

最大和最小的和谐统一

——夸克-胶子等离子体

叶云秀

(中国科学技术大学物理系,合肥 230026)

物质除固态、液态和气态外,还有第四态叫等离子体。通常所说的等离子体是电-等离子体。我们这里要介绍的夸克-胶子等离子体,是不同于电-等离子体的。理论上,夸克和胶子存在于强子物质中,在强子内部,它们几乎是自由的。实验上,虽说有迹象表明它们的存在,但是至今尚未在大于强子的尺度上见到夸克和胶子。如果在大于强子的尺度上,夸克和胶子自由地存在,而在整体上它们又是色中性的,那么这样一团粘乎乎的东西就称之为夸克-胶子等离子体。

为什么要研究夸克-胶子等离子体?它们可能存在于何处?用什么手段来人为地产生和研究它们?它们将有什么样的性质和行为?这就是我们要介绍的。

一、为什么要研究夸克-胶子等离子体?

天体物理学家、宇宙物理学家孜孜不倦地研究宇宙的起源及演化。他们的研究结果,确信宇宙的起源来自一团炽热的火球的爆炸——大爆炸。在大爆炸的早期,即大爆炸后约 10^{-6} 秒以前,宇宙间充满着夸克和轻子;大爆炸后 10^{-6} 秒伊始,这些夸克和轻子开始构成强子;约 3 分钟后强子合成原子核,轻元素开始出现;约三百万年后,星系开始形成; 1.5×10^{10} 年后,宇宙始变成现在这个样子。

如果能产生出大爆炸后约 10^{-6} 秒之内的物质态,并研究它的性质、它的状态方程、它的演化过程……,那就可能为宇宙的起源和演化提供佐证,也可以说我们回到了差不多 1.5×10^{10} 年以前。

粒子物理中有两个谜:破缺的对称性和看不见的夸克。我们知道,当今描述自然界的四类相互作用的理论是:描述强相互作用的量子色动力学(QCD);描述电-弱相互作用的 $SU(2) \otimes U(1)$ 模型理论;描述引

线宽,则频域光存储潜在能力仍难发挥。最近日本京都大学的 Hiraio 等人成功地将 Sm^{2+} 掺杂在氟钨酸盐玻璃中,由于玻璃基质的无定形特性,使 ${}^3D_0 \rightarrow {}^7F_0$ 的非均匀线宽达到 $71cm^{-1}$, 这比 $BaFCl_2Br_{1-x}Sm^{2+}$ 体系的非均匀线宽进一步增大,并在 140K 获得了孔宽为 $10cm^{-1}$ (4.7 \AA) 的光谱孔,当在室温下用 230mW 的强光照射 900s 后也观察到了光谱孔的生成,但孔宽已达 $25cm^{-1}$ (11.8 \AA)。最近他们进一步改进基质材料的结构和组成,在硼酸玻璃基质中,在室温下获得了孔宽为 $8cm^{-1}$ (3.8 \AA) 的较窄的光谱孔,它的 ${}^3D_0 \leftarrow {}^7F_0$ 。

力相互作用的广义相对论。它们在描述现实世界的自然规律中获得了巨大的成功。但是,在这些应用中,需要 17 个独立的参数,如质量,而且不知道它们的出处。所以说目前的理论大厦是不够完善的。这个问题从理论框架本身无法得到解决。于是人们猜想,这些独立参数可能隐藏在理论上未解决的两个谜中。

a. 破缺的对称性

现在的理论都是基于对称性基础上的,可是不少对称量子却不守恒。它应该对应于一个新类型的基本力,即对应于对称性破缺的力。对于这个力,理论界认为它确实存在,可知道得甚少。

通常我们认为,物理规律仍然是对称的,它由系统的拉氏函数决定;而当物质所处基态的物理真空不对称时,整个系统的对称性就发生破缺。现代量子场论认为,真空不是空无一物,而是量子场的基态。量子场之间的相互作用,包括自作用,决定量子场最低状态。

由此可知,这个谜与物理真空的结构有关。通过研究真空的对称性,可以进一步研究物理世界的对称性;物理真空的激发也许导致希格斯一类粒子的发现;同时,由于在理论框架中粒子的质量破坏了这些对称性,所以对对称性破缺的了解将导致对粒子质量起源的了解。

b. 看不见的夸克

我们知道所有强子都是由夸克组成的,但从未见道过单个的夸克的存在。与磁体相比,到目前为止,也还没有见到过磁单极子。一种可能性是:磁单极子本身就是人类虚构的物体,因此永远看不到;另一种可能是:它是一个真实的物体,但是它的质量极其重,在我们现在所能达到的能量范围内还无法产生和发现它。

的非均匀线宽为 $96cm^{-1}$ (45.4 \AA), 故该材料的烧孔多重度可达 24, 这可以说是当今室温烧孔多重度最高的体系。该体系的特点是 $4f^{67}F_0 - 4f^{5d}$ 跃迁谱带可同 $4f^{67}D_0 - {}^7F_0$ 。烧孔谱带很好地分离,保证了在室温下获得较窄的光谱孔,但很高的烧孔功率($600mW/mm^2$)和颇长的烧孔时间(900s)却是应进一步改进的。这一新的结果已引起光盘制造商的关注。很显然,在这种无定形基质中若能进一步增大 Sm^{2+} 的吸收谱线的非均匀线宽,并减少光谱孔宽,将会为光谱烧孔材料的实用化带来更光明的前景。(参考文献略)

至于夸克,我们相信它是真实物体,而且有相对低的质量(除 top 夸克外)。它们的质量范围分别如下: d 夸克: 5—15 MeV; u 夸克: 2—8 MeV; s 夸克: 100—300 MeV; c 夸克: 1.3—1.7 GeV; b 夸克: 4.7—5.3 GeV; top 夸克 > 91 GeV。并且,在能量很高并在很小的范围内时,它们的相互作用很小,成为渐近自由夸克。既然如此,为什么我们还没有看到自由夸克呢?这就是真正的谜。

从实验上知道,所有轻子都作为自由粒子存在($e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 以及它们的反粒子),而作为基本组成成分处于同等地位的夸克,不仅不是作为自由粒子存在,而且迄今为止把夸克从其他物质中分离出来的任何尝试都没有成功。

那么这两个谜是独立无关,还是相关的呢?是在同一个方向上还是在完全不同的方向上去研究它们呢?

我们知道,最感兴趣的物理问题是:对称性破缺的作用力,真空的结构和夸克的解禁。传统的想法是:我们的世界是粒子的世界,较大的单元由较小的单元构成。为了寻找最小的建筑单元,导致我们在越来越小的尺度上($< 1\text{fm}$)去探讨物理现象,使用的能量越来越高。但是,对称性破缺和夸克囚禁这两个谜在越来越高的能量上的长期研究也没有得以解决,它迫使我们面对更深刻的问题,即真空可能是一个物理介质,可能这两个谜都与这个物理真空有关。一方面,破缺的对称性可能是由物理真空的不对称引起的;另一方面,认为色场相互作用的长程部分,是靠真空极化而作用于夸克上以约束夸克在整体上是色中性的系统内(强子内),或认为 QCD 真空是胶子和夸克-反夸克对的冷凝物。因此,对这两个问题的研究都将与物理真空及真空的激发相关。

这两个谜的解决,正如李政道博士提出的,具有世纪性的地位。我们知道,上个世纪末给本世纪留下了物理上的两个谜,一是无绝对惯性系(包括时-空);一是波-粒二重性。前者成了本世纪初的爱因斯坦相对论的基础;对后者的研究、发展和解决,构成了量子力学。这两个谜在本世纪的解决,对科学和技术的发展起了巨大的作用。现代科学和技术的发展无不与此物理上的进展相关,核与粒子物理,核能,原子、分子物理,激光, X 射线技术,半导体,超导,计算机,凝聚态物理,量子光学,量子化学,……。

从目前的实验手段来看,很可能本世纪末的物理上的两个谜要留待下世纪去解决了。这两个谜的解决将给 21 世纪科学和技术的发展带来什么样的飞跃?

二、到哪里去寻找问题的解?

最小和最大的“亲缘”关系。

人类对自然界的研究恰好与宇宙的演化倒着走。因为宏观的东西最直观,因此,不论是亚里士多德,还

是阿基米德;不论是伽利略,还是开普勒,还是牛顿;无不是从看得见、摸得着的宏观现象的研究开始。首先,开普勒等人对特大宏观的天体研究卓有成效。然后人类逐步涉及到光、电、原子、原子核以及强子物质的研究。由于轻子或在自然界中自然存在,或可在物质相互作用中产生,人们已给予相当的研究。唯独夸克,连同携带强相互作用的胶子,理论上虽确认它们存在,却无从对它们的特性进行直接的研究。从粒子物理的观点来看,它们与轻子一起,是组成物质的基本单元:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

再加上传递相互作用的玻色子 γ, w^\pm, z^0 和 g 。这可以说在当今认识的范围内,是最微观的东西了。这些微观客体却与最宏观的、有限无界的宇宙、天体同属一“家”。宇宙的最初的 10^{-6} 秒内充满夸克和轻子物质。自然界真奇妙,最大的与最小的竟有如此亲密的“亲缘”关系。

要研究这些物质,到哪里去寻找呢?我们不可能重睹宇宙大爆炸的壮观景象,除非到离我们一亿光年以远的宇宙中去研究,因为那里可能是大爆炸后膨胀出去的原始物质。据估算,中子星心部的核物质密度超过正常核物质密度的 5 倍左右,因此那里可能存在着夸克、胶子较为自由的物质状态。

如果在实验室里能制造出小的“宇宙大爆炸”,它对我们的研究将有怎样的作用?用什么方式能够制造出这种小型大爆炸呢?

现在已经知道,在实验室模拟宇宙大爆炸的唯一途径是利用相对论(即很高能量的)重离子碰撞。因为能量高,碰撞时能形成高温;因为重离子是由许多核子组成,相撞时许多高能核子同时参与相互作用,因此在较大的区域上造成高温、高能量密度。我们用图 1 来形象地说明这一小的“大爆炸”的效果。图 1(a)是两高能重离子撞击造成我们的最小“宇宙”,它可以把我们带回到 10^{17} 年以前的状态,然后再跟踪它顺时的演化。同时,在这两重离子碰撞之前,在离子之间的真空是通常的物理真空;当重离子的能量足够高时,碰撞后几乎所有的重子都在朝前和朝后的区域(在质心系中看)。中心区在短时间内基本上是无重子的,但是它却是一个比物理真空的能量密度高得多的区域,因此该中心区是研究真空激发的理想区域,如图 1(b)所示。同时认为这时物质的有效质量为零,手征对称性得以恢复。这时的夸克、胶子已在较大的尺度上存在,即形成了夸克-胶子等离子体。图 1(c)示出了从核到核子到夸克-胶子等离子体的图象,也就是高温/和高密度下重离子中的核子(强子)的组成成分——夸克得以解禁,连同携带强相互作用的胶子一起在较大范围内自由存在。我们称这样的过程为强子到夸克-胶

子等离子体的相变。

那么这种相变是否确实存在？理论计算如何？实验结果是否有证据？

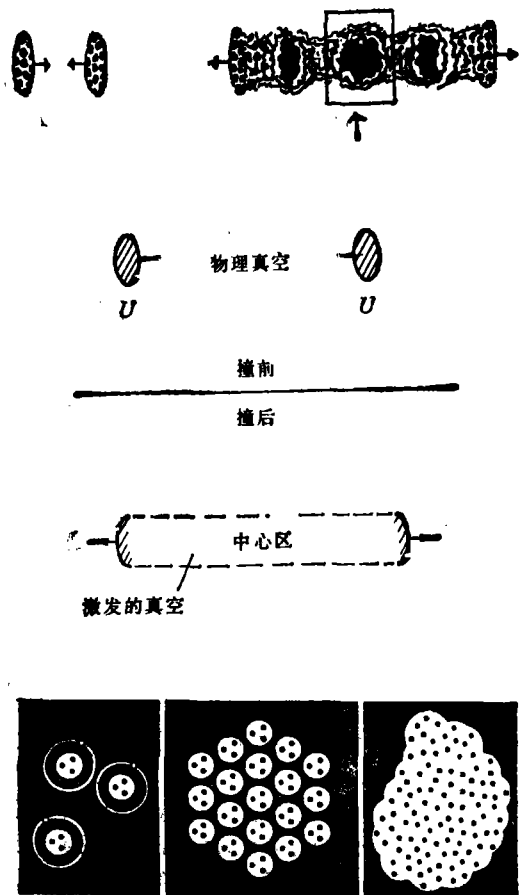


图 1 (a) 我们的最小宇宙。(b) 激发的真空。
(c) 夸克-胶子等离子体的形成

三、相变的条件

1. 理论计算

我们介绍两种直观而容易理解的估算方法；精确的计算过于复杂，将只介绍其结论。

a) 由核物质密度与强子物质密度之差估算达到相变所需的能量。

因为我们知道在强子范围内，夸克是自由的，强子具有某种能量密度。在核物质内，强子之外的尺度上不存在自由的夸克，该核物质也具有一定的能量密度。如果能把核物质的能量密度提高到强子的能量密度，那么夸克应该在该整个核上自由存在。

我们来估算它们之间的能量密度之差有多大。重(强)子数为 A 的正常核的平均半径为 $r_A = 1.2 \times A^{1/3} \text{ fm}$ ，平均能量密度为

$$\epsilon_A \approx m_A / \frac{4}{3} \pi r_A^3 = 130 \text{ MeV/fm}^3$$

核子的半径为 $r_N = 0.8 \text{ fm}$ ，它的平均能量密度为

$$\epsilon_N = m_N / \frac{4}{3} \pi r_N^3 = 440 \text{ MeV/fm}^3$$

$\epsilon_N - \epsilon_A \approx 300 \text{ MeV/fm}^3$ 。即核物质的能量密度提高 300 MeV 左右，相变就能实施。或者用半径之比说明， $(1.2/0.8)^3 = 3.375$ ，即核密度提高 4 倍左右，相变也能实施。

b) 从袋模型看夸克解禁

设想通常核物质在极限情况下为理想的 π 气体，对于理想 π 气有直线 (A)，

$$P_\pi = 3 \times \pi^2 / 90 \cdot T^4 = 1/3 \cdot T^4$$

这里 P_π 为压强， T 为温度。强子袋内的理想的夸克-胶子等离子体 (QGP) 有直线 (B)，

$$P_Q = \left[2 \times 8 + \frac{7}{8} \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 \right]$$

$$\cdot 1/90 \cdot \pi^2 \cdot T^4 = 4T^4$$

两者压强与温度的关系如图 2 所示。但是，强子袋有个袋压强 B ，因此 QGP 的压强与温度的关系就成为了直线 (c)。它与直线 (A) 有一交点，这一交点对应的温度为相变的临界温度 T_c ，即相变温度下， π 气的压强与袋内 QGP 压强平衡， $P_\pi = P_Q - B$ 。最后得知 $T_c = 0.72 B^{1/4}$ 。由理论计算得知 $B^{1/4} \approx 200 \text{ MeV}$ 。由此可知 $T_c = 140 \text{ MeV}$ ，在此温度下相变可能实施。

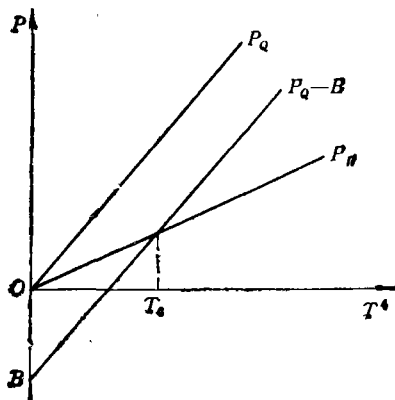


图 2 理想的 π 气和 QGP 的压强与温度的关系

c) 由格点规范理论计算得出的相变条件

以上的计算只是一种估算。对于相变的条件(相变临界温度或核密度的临界值)的精确计算是采用格点规范理论。

简单地说，它的出发点是量子色动力学。QCD 理论在解决小尺度(强子范围，小于 1 fm)上的夸克物质运动规律时是用微扰展开来具体研究的，它取得了很大的成功。但是要在较大的尺度上 ($> 1 \text{ fm}$) 运用

QCD, 就不能用微扰论, 而在连续空间上解 QCD 方程又是不可能的。可设法在空间和时间上取一些很小间隔的点, 在这些点上硬是解 QCD 方程。从纯规范场(纯胶子场)计算开始, 放入静止的夸克-反夸克对; 放入运动的夸克; 加入温度参量, 图 3 是其中的一种计算结果: 在纯规范场中加入了静止夸克及温度参量, 用 $SU(3)$ 理论计算的两个量: w 和 $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$ 。 w 是一个表征夸克能否自由存在的量, 它随温度的增加在某个温度时从零跃变到一定值。零表示自由夸克不可能存在; 一定常数值, 则表示能找到自由夸克的一定几率。 $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$ 是表征规范粒子质量的一个量, 它随温度而变, 从某一定值到趋于零, 表示质量在某一定温度下开始消失, 从而手征对称性得以恢复。从图 3 可以看到, 这两种相变的临界温度几乎是相同的。同时, 图中的曲线有很陡的跃变, 我们称它为第一级相变。相变的临界温度在 200 MeV 左右; 或者当密度为正常核物质密度的 5 倍左右时, 相变也可能发生。

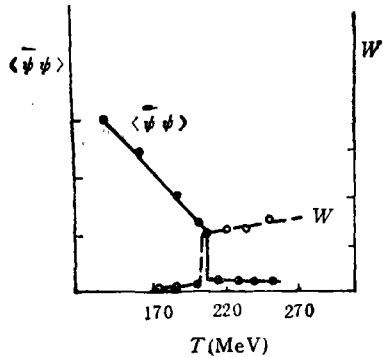


图 3 用 $SU(3)$ - 格点规范理论计算的相变

2. 实验尝试

1986 年以前的有关实验都很难称为相对论重离子实验, 有的实验如 CERN 的 $P-P$ 、 $\alpha-\alpha$ 实验, 费米实验室的 $P-P$ 碰撞, 能量虽然很高, 但碰撞粒子太轻, 因此积聚能量密度的范围太小; 有的实验如 LBL 的 Bavalac 上每核子 1.8 GeV 的 Kr 束打靶的实验, 虽粒子够重, 但能量太低, 因此碰撞区能达到的温度太低; 还有的实验统计性太差, 虽然能量够高, 粒子也够重, 但事例数太少, 如宇宙射线实验。

1986 年, CERN 的 SPS 加速器上开始了每核子 60 GeV 和 200 GeV 的氧束流打重靶的实验, 布鲁克海文的 AGS 上用每核子 15 GeV 的氧束、硅束打重靶的实验; 1987 年 CERN 的 SPS 又开始了每核子 200 GeV 的硫束流打重靶的实验。

重离子碰撞实验有它固有的复杂性。一个碰撞事例中往往产生 500 个以上的次级粒子。实验上 E_{\perp} 称为横能量, 它的大小是表征能量密度积累的多少。也可以测量反应中产生的次级粒子的多重数分布, 从而

得到能量密度的信息。在当今的相对论重离子实验条件下, 得到的能量密度大致为 1.6 到 $3.3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$; 而正常核物质的能量密度约为 $0.15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 。

对撞区的温度有多高。通过测量一个称之为横质量 m_{\perp} 的量可以得到温度值。横质量 m_{\perp} 定义为 $m_{\perp} = \sqrt{P_{\perp}^2 + m^2}$ (GeV)。例如对某种质量为 m 的粒子, 测得它们相应的横向动量 P_{\perp} , 则得到 m_{\perp} , 而 m_{\perp} 与温度 T 有以下关系:

$$\frac{1}{P_{\perp} \cdot m_{\perp}} \frac{d\sigma}{dP_{\perp}} \propto e^{-m_{\perp}/T}$$

画出截面 $d\sigma/dP_{\perp}$ 与 P_{\perp} 的关系曲线, 由此得出温度值。在当今的实验条件下, 得到温度 T 为 200 MeV 左右。这个温度在相变临界温度 T_c 附近。物理学家成功地处理了这类复杂的事例, 并且还在继续处理这类实验数据。经过大量的、复杂的数据处理, 对相对论重离子碰撞物理积累了大量的信息, 如:

相撞区形成的一团火球的体积有多大? 通常用火球中发射的 π 粒子的相干得到。采用的方法是天体物理学中测量星球大小常用的 HBT 相干法。在目前相对论重离子实验的条件下, 测得的火球大小用半径来表示大致如下: 横向半径 R_T 约为 4.3—8.1 fm; 径向半径 R_L 约为 2.6—5.6 fm。

相撞区积累的能量密度有多高? 通常是用安装在相撞区下游的量能器来测量的。在量能器的相对于束流方向的不同角度 θ_i 上测得其能量 ε_i , 然后按一定的法则相加: $E_{\perp} = \sum_i \varepsilon_i \sin \theta_i$

同时, 通过对一些特征信号的测量来估计夸克-胶子等离子体是否形成, 如:

a) J/ψ 粒子产额的抑制。这是相对于 $P-P$ 碰撞中 J/ψ 的产额而言的。我们知道 $P-P$ 碰撞不可能形成 QGP。在 $P-P$ 碰撞中 J/ψ ($C\bar{C}$) 的产生截面是可计算的, 在实验中是可测量的。但是, 在相对论重核碰撞中, 如果 QGP 形成, 而且 QGP 的寿命长于 $C\bar{C}$ 形成 J/ψ 的时间的话, 由于 QGP 中的色屏蔽而阻止 J/ψ 的形成, 这时就显示出 J/ψ 粒子的产额的减少, 由此可知 QGP 形成。就目前相对论重核碰撞的实验而言, 数据分析的结果表明存在着 J/ψ 产额抑制的迹象。

b) 奇异性产生的增强。同样的道理, 在 $P-P$ 碰撞中, 奇异性夸克对 $s\bar{s}$ 的产生截面是可以计算的, 也是可以测量的。如果在相对论重离子碰撞中 QGP 形成, 假定最初是 u, d 夸克。那么由于费米能随物质密度的增加而增加。由于 QGP 在能(高物质)密度时形成, 当 $\rho = 10\rho_0$ 时 (ρ_0 为普通核物质密度), 费米能量 $E_F = 450 \text{ MeV}$, 它大于或相当于 $s\bar{s}$ 的质量, 所以 $s\bar{s}$ 被产生出来, 并几乎等于 $u\bar{u}$ 或 $d\bar{d}$ 的数量。因此在 QGP 时 $s\bar{s}$ 大大增强, 最后以末态粒子 K, Λ 等



“超硬”材料及其研究现状

朱 政

由于生产、生活中常要进行切、割、钻、削等各种加工,人们总是在不断寻找更硬的材料来制作加工工具,要说当今世界上最硬的材料,谁都会说是金刚石。金刚石在莫氏硬度表上占首位,其硬度值为 10。金刚石不仅硬度高,在室温下还具有良好的导热率。在它工作时,工作面上所产生的热能迅速散发,因而金刚石可在多种加工(如切削、研磨、抛光等)上供人选用。另外,金刚石可透过可见光和红外线,能经受离子辐射作用,还能抵御酸和氧化物的化学腐蚀。不过在 700℃

粒子的形式出现。

在目前的实验条件下,测量到的 K^0 , A^0 等带奇异夸克的粒子相对于 $P-P$ 碰撞时的产生有明显的增强。但是要下结论说 QGP 形式还需谨慎,因为还需从理论计算上排除一些其他因素。

c) 直接光子辐射。对直接从 QGP 辐射的光子的测量是很有意义的。因为它们从 QGP 辐射出来的整个过程中仅仅经历电弱相互作用,这意味着它们将携带等离子体的整个空-时历史。在直接辐射光子的测量中,强的本底是由 π^0 和 η 衰变来的光子。通过对两两 γ 建立不变质量谱的研究,可以重建 π^0 和 η , 从而从总 γ 谱中减去 π^0 和 η 的本底,得到纯直接 γ 谱。目前的实验数据分析结果还很难下断语。

四、未来的实验

理论计算和初步实验尝试的结果大大地激发了物理学家的兴趣和热情。正是由于理论计算给出了相变存在的可能性,也由于实验物理学家成功地处理了如此复杂的反应事例,所以用相对论重离子碰撞来产生和研究夸克-胶子等离子体已成为物理界的热点之一。虽然不管是理论上还是实验上,还有许多工作要做,还有大量的课题需要研究,但这些课题本身,连同它们的最终目标都一样具有重大的意义,从而激发了许多物理学家的浓厚兴趣。正因为这样,美国的布鲁克海文实验室正在建造能量更高,能加速更重离子的相对论重离子对撞机——RHIC; 而西欧核子中心也正着手建造 $P-P$ 和相对论重离子交替运行的对撞机——LHC。

在 RHIC 上加速的离子类型从 $A = 1$ (质子)到

时,它会在空气中燃烧变成二氧化碳,所以金刚石一般不用于切削钢铁。

地球上的天然金刚石极稀少。由于它经过凿磨加工后能使入射光折射、色散,故它被大量地用作豪华装饰品,所以它很昂贵。

我们能不能通过人工方法造出一种比金刚石更硬,性能比金刚石更好的材料来呢?最近已有材料科学家报告说,他们有可能研制出一种“超硬”物质。这种新材料一旦问世,将使莫氏硬度表展览,可替代珍贵的金刚石而得到广泛的应用。

事实上,研制比金刚石更硬的材料已进行多年了。

$A = 200$ (金-Au); 对于 $A = 200$ 的束流,每束能量将达 100 GeV/A; 对于 $A = 1$ 的束流,每束能量将达 250 GeV。计划 1997 年开始运行和实验。

在 LHC 上,加速铅 (Pb) 离子,束流能量每束可达 6 TeV/A。2000 年左右开始运行和实验。

我们可以把宇宙早期的物质态、我们已实验的能量区 (SPS, AGS) 的物质态以及未来实验 (RHIC, LHC) 试验的物质态与天体中的中子星等在同一张相图上表示出来,如图 4 所示。

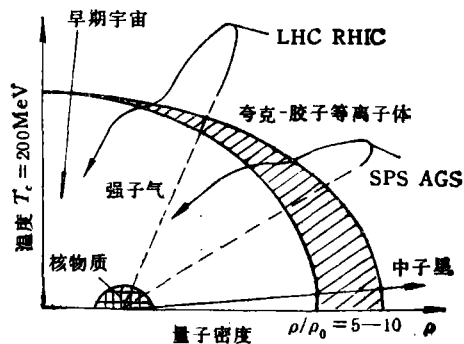


图 4 自然界中最小和最大统一的相图

如果我们果真能制造出夸克-胶子等离子体,并对它们的性质、运动状态、演化过程等都能加以研究并给出清晰、明确的结果,那么不仅解决了本世纪物理中的两大谜,证明了宇宙大爆炸理论,而且真正把最小的和最大的统一在一起了。