

理论物理所专题讲座 (Colloquium) 简况



去年 9 月 13 日,北京大学物理系高崇寿教授应邀作了专题报告《夸克胶子等离子体》。

众所周知,我们生活的物质世界以三种形态存在:固态、液态和气态。实验上实现的电离等离子体可以称为物质的第四种态。近年来,物理学家提出还可能存在着第五种物质形态——夸克胶子等离子体 (quark-gluon-plasma, 简称 QGP)。

我们知道,强子是由夸克和胶子组成的束缚态。量子色动力学 (QCD) 已在高能强相互作用过程中取得了很大成功,是最有希望的强相互作用基础理论的候选者。鉴于实验上一直未能探测到自由状态的夸克和胶子,人们提出了色禁闭的基本假设:在没有对称性自发破缺的非 Abel 规范理论 (如 QCD) 中,携带规范群量子数的粒子都被规范作用禁闭在一定范围内形成此量子数为零的集团。物理上观察到的强子都是这种束缚态。

实验上测得强子电磁半径 $\lesssim 0.8 \text{ fm}$, 而原子核的典型半径约为 10 个 fm, 因此在核尺度的体积内可以容纳足够数目的强子, 这种强子的聚集状态就是核物质——强子物质相。此相的一个重要特征是, 内部各个组份强子是相对独立的色单态。如果简单地认为强子物质相由强子堆砌而成, 可以推算出相邻强子间的距离约为 2.17 fm, 这比强子直径要大, 因此强子物质相内存在相当的空隙。当压缩原子核到适当程度时, 核子之间的界限将会消除, 核子内部的色禁闭将被解除, 整个核成为色单态的夸克胶子体系, 这是一种全新的物质形态——夸克胶子等离子体相。

组份物质聚集成相需要一定的条件。首先, 要完成

是 Gamma-Ray Observatory 的缩称。从 60 年代末以来, 为了军事目的以及空间科学研究, 许多人造卫星和航天器均携带 γ 射线探测仪器, 其中为高能天体物理的发展做出贡献的有 OSO-3 (美, 1968)、SAS-2 (美, 1972)、COS-B (欧洲, 1975)、HEAO-3 (美, 1979)、Granat (苏, 1989)。1991 年上天的 GRO 的探测威力远超过前者, 它在 30 千电子伏到 30 京电子伏的能幅进行 γ 射线巡天、探测宇宙高能漫辐射、研究高能天体的特征谱线, 并发现 γ 线偶现源。它携带定向闪烁分光仪、成象康普顿望远镜、高能 γ 射线望远镜以及 8 个爆发源和偶现源检测仪共 4 组设备, 其中高能 γ 射线望远镜的最佳定位精度可达 5 角分。GRO 总重 150

从强子相到夸克胶子等离子体相的转变, 体系必须具有足够的自由度。一般的估计是, 核子数密度必须大于 30, 其次还要求体系达到足够高的温度和足够大的密度。这就是为什么选

择极端相对论性核碰撞作为研究夸克胶子等离子体的场所的原因。目前世界上有 CERN、BNL 和 FNAL 等主要实验室投入相当大的人力物力进行以 O、S、Si 和 P 打击 Au、Ag、U 和 W 等靶的实验, 从事以探寻夸克胶子等离子体为目的的研究。

由于夸克胶子等离子体的高温高密特性, 其存在时间十分短暂, 一般的估计约为 5—10 fm/c, 因此实验上探测到的并非夸克胶子等离子体本身, 而是它留下的痕迹。基于各种模型, 人们建议了一些夸克胶子等离子体形成的信号, 并进行了相应的实验探测。

1. 光子和轻子对的直接产生

夸克胶子等离子体中可以直接产生光子和轻子对, 由于不受强作用影响, 它们在产生之后就立即飞离体系, 因此可以反映夸克胶子等离子体各个演化阶段的特征。这种直接产生是热力学产生, 它与别的产生机制如 Drell-Yan 过程有很大的差别, 所以光子和轻子对的直接产生可以作为解除禁闭相变的一个信号。NA34 和 WA80 实验组观察到了多余光子的产生, 但由于本度复杂, 还不能作出肯定的结论。

2. 大横能量密度的出现

夸克胶子等离子体的高温高密特性在强子化时反映为 $\frac{d^2N}{dy}$ 和 $\frac{dn}{dy}$ 都很大。CERN 的 NA 34、NA 35、WA 80 和 EM 实验组以及 BNL 的 E 802 实验组却进行了这类实验。根据 CERN 的束流能量为 200 GeV/N 的硫打击钨靶实验还推算出碰撞过程中能量密度达到了理论上估计的夸克胶子等离子体形成条件。但是仍然不能肯定已经形成了夸克胶子等离子体, 因

吨, 乃是迄今最重的科学卫星。第一批观测对象计有蟹状星云、船帆高能源、天鹅 X-1、天鹅 X-3、塞弗特星系 NGC 4151 等。从 1991 年 7 月开始转向第二批观测对象, 它们是银河系中心、大麦哲伦云超新星 1987A 等。已探测到来自天鹅 X-3 的 10^{12} 电子伏和超新星 1987A 的 10^{13} 电子伏的高能辐射, 还在 7 月中下旬, 在低能区检测到银心方向的湮灭谱线辐射。

我们仅从空间天文探测器大发展的 1989—1991 年的这一角度, 纵观天文学和天体物理学的全局, 即可预期 20 世纪的最后 10 年必然又是天文学的一个新的黄金时代。

为有不少理论家指出,诸如 mini-jet 一类的普通背景也可能掩盖夸克胶子等离子体形成引起的末态横动量增加。

3. 奇异粒子相对产额的增加

由于夸克胶子等离子体温度极高, 奇异夸克质量大的效应减弱, 同时已有大量 u 、 d 夸克存在, Pauli 原理限制了 $u\bar{u}$ 和 $d\bar{d}$ 的产生, 因此夸克胶子等离子体中有相当数量的 $s\bar{s}$ 激发。一个直接的后果是, 由于夸克胶子等离子体的形成, 末态粒子中奇异粒子相对产额明显提高。实验上较易探测的奇异粒子是 K^+ , BNL 的 E802 实验组测得²⁸Si打 Au 靶实验中 K^+/π^+ 比为 $(24.5 \pm 5)\%$, 比核子打击 Au 靶的实验结果的简单外推有很大提高。但是, 末态粒子的次级碰撞, 如 $\pi^+\pi^- \rightleftharpoons K^+K^-$, 也能造成 K^+/π^+ 比的提高, 而这些次级效应的扣除还没有可靠的方法, 因此我们也不能凭末态中 K^+/π^+ 比升高而肯定夸克胶子等离子体的形成。

4. J/ψ 产额压低

高能核核碰撞中, J/ψ 粒子主要通过硬过程产生。而在夸克胶子等离子体中, 很难产生这样的硬过程。即使产生出了 J/ψ 粒子, 由于等离子体的 Debye 屏蔽, 也有可能被夸克胶子等离子体所溶解。因此, J/ψ 产额可以作为夸克胶子等离子体产生的一个信号。目前实验上观测到了这一信号, 但给出的物理解释仍比较混乱, 甚至于相互矛盾。

5. 介子发射区域的增大

由于玻色子服从玻色统计, 可以通过末态介子的非相干发射推断出发射区域的大小。 π 干涉学的实验结果表明, 快度中化区的发射源确有膨胀。但要肯定夸克胶子等离子体已经形成仍有很多困难。

总的说来, 理论预言通过极端相对论性核核碰撞实现夸克胶子等离子体, 实验上也达到了其产生的条件。对于理论建议的上述五个主要的信号, 实验上都已观察到, 但没有一个能做出肯定的结论。这是因为, 对于夸克胶子等离子体, 目前还缺乏真正可靠的理论预言, 同时由于研究对象的复杂, 现有的实验手段也跟不上。我们相信, 随着 BNL 实验室的 RHIC 的建成投入运转, 人们对于夸克胶子等离子体的认识必将达到一个更高的水平。(八)

去年 10 月 18 日, 中科院数学研究所研究员陆启铿先生来到理论物理所, 应邀主讲第十二次理论物理所专题讲座。报告题目是《物理对数学的影响》。

陆先生首先介绍了 1990 年 7 月在日本京都召开的第 21 届国际数学家大会上宣布的四个 Fields 奖获得者: E. Witten, V. F. R. Jones, В. Г. Дринфельд和 Mori。其中 E. Witten 是个物理学家, 而前三个获奖者的工作均与数学物理有关。这可以说是 Fields

史无前例的数学界的大事, E. Witten 则是自 Einstein 以来第一个获得数学方面大奖的物理学家。

陆先生回顾说, 历史上数学应如何发展, 一直存在两种不同意见。1887 年国际数学家第一次大会上第一个报告人 Poincaré 认为, 数学离开了物理就会走入歧途, 物理不仅迫使我们面临大量的数学问题, “而且能使我们朝梦想不到的方向前进”; 另一个数学大师 Hilbert 却有不同看法, 他认为数学的发展主要是由于数学自身产生的问题。不过 Hilbert 并不排斥物理与数学的联系, 正是他推荐 Einstein 获得了数学大奖; 而 Poincaré 对纯粹数学的发展也有广泛的贡献, 他本人就被公认为拓扑学的鼻祖。然而 20 世纪 20 年代以后, 数学的发展与物理渐渐远离, 物理学家与数学家之间缺乏共同的语言, “逐渐落入互不理解的境地”。

尽管当代数学大师 Atiyah (英皇家学会会长) 几乎在每一篇报告中都提到 Witten 工作对数学的重要性, 但 Witten 发表的几乎每篇文章都有人指出其中有毛病或不严格。所以 Witten 获得 Fields 奖是有争议的。“这个奖事实上是用来和坚固的传统决裂的, 过去 Fields 奖总是鼓励那些用严密证明的定理作为支柱的十全十美的作品, ……他描绘的比他可以证明的更多, 并且满足于向人们显示这些隐藏着的(或者那些可能会是的)奇迹”(见 M. Hindry “1990 年的 Fields”)。

有很多著名数学家(包括 Atiyah)从事于把 Witten 的工作严格化, 由此可见物理的思想对数学产生的影响。Witten 对数学的思路并不遵循数学的规范, 而是从物理的角度去洞察数学, 这是专门从事数学的人意想不到的。

陆先生指出, 现代物理对现代数学的影响并不始于 Witten, 而是从二十多年前的规范场理论开始。Abel 规范场早在 1918 年由 H. Weyl 提出, 非 Abel 规范场也早在 1954 年由杨振宁-Mills 提出来。在数学上, 规范场的杨-Mills 方程的研究把数学引导到一个新的途径, Donaldson 得出的 \mathbb{R}^4 有不同的微分结构这一令人惊奇的结果, 就是对数学的一次冲击。Itoh 在 1983 年发现了代数曲面上的反对称自对偶模空间有 Kähler 结构, 这与 Mumford 提出的稳定向量丛概念联系起来, 发展为 Einstein-Hermitian 向量丛的模空间研究等等。近日数学受物理的影响尚不止这些。

最后, 陆先生还提到, 起源于 1966 年杨振宁求解一个多费米子的系统和 1972 年 Baxter 研究格点模型的 Yang-Baxter 方程最初没有立刻得到重视, 直到发现这个理论与 Hopf 代数的关系之后, 才形成近年来才有的新数学分枝量子群的迅速发展, Дринфельд的获奖工作即与此有关。(九)