,每个铅核内的几百个核子均携带高达 2. 75 万亿电子伏特的能量. 通过高压下猛烈的对撞轰击 ,把核和核子完全粉碎 ,形成比 RHIC 能区的能量更高、密度更高、温度更高而且寿命更长的火球. 火球内核物质被加热到太阳中心温度的几十万倍 ,有可

能经历宇宙大爆炸后几微秒内所处的状态。

ALICE 探测器(见图 16)自 1991 年开始设计、研制和建造, 历时已 17 载。探测器高约 16m、长约 26m、重约 1.25 万吨, 位于 LHC 地下隧道的 50m 深处, 已耗资 1 亿欧元。ALICE 探测器包括许多子探测器: 如电磁量能器(EMCAL)、零度量能器(ZDC)、内部径迹系统(ITS)、时间投影室(TPC)、穿越辐射探测器(TRD)、飞行时间探测器(TOF)、前段多重数探测器(FMD)、高动量粒子鉴别系统(HMPID)、光子谱仪(PHOS)、光子多重数探测器(PMD)、双 μ 谱仪(dimuon spectrometer)等。

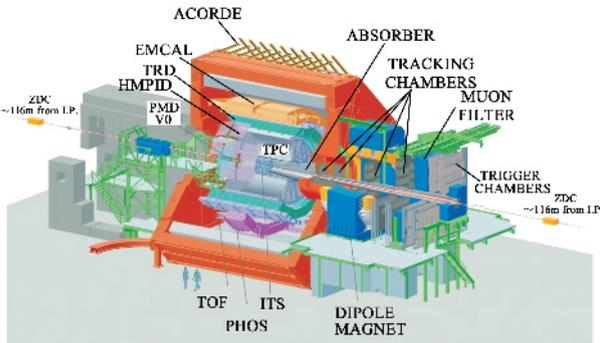


图 16 (上)ALICE 探测器的设计图(下)正在建设中的设备

ALICE 的科学目标: 研究极端环境下生成的夸克物质形态的性质; 认识强作用力支配物质夸克结构的特征; 了解夸克禁闭和解除禁闭的相变, 探索物质基本组成单元夸克的质量来源(见图 17)。如果幸运的话, ALICE 还可能在探测微型黑洞、探测暗物质和暗能量、揭示宇宙起源和宇宙膨胀之谜等方面获得成果。

ALICE 实验国际合作组包括来自 30 多个国家的 110 多家大学或科研院所的 1000 多位物理学家和工程技术人员(见图 18)。中国目前有华中师范大学粒子物理研究所和中国原子能科学研究院、华中科技大学的有关单位参加 ALICE 合作组。

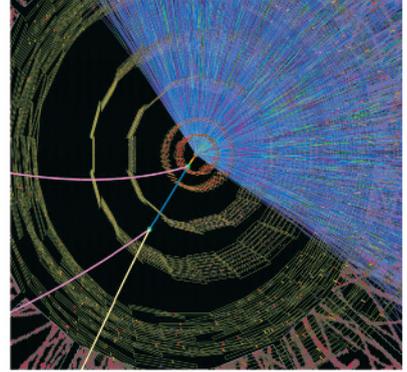
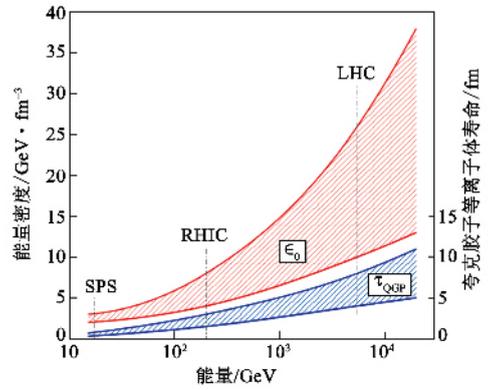


图 17 (上)ALICE 实验在 LHC 能量区域中理论预言可达到的能量密度与 RHIC 和 SPS 能量区域的比较图(下)理论计算的 ALICE 高能重离子碰撞未态产生粒子的 Monte Carlo 模拟图

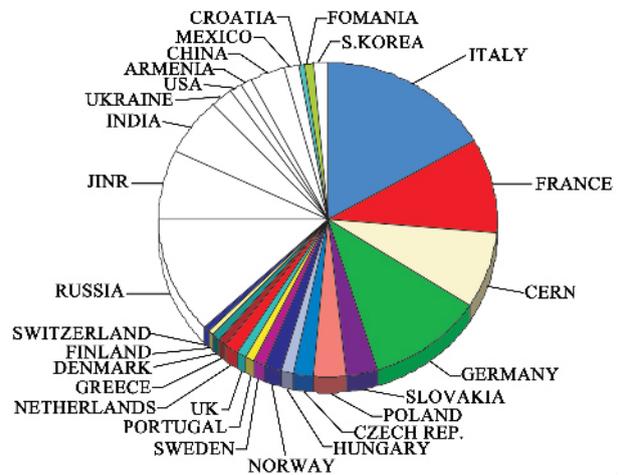


图 18 ALICE 实验国际合作组的国家成员(以各国经费投入为比例)

6 连通夸克和宇宙

6.1 11 个科学问题

美国国家科学技术委员会(NSTC)的职能, 是在信息技术、人类健康、运输系统和基础研究等前沿领域, 为美国政府科技投资设定明确的国家目标。

NSTC 主席由总统担任,成员包括副总统、总统科技顾问、负责科技的各部部长和各直属局局长等白宫官员。NSTC 的一个包括能源部、宇航局、国家科学基金会、科技政策办公室和预算管理局的工作小组,在检查美国政府现有投资状态后,针对美国国家研究理事会 NRC 提出的《连通夸克和宇宙:新世纪的 11 个科学问题》的报告^[26](见图 20),做出应当优先的回应。这 11 个科学问题是(1)什么是暗物质?(2)暗能量的性质?(3)宇宙开端?(4)什么是引力?(5)中微子质量与宇宙演化?(6)质子不稳定?(7)超高能宇宙射线粒子?(8)极端高密度高温下的新物质形态?(9)额外时空维度?(10)重元素如何形成?(11)新的物质理论?

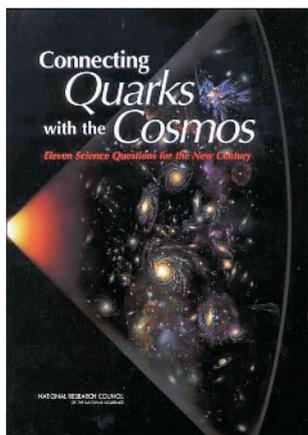


图 19 连通夸克和宇宙:新世纪的 11 个科学问题^[26]

6.2 大型强子对撞机的新任务

2006 年 10 月 3 日,瑞典皇家科学院宣布,当年度诺贝尔物理学奖授予美国宇航局哥达德空间飞行中心的约翰·马瑟和加州大学伯克利分校的乔治·斯穆特,以表彰他们发现了宇宙微波背景辐射的黑体谱形状及其温度在不同方向上的微小变化。他们利用 1989 年 11 月 18 日发射的宇宙微波背景探索者 COBE 卫星进行了非常细致的观测,被誉为现代宇宙论发展成一门精密科学的起点。

第二代宇宙背景各向异性探测卫星 WMAP 于 2001 年升空。由于 WMAP 的空间分辨率从 COBE 的 7° 提高到了 0.2° ,使得人类以前所未有的精度测定出宇宙中可见物质、暗物质以及暗能量的比例,分别约为 4%、23% 和 73%。

COBE 和 WMAP 的测量为人类评估宇宙的基本形状提供了依据。这些实验开创了宇宙论和粒子物理学联系的新领域。了解暗物质由什么构成,了解暗能量的性质,已成为即将在欧洲核子研究中心使

用的大型强子对撞机的新任务之一。

6.3 科学实验与人类安全

就在 CERN 宣布 LHC 运行的倒计时的重大新闻的几个个月前,居住在美国夏威夷的一位律师兼前核安全官员沃尔特·瓦格纳伙同一位西班牙科普作家路易斯·山奇,针对欧洲核子研究中心、美国费米国家实验室以及美国的能源部和国家自然科学基金会,向美国联邦地方法院提出诉讼^[27],要求在安全性得到证实之前,不得启动 LHC 对撞计划。他们的诉讼提出了一个理论假设:LHC 可能制造出吞没地球的粒子,比如“杀手奇异子(killer strangelets)”。奇异子是理论预言的一种奇异物质态。他们警告,如果奇异子十分稳定并带有负电,就有可能“吞噬”普通的物质,并将其转变为奇异物质,最终,一系列危险的连锁反应将会毁灭整个地球。

CERN 的发言人詹姆斯·基利斯表示,这项诉讼要求是“彻底的胡说”。“LHC 将在今年启动,并创造出各种关于宇宙的激动人心的新物理学认识,”他补充道,“从现在开始,一年后,世界还会在那里!”五年前,关于 LHC 安全性的评审报告就指出,“LHC 没有导致任何可能的威胁出现的基础。”该报告承认,这台加速器确有很小的几率产生短暂的微黑洞或磁单极,从而破坏普通原子的质子,但任何一种预言的情况都不会导致灾难。事实上,在美国布鲁克海文国家实验室兴建 RHIC 时,瓦格纳就提出过类似的耸人听闻的疑问。基利斯说,“RHIC 于 2000 年就开始运行了,我们现在还不是好好的。”此外,他还补充道,比 LHC 能量高得多的碰撞在自然界天天发生,宇宙射线粒子以接近光速的速度穿过银河系,月球已经经历了 50 亿年的这种碰撞效应,都没有被哪个贪婪的黑洞或者杀手奇异子毁灭。

按照现有的科学知识,现在人类制造的粒子加速器的能量非常低,其最高能量仅为 10^{12} eV。而宇宙空间有很多射线,它们的能量比我们人类粒子实验室的能量大得多,最高可达到 10^{24} eV。也就是说,宇宙线中的粒子能量比人类粒子加速器中的能量要高出 1 万亿倍。如果加速器能够发生这样可能性灾难事件的话,那么,这种事情早就在地球上发生了。在 高能粒子加速器上,人类虽有可能制造出人造黑洞和奇异物质态,制造出核聚变和真空态跃迁。但这些事件都是在微观尺度上瞬间发生的,而且会很快地演变为正常的物质。没有任何证据表明它们会出现级联反应,并影响周围的宏观环境。

6.4 21 世纪物理学前景

要了解 21 世纪物理学前景,就要面对几个重大问题,其中之一是为什么夸克不能单独存在,原因是真空把夸克禁闭起来。RHIC 是 2000 年开始进行的改造真空的实验。另外一个暗物质问题。看得见的物质还包括用电磁波、红外线测量的。看不见的暗物质不发可见光、红外线或电磁波,但有万有引力。由于暗物质的存在,远离星系中心的物质的速度不随距离的增大而减小。暗物质有引力,与看得见的物质一样,但其他性质完全不同,不是我们熟悉的物质,我们熟悉的物质在宇宙中是少数。LHC 上即将进行的重离子研究项目,对于探索这种性质十分重要。

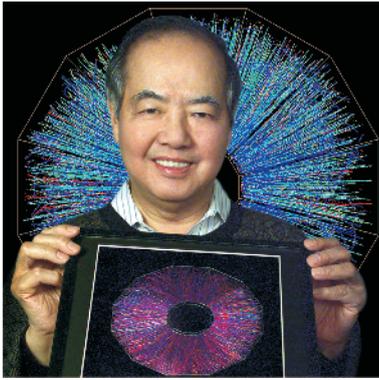


图 20 李政道指出,粒子物理前景光辉

总结 20 世纪物理学的发展方向,简单地说,着重简化和还原。人们以为找到最基本的粒子,就可以了解大物质的构造。这个方向使我们获得了很大的成功。然而在 20 世纪中叶,科学家发现并不是知道了基本粒子就能完全了解整个宇宙的,例如对称与不对称的矛盾,看不见的夸克、暗物质、类星体等。李政道认为^[10] 21 世纪物理学研究方向要整体统一,微观的基本粒子要跟宏观的真空构造、大型的量子态结合起来(见图 20) 粒子物理前景光辉。

参考文献

- [1] Alvarez - Gaume L , Sutton C. CERN COURIER , 2006 ,46 : 29755 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/987347>
- [2] Hawking S W. Nature , 1974 , 248 : 30 ; Dimopoulos S , Landsberg G. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 87 : 161602 ; Stoecker H. J. Phys. G : Nucl. Par. Phys. , 2006 , 32 : 429
- [3] Higgs P W. Phys. Lett. , 1964 , 12 : 132 ; Phys. Rev. Lett. , 1964 , 13 : 508
- [4] Peter Higgs discovered at LHC 2008 Open Days , CERN Bulletin , Issue No. 18—19/2008 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/1108521>
- [5] Sutton C. CERN COURIER , 2007 ,47 : 29815 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/989380>
- [6] Nobel prize winner Mr. Gerard 't Hooft visits ATLAS <http://cdsweb.cern.ch/record/1009652>
- [7] Marsollier A. CERN COURIER , 2007 ,47 : 29867 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/1016154>
- [8] Yang C N , Mills R L. Phys. Rev. , 1954 , 96(1) : 191
- [9] Gerard 't Hooft , Veltman M. Nucl. Phys. , 1972 , B44 : 189
- [10] Christine S C. CERN COURIER , 2007 ,47 : 31867 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/1054833>
- [11] Lee T D , Wick G C. Phys. Rev. , 1974 , D9 : 2291
- [12] Lee T D. Nucl. Phys. , A , 2005 , 750 : 1
- [13] Shen W Q. High - energy nuclear physics in China. In : Proceedings of Quark Matter 2006 , edited by Ma Y G , Wang E K , Cai X *et al.* J. Phys. G : Nucl. Part. Phys. , 2007 , 34 : S173
- [14] David d 'Enterria , Karel S , Carlos A S. CERN COURIER , 2007 ,47 : 29839
- [15] Feynman R P. Phys. Rev. Lett. , 1969 , 23 : 1415
- [16] Gell-Mann M. Phys. Rev. , 1962 , 125 : 1067 ; Phys. Rev. Lett. , 1964 , 12 : 155 ; Phys. Lett. , 1964 , 8 : 214
- [17] Greenberg O W. Phys. Rev. Lett. , 1964 , 13 : 598
- [18] Gross D J , Wilczek F. Phys. Rev. Lett. , 1973 , 30 : 1343 ; Politzer H D. Phys. Rev. Lett. , 1973 , 30 : 1346
- [19] 蔡勳.物理学进展,1988 8 :186 ;[Cai X. Progress in Physics , 1988 8 :186(in Chinese)] ;蔡勳.中国科学基金,1992 6(1) : 46[Cai X. Bulletin of National Natural Science Foundation of China , 1992 6(1) :46(in Chinese)] ;蔡勳.中国科学基金,1994 8(2) :98[Cai X. Bulletin of National Natural Science Foundation of China , 1994 8(2) :98(in Chinese)]
- [20] Wang Y P , Zhou D M , Cai X *et al.* Chin. Phys. C (HEP & NP) , 2008 , 32 : 308 ; 32 : 400 ; 32 : 714
- [21] 王亚平,周代梅,蔡勳.物理学进展,2008 28 :346[Wang Y P , Zhou D M , Cai X. Progress in Physics , 2008 28 :346(in Chinese)]
- [22] Science News , RHIC Scientists Serve Up " Perfect " Liquid : New State of Matter More Remarkable Than Predicted , <http://www.sciencedaily.com/releases/2005/04/050421212150.htm>
- [23] Antinori F(for the ALICE Collaboration). Heavy-ion physics with ALICE , In : Proceedings of Quark Matter 2006 , edited by Ma Y G , Wang E K , Cai X *et al.* J. Phys. G : Nucl. Part. Phys. , 2007 , 34 : S511
- [24] Jacobs P. CERN COURIER , 2008 ,48(5) : 27
- [25] Manzari V , Stefanini G. CERN COURIER , 2008 ,48(6) : 28
- [26] NRC , USA. Connecting Quarks with the Cosmos : Eleven Science Questions for the New Century. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10079
- [27] http://dockets.justia.com/docket/court-hidce/case_no-1:2008cv00136/case_id-78717/