

核 沸 腾 吗？

David R. Dean

摘要：当两个原子核碰撞时，出现许多小碎片。一种猜测而得的结论是“热”的核物质达到沸腾的程度，并且崩裂成许多“微滴”。

水沸腾，石蜡在高温高压下变成金刚石，许多金属和合金在低温下失去电阻变成超导体。上述所有情况都是在某些很好确定的条件下，物质的物理性质剧烈改变：物理学家把这种改变叫做相变。当两个原子核高能碰撞时，它们产生许多碎片（图1，略）。这种类型的事件称为“多重碎裂”反应，它出现在一个宽的能量范围，并且在轻核间和重核间的碰撞中都是如此。此外尽管碰撞是高能，但出现的碎片能量都比较低。这个核的多重碎裂过程，也象液体沸腾时那样发生相变吗？

乍一看来，在水沸腾和核碰撞之间的联系似乎是微乎其微的。但是理论和实验都证实，碎片是由“加热后”的一即受激的核系统的“沸腾”产生的。这就激励了下述可能性：研究这些反应或许可以更好地理解在温度和密度上远离实验正常提供的那些系统。但是，在对此进一步讨论之前，我先描述更为常见的相变特色。

尽管在上世纪就详细研究了相变，但精确的理论描述却是在比较最近才可以得到的。1873年Johannes van der Waals在他的博士论文中进行了最早的理论研究之一，他对气体的液化感兴趣。最简单的流体理论假定，流体粒子之间的相互作用弱得可以忽略不计，也称为理想气体行为。但是 van der Waals用简单的方法处理这个相互作用，他导出了著名的状态方程，把流体系统的压强、温度和密度联系起来。对于所有气体，van der Waals方程都具有图2所示的形式。

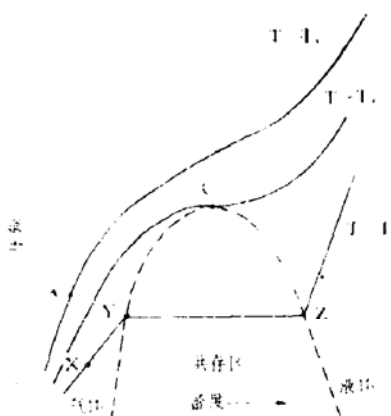


图2. Johannes van der Waals 导出的“状态方程”，它表明流体的压强、密度和温度 T 的联系。实线是等温线。存在临界温度 T_c ，此时由气体到液体不变化。

为了弄清这个图的含意，设想温度保持常数但压强（因此还有密度）变化的实验。由 X 点出发，随着压强增加密度也开始增加，这是预料到的。但是，在某一点压强增加很小时密度增加很大，并且系统很快地从 Y 移动至 Z。这相当于转变到液态——凝聚，并且进一步增加压强液体就会受到压缩。

现在假定从 A 点出发，这相当于较高的温度。这种情况下密度没有突然变化，随着压强增加气体只不过变得越来越密集。在高于 T_c 的所有温度的情况下都存在这种行为， T_c 也称为临界温度，而压强-密度图上的 C 点是著名的临界点。对于水该点在温度 374°C 、压强 218 大气压和密度 $325\text{kg}/\text{m}^3$ 处。

许多年来一些物质被认为永远是气态的，因为不管怎样的压强，它们都不能液

化。按照 van der Waals 论文的观点这就变得清楚了：在温度高于临界温度时，不可能液化。举个例子，这意味着为了液化氢气，该气体必须首先冷却至低于 -240°C 的温度。

在图 2 中虚线限定的范围内，气相和液相一起共存，这个混合物即能看作在气体中有液体微滴，又能看作在液体中有气体气泡。对于图中气体和液体共存区域内的点，有可能计算具体尺寸譬如说 N 中微滴（或气泡）的数目。在临界点本身，这个数目正比于 $1/N^{\tau}$ 。van der Waals 理论给出 $\tau = 7/3$ ，而更精确的方法给出 $\tau = 2.21$ ，这与实验是一致的。

在一些多重碎裂反应中质量为 A 的碎片的产额粗略地随 $1/A^{\tau}$ 变化，而 τ 在 2 和 3 之间。这个发现使核物理学家受到鼓舞。在性质不同的两种情况下 τ 值的明显类似启示我们，核反应中存在由液体到气体的相变。

但是为什么一开始就猜想：原子核的行为能够与普通的微观流体类似？从什么被称为是核物质的研究中可知，这个猜想是合理的。

尽管核的一些性质已用涉及单个核子（质子或中子）运动的理论很好地描述过了，但是考虑完全虚构的“核物质”这另一极端在理论上常常是有用的。“核物质”由巨大数目的核子组成（这种物质状态也能够用于描述中子星）。当然，真实的核介于上述两个极端之间，这种情况成了核物理学家对“少体”量子系统理论进行检测的基础。

依据核子-核子相互作用的真实形式推导出核物质的状态方程，在某种意义上完全类似于依据分子间相互作用建造气体的状态方程。图 3 给出了一个典型的例子，这个结果十分明显地类似于 van der Waals 状态方程（图 2）。这种类似性并非完全出乎意料，分子力和核力两者都有短程排斥和长程吸引部分。因此，核物质类似于流体也有临界点：对于典型的核子-核子相互作用，临界温

度和临界密度分别是约 20MeV 和 0.08 核子/ fm^3 。在日常单位中这个密度很不寻常是 $1.3 \times 10^{17}\text{kg}/\text{m}^3$ ，但它只是普通核的一半。（ 1MeV 的“温度”相当于约 $1.2 \times 10^{10}\text{K}$ 。）

核物质临界点的存在是极有力的证据：在适当的条件下，将会有核“液体”和核“气体”之间的转变。至于这样的条件在实验中是否可能，那是另一个问题。只是在 T_c 本身碎片产额才会随 $1/A^{\tau}$ 变化，但是 20MeV 这个区间的温度在核碰撞中能够达到吗？

考虑以 90% 光速飞行的质子和 Xe 原子核间的碰撞。如果全部质子的动能超过 1200MeV ，并且都转换成激发能，那末温度将约为 9MeV ，这是由于能量事实上在整个系统中分配。已经实验使用动能高于上述数值 100 倍的质子，这样似乎至少可能在实验室达到类似于 T_c 的温度。

那么，在高速质子-核或核-核碰撞中期望些什么呢？上述想法假定全部或部分的炮弹入射能量沉积在靶核中，形成了一个热的粘乎乎核物质团（图 4，略）。然后膨胀、冷却并且事实上变成不稳定的，它沸腾同时生成小的“微滴”聚集，最后观测到一个稳定的核。这个过程类似下述情况。设想大量的水在压强 2 大气压和温度 105°C 之下。因为在这个压强时沸点比通常数值约高 $10-20^{\circ}\text{C}$ ，所以它仍是流体。之后设想压强缓慢下降，这个流体冷却。最后水沸腾，而在沸腾时，它由各种大小的流体微滴和蒸汽气泡组成。在这两种情况下，如果初始温度远大于 T_c 就不存在相变，并且最终系统由占优势的自由中子或变稀薄的水蒸汽组成，这是合理的。

图 5 把高能质子打 Xe 核得到的一些实验结果与相变模型进行了比较。这个实验是在美国的费米国立加速器实验室由印第安那 Purdue 大学的一个物理学家小组完成的。相变曲线与数据定性符合， τ 的最好拟合值是 2.64。但是图 4 中图解说明的情况在实验上确实存在吗？

这个描写是很有吸引力的，因为核物质

显示相变的理论根据是无可辩驳的，看来实验上温度有可能达到相同的数量级。另外，正如图 5 说明的，不同核的实验产额与微观流体系统的预期符合。但是对于相变处理核碰撞的方法有四个很重要的批评。

第一，实验数据与图中的平滑曲线的偏离是值得注意的。无论是对核的电荷，还是对核物质的概念对很轻的核并不真实这一事实，这个分析都没有进行修正。轻核中的结合能从一个核子到另一个核子时明显变化，在较低能量时这就必然影响碎片产额。只不过在核变重时这个结合能涨落消失，正如图 5 所示产额随 A 平滑地变化。很可能考虑上述效应能够改善与数据的符合。

第二，只要相变出现在临界点本身，即是说图 3 中的 Z 点和 C 点重合，那末对于无限系统产额表现为类似于 $1/A^r$ 。似乎稍微感到意外的是，许多不同的实验差不多都精确地“击中”临界点。

第三，基本结果是只有无限系统呈现“尖锐的”相变，在有限系统的情况下，气液两相共存区域的边界线变成“模糊的”。换句话说，图 2 中等温线 XYZ 的斜率不大于在 Y 点和 Z 点的突然变化。这个效应在微观流体系统中完全可以忽略不计，这是因为尽管系统是有限系统，粒子数目仍然非常大，典型值为 10^{22} 。但是，对于真实的核这个效应是很重要的，因为它们是由不多于 100 个的核子组成的。因此有限大小引起的效应将起着重要的、甚至可能是支配的作用。这个“模

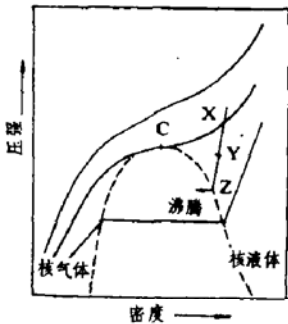


图3. 核物质的状态方程。“气体”指自由核子，“液体”指复合核。

糊性”也似乎“涂掉了”临界点从而造成这一事实。我前面已经说过，在反应过程期间许

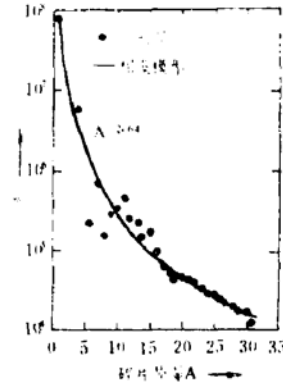


图5. 高能质子和 Xe 核碰撞的有关数据,并与相变模型进行了比较。

多系统都靠近临界点经过。

最后一个也是最严重的一个对相变模型的批评是，它使用了平衡中系统的热力学。仅当系统在远大于单个核子-核子碰撞间的时间时膨胀，才是正确的。如果不是这种情况，炮弹带的能量不能在核子间分配、从而在系统分离前不能给出均一的温度。估计膨胀时间在 10^{-22} 秒的范围，这与核子-核子碰撞间的时间相差不是太大，这就是说平衡问题依然尚未解决。

仅当系统在体积等方面的变化无限缓慢时，大体上这个系统在处于平衡之中。对于膨胀或压缩情况下的这个变化的速度而言，更为实际的判断依据是：较之组成部分粒子的平均速度，边界壁运动应极其缓慢。因此壁的运动容易与粒子取得“联系”。在普通温度下气体分子的运动速度约为 500 米/秒，这样如果没有平衡系统就受到扰动，体积能够相当快地改变。但是在核系统的情况下，典型的膨胀速度约为 5—10% 的光速，此时仅比核子平均速度小 3 倍。这意味着热平衡是否能够保持都是不一定的，更不用说在一开始就实现了。

但是如果相变在核碰撞时并不存在，还有什么其它机制能够描述观测到的大量产额呢？如果没有足够的时间完成热平衡，可以推测碰撞实质上是“冷”过程(图6)。在“冷碎

裂”模型中，炮弹核穿过靶“钻了一个洞”，同时形成了一个“参加者”核子的局部热区，即有名的“火球”。之后，这些高能核子进入冷

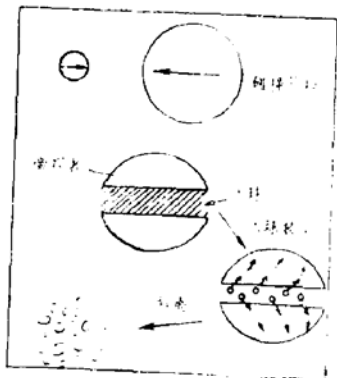


图6. 碎裂能够是一个“冷”过程，来自中心区的核子把冷的外面的部分解离。

的“旁观者”部分，由于碰撞的结果引起它们解离。具有许多碎片的最终结果与相变模型定性类似。因为这两个模型包含着完全不同的物理内容，它们的预期在定量上出现一些不同。可惜的是，现在可以得到的实验数据与这两个模型都不是不能相容的，因此必须等待更详细的数据才能解决这个“热与冷”的问题。

现在设想质量为 A 的核能够表示为一个三维格栅，它有 A 个格点并排列成简单的立体样式。每个格点都可看作是一个核子，它有六个最靠近的邻居和六个连接键。这个想法在图 7 (此图略) 中图解说明，图解的是“二维核”的情况，此时有四个连接键。之后这些键以几率 P 崩裂。在键崩裂过程中格栅的若干部分能够清楚地与格栅其余部分完全隔离开，这些部分我们称为“碎片”。因此我们能够计算某些尺寸的碎片的数目和评价碎片一尺寸分布。通常所有这些计算我们都用计算机进行。

在低 P 时 (在某种意义上与较低能量有联系)，产生了一些单个“核子”和很少的双核子块，但是绝大多数格子实质上仍然是单个的。在较高的 P (较高能量) 时，重碎片

不能长期“稳定”只观测到轻“核”。

图 8 示出了 Xe 类格栅 (132 个格子部位) 在 $P = 0.58$ 时的质量产额，并与图 5 的相同情况时的数据进行了比较。立刻就会看出：在格栅模型的结果和数据之间的一致，正好和相变模型的结果同样好。

因此这就表明：相同的一组数据能够用三种不同的模型解释。相变概念是最基本的，但也是相当有吸引力的。从另一方面看，冷碎裂过程是更普通的，就核物理学的关心来说，它基于稍微稳固的基础。但是，格栅模型计算表明：用最少的物理假定就能重演数据，这意味着查明多重碎裂反应的真实的物理性质是困难的。这是相当使人失望的结论，因为我们曾希望这些类型的反应或许能够探查核的奇异状态。

那么，存在相变吗？存在热平衡吗？最

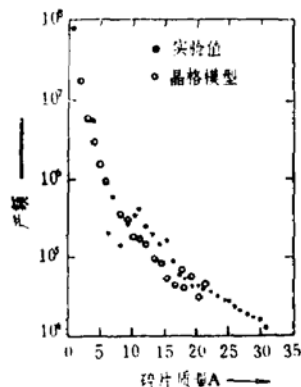


图8. 三维格栅计算的结果，并与图5的 P -Xe 数据进行了比较。

近的实验数据只是反映了纯统计效应吗？这些问题都至今尚未解决；迄今为止所做的只不过是更广泛的数据，把多重碎裂过程的机制理解得清楚些而已。核沸腾吗？如果条件具备，答案只能是理应如此。但是这些条件是否确实能够存在和实验产生，却是一个完全没有解决的问题。

(颜家骏摘译自 New Scientist 21 February 1985)