

# 从原子弹小爆炸到宇宙大爆炸

宇宙大爆炸理论认为，二、三百亿年前，我们的宇宙开始于一次激烈的大爆炸。在宇宙大爆炸之初，密度极大、温度极高，我们现在熟知的任何物质形态，在那时都不存在，那时只有原初的粒子。随着宇宙的演化，逐渐形成原子，星系，恒星，行星，生物直至人类。宇宙中氦元素丰度的观测值，均匀各向同性宇宙微波背景辐射的发现，都和宇宙大爆炸理论预言相符合。有没有什么直接的办法验证极早期宇宙中发生的一些现象呢？几年前这是不可设想的，但是随着科学技术的迅速发展，不久将来可能会在原子核的尺度上创造出在宇宙大爆炸之初曾存在过的那类物质，用原子核的小爆炸来直接验证宇宙的大爆炸。

在我们这个时代，原子核对于我们来说并不陌生，在中学课本我们就知道了每个原子中心有一个重的原子核，它是由中子和质子组成的。原子核裂变放出巨大能量，原子核反应堆用来发电，原子核放射性同位素正广泛应用于农业、医学。但是原子核是一种与我们日常生活中所熟悉的任何东西都是完全不同的物质。如果我们能够把原子核集合成一起构成一种核物质，它的密度极高，几滴核物质就可重达一百万吨，目前，我们只知道中子星内部可以达到这样高的密度。核物质的物理性质也可以用类似其他物质形态那样进行描述。我们特别感兴趣的是核物质对温度、密度及压强变化的反应。对于普通物质，例如水，我们可以通过简单实验求得其状态方程，即描述物质对于温度、压强和密度变化的反应的方程。在一个大气压下，随着温度变化，水将经历一系列我们熟知的相变：在摄氏零度以下时，水结成固体的冰，从零度至100度时是液体水，高于100度，变成蒸汽，在更高的温度，1000度以上，水分子发生分解，变成一种由带电离子和电子组成的等离子体。

科学家们认为，核物质中也可能存在类似的物相，在通常情况下，即处于基态的原子核类似于一颗液滴。在高温下，原子核受到加热，出现核物质的蒸汽相。这时，原子核中核子的运动速度足够快，可以克服起结合作用的核力。也就是说核物质发生了沸腾。据推测，当密度很高而温度相对来说较低时，可能存在一种有序结构的核物质，类似于固态晶体。如果核物质进一步压缩或加热，核子就可能会被摧毁，从而出现一种核物质的等离子态，即变成组成核子的夸克和胶子这样一些组元粒子。

## 重离子加速器

我们可以推测，核物质有这样一些复杂的相变。但迄今为止尚无实验方法可以产生这种变化。正常态的原子核好象一颗液滴，如果水只能在常温及常压下进行研究，对冰和蒸汽我们就会一无所知，因此，我们必须想办法改变原子核的温度和压力，相对论性重离子加速器可以起这种作用。

类似于高能物理研究中常用的加速器，相对论性重离子加速器是同步回旋加速器。但它不是对质子或电子之类的粒子进行加速，而是对失去绝大部分核外电子的原子进行加速，产生离子束，近似可以看作对原子核进行加速。

重离子加速器的能力取决于它能把原子核加到多高的速度（平均每个核子具有多大能量）以及它能加速多重的原子核。例如，苏联杜布纳联合原子核研究所的同步稳相加速器能够将氖离子（原子量为20）加速到每个核子四十亿电子伏的能量，对应的氖离子速度为光速的98%。美国加利福尼亚大学劳伦斯伯克利实验室的“贝伐拉克”加速器，可将铀离子（原子量为238）加速到二十亿电子伏的能量。

这类被加速的原子核与静止的靶核间可以实现高速碰撞。这种碰撞是相对论性的，因为发生碰撞的原子核以近于光速的速度运动，所以这种情况下，相对论效应变得十分重要。只有通过这种碰撞，才能把核物质的密度压缩到其通常值的好几倍，并将其温度提高到超过 $10^{12}$ 度，这就相当于宇宙大爆炸后不到百万分之一秒时间内的状况。功率更强大的加速器可能会在原子核尺度上创造出宇宙大爆炸之初，更早时刻的状况。这样就有可能用相对论性重核间的高速碰撞来直接验证极早期宇宙的理论。

## 原子核高能碰撞实验

这种高能碰撞实验原理上很简单，但是真正做起来可不容易，即使运用了相对论性重离子束，也不可能通过象对其他形式的物质那样，通过周密而精心控制的实验来对核物质的相变图象进行研究。两个原子核的高能碰撞是根本无法控制的。原子核相互碰撞时，发生激烈的相互作用，从而使密度增加，温度上升，压强也随之变大。没有任何实验工具能直接测量这些量。并且，高密度态的寿命是极短的；碰撞在一起的原

子核大约在  $10^{-22}$  秒内就会爆炸，碎片向四面八方飞散。这些碎片可以通过布置在碰撞区域周围的探测仪器检测到。根据检测到的这些碎片分布，再反推出原子核碰撞时的全部信息，由此可知，对探测仪器的要求很高。现在使用的一种“塑料球”谱仪，总共由 815 个检测单元组成，把这些检测单元装配起来后，几乎是一个完整的球面。检测单元包括一块薄薄的氟化钙晶体和塑料块。当原子核碰撞时所产生的带有电荷的碎片飞散时，就穿过氟化钙晶体，并在塑料中停下来，并使这两种材料都发光。根据氟化钙的位置可确定碎片的运动方向，根据两次闪光时间可以确定碎片的能量与质量。这种复杂的探测系统，甚至在碰撞时产生几百个碎片的情况下，也能测出所有碎片的分布，从而再现出碰撞的情况，因而通过它我们能够对高温及高压下核物质的本性获得非常清楚的了解。

### 一些实验结果

在一次实验中，原子量为 12 的碳核被加速到每个核子 7 千万电子伏的能量，然后与原子量为 108 的银核碰撞，碰撞后，原子核发生分解，抛射出 16 个带电的核碎片，这些碎片包括 4 个氘核，7 个氦核，3 个锂核和 2 个铍核。它们可以看作是核液体在沸腾时所蒸发出来的粒子。

另外一个实验，把氩核加速到每个核子十八亿电子伏能量，与静止的铅核碰撞，在这种高能碰撞下，两个核（总共有 248 个核子）完全分解了。飞散出的碎片主要是单个核子及三三两两核子的簇射。特别值得注意的是，从碰撞点飞出的碎片中有 130 多个带电基本粒子，而原先两个核加在一起总共才有 100 个质子，这些多余的电荷从哪里来呢？这是因为这种碰撞过程非常猛烈，不是简单把两个原子核打散，而是足以产生出 30 多个新的带电粒子，主要是带正、负电荷的  $\pi$  介子。

还有些实验是利用高能的核与恒同的靶核相碰撞，例如利用原子量为 40 的钙-钙碰撞，原子量为 93 的铌-铌碰撞，入射核的每个核子为四亿电子伏的能量。

### 理论解释

如何解释这类碰撞事例呢？当两个重原子核以近于光速的速度相碰时，究竟会发生什么样的物理过程呢？最可靠的方法是根据量子场论原理来计算碰撞产物，但这样做是不现实的。目前，只能依靠模型。现在有两种模型，在第一种模型中，原子核被当作液滴一样的东西，用流体动力学方程来对两颗这样的液滴的碰撞进行描述，核物质被看作是一种理想的连续流体。第二种模型称之为级联模型，这种模型认为原子核中的每一个核子，在没有和其它核子碰撞时，自由地作直线运动，两个原子核的碰撞就象装着弹子球的两个袋子相撞，碰撞的结果是通过用计算机模拟核子的运动

路径而确定。

当两个核碰撞，第一阶段是两个原子核部分互相渗透，形成一个椭圆形的高密度区域，随着碰撞过程的继续进行，更多的核物质进入了压缩区域，直到所有核子都进入一个比原来原子核还小的区域内，形成高密度的核物质。由于压缩在一起的核物质，温度升高，压力增大，很快开始膨胀，继而形成分崩离析的爆炸。上述两种模型的差别表现在碰撞反应的以后各个阶段。按照级联模型的观点，绝大部分抛射出来的碎块，沿着“向前”的方向，则平行于入射离子束的方向。相反，在流体动力学模型中，两个核互相挡住了对方，形成高压，出射的碎片主要在侧面上，形成所谓“侧溅”事件。

在解释高能核碰撞中，还遇到一个复杂的情况，由于对原子核的相互碰撞，我们无法加以控制，有些事件是对头碰撞，两个核对头相撞，所有质量都压缩成“火球”（高密度区域），产生强烈的冲击波，形成明显的侧溅现象。有些事件是非中心碰撞，两个核擦边而过，在碰撞时，靶核和入射核不重叠部分，仍然是相当冷的“旁观者”，按各自原先的速度运动，只有重叠部分形成“火球”，这种擦边碰撞，不产生冲击波，抛出的碎片数量也比较少，没有明显的侧溅现象。

因此，为了从实验上来判断，哪一种模型更符合实际情况，最好是选取碰撞后，抛射碎片最多的那些事件（对头碰撞）。实验结果表明，钙核与钙核的碰撞中没有检测出侧向峰，而铌核与铌核的碰撞中发现了明确的侧射。看来，对于较重核的对头碰撞，流体动力学模型更加适用。

更为有趣的是，加速到每个核子为 8 亿电子伏左右的氩核与铅核的中心碰撞，出射碎块的分布既不是侧溅，也不是向前，几乎是各向同性的，这种结果再次与流体动力学模型相一致。这是因为这两种核大小不同，在中心碰撞中，入射的氩核，整个被更大的铅核吞没，使之突然停止。因为动能是完全沉积在靶核内部，结果导致复合系统几乎各向同性膨胀，因此爆炸后出射碎块的分布几乎是各向同性的。

综上所述，在这样一些实验中，似乎的确有可能压缩核物质，在高温下似乎表明了核物质的沸腾状态。如果能把核物质密度压缩到正常密度的三倍左右，那么理论预言， $\pi$  介子能够与核子结合成一种与固态晶体相类似的点阵结构，质子和中子在点阵中交错排列。在更高能量的重离子束碰撞中，还有可能产生由夸克-胶子组成的核物质等离子体相。在实验室重现宇宙最初才能存在的物质状态，高能重离子实验是我们唯一可能的办法。尽管这样一些核物质奇异相的产生仍然是遥远的，但是新的贝伐加速器的结果是在这个正确方向迈出的重要的一步，我们隐约看到了用原子核小爆炸来验证宇宙大爆炸的前景。

（李泽清编译）