

宇宙演化与热寂说

俞允强[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 在已成熟的宇宙演化理论的基础上,文章作者重新讨论了 Clausius 提出的热寂问题.宇宙演化指其组分和宏观面貌的变化.主要是微观结团和宏观结团.从物理原理上讲,这些结团过程是力学的,而不是热力学的.力学过程一定程度上破坏了原有的热平衡,热力学则倾向于恢复热平衡.所有已知的物理规律,包括热力学在内,都在宇宙演化中起着它应起的作用.作为后果,宇宙的熵在演化中一直是增加的.克劳修斯把热力学第二定律用于宇宙是正确的.可是他认为宇宙的熵会极大化并不正确.这是因为在演化过程中会出现组分粒子的退耦.

关键词 宇宙演化,热寂说

The evolution of the universe and the issue of heat death

YU Yun-Qiang[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The issue of heat death is reanalysed on the basis of the standard model of cosmology. The evolution of the universe consists of both microscopic and macroscopic clustering processes. From the point of view of physics, these clustering processes are mainly dynamical rather than thermodynamical. The dynamical process may destroy the thermodynamical equilibrium, while thermodynamics tends to retrieve the equilibrium. All the well known laws of physics play their roles during evolution. As a result, the entropy of the universe is always increasing. In this sense Clausius is right. But the heat death of the universe, as predicted by Clausius, will not be reached, since some component particles will be decoupled during the evolution.

Keywords evolution of the universe, heat death

Clausius 在建立热力学时(19 世纪中期)做过一个大胆的推断:宇宙的熵将趋于极大化(即所谓热寂说).此后,宇宙会不会“热寂”成了一个不断有争议,可是却始终没有共识的话题.今天看来,造成这局面的原因很明朗.要把热力学应用于宇宙,不管想论证 Clausius 的推断是对或不对,那无论如何是离不开对宇宙演化过程的认识的.可是那个年代的物理学家们对宇宙的演化尚一无所知.离开对宇宙的具体认识,自然就无法说清热力学对宇宙是否适用.人们无法取得共识也就不意外了.今天宇宙演化理论已发展得相当成熟.本文的目的是利用已被明确认识了演化历史,重新来讨论热力学对宇宙是否适用,以及 Clausius 的判断是否成立的问题.这样的讨论将会加深我们对

热力学的理解和对宇宙演化的认识.

1 回溯宇宙的演化过程

让我们先回顾一下宇宙学中已被观测充分肯定了的结果.

关于宇宙的基本的观测事实是:它可近似地用膨胀中的均匀介质来描绘.由动力学理论推知,这介质自甚早期至今始终在膨胀,因此越早期的宇宙有越高的平均密度.在年龄小于 10^6 年时,宇宙平均密度比星系的密度更高.那时的宇宙中不可能有星系

2011-02-27 收到

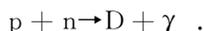
[†] Email: yqyu@water.pku.edu.cn

及星系团等天体. 它只是高温高密度的均匀气体. 今天宇宙的很复杂的面貌是演化的产物. 宇宙学理论的要点是, 用物理规律来阐明今天实际看到的、有层次结构的宇宙是如何演化产生的.

宇宙的演化并没有一个确切的“起点”. 为了利用可靠的宇宙学结果, 让我们把宇宙年龄为 1s 时作为讨论的起点. 宇宙理论告诉我们, 那时它的温度约是 1MeV (即 10^{10} K), 密度约是 10^6 g/cm³. 由微波背景观测推知, 那时气体的确是相当均匀的. 气体的组分主要是正反电子、正反中微子和光子, 以及少量的强子(质子和中子). 测量表明, 强子的数密度仅为光子的 10^{-9} . 这些情况将是我们讨论宇宙演化的出发点.

随着宇宙的膨胀, 它的温度和密度都逐渐降低. 动力学计算告诉我们, 早期宇宙的年龄要增大两个量级, 温度要降低一个量级. 膨胀不仅给宇宙带来这样的量变, 它的微观组分和宏观形态也会有质的变化. 这就是所谓演化.

从宇宙年龄为 1s 时开始说起, 演化的第一步是原子核的形成. 它实质上是气体组分粒子的微观结团过程. 宇宙气体中的质子和中子会通过热碰撞而结合成氦核, 并放出光子:



在当时的条件下, 逆过程(即氘的光分裂)也同样能发生, 且正过程和逆过程会达到统计平衡. 在温度为 1MeV 时, 氘在统计平衡下所占的百分比尚非常低. 通常认为那时还没有原子核的形成. 温度随宇宙膨胀而降低, 统计平衡下氘占的比例随之升高. 计算表明, 到宇宙年龄为几分钟时, 温度约降到 10keV 的量级, 氘的比例开始不能忽视. 这被认为是原初核合成开始的标志. 随着氘含量的增大, 紧接着会有后续连锁核反应. 这一系列反应的主要产物是氦核. 此外还产生了微量的锂、铍、硼. 这时期不能制造出碳、氮、氧或更重的元素. 那些核都是后来由恒星制造的. 由于当时气体中质子比中子多(约 7:1), 在核合成耗尽所有中子后还剩下不少质子. 它们就是后来的氢核. 这过程约持续 1 小时. 到温度低至 1keV 以下时, 热核反应不能再进行, 原初核合成阶段就结束了. 最后氢核的质量百分比约占 3/4, 氦核约占 1/4.

经过这段演化, 宇宙气体的组分发生了质变. 主要是从粒子气体转化成了电离的原子气体(等离子气体). 宇宙演化中有两个同时期发生的变化值得注意: 一是因温度已低于 0.5MeV, 原来与光子几乎一样多的正负电子已经成对地湮灭, 剩下的负电子就

是后来等离子气体中的自由电子. 为让气体保持电中性, 它与光子的数密度比与强子一样, 也是 10^{-9} ; 二是原来的正反中微子依然存在, 论质量百分比, 它们依然是气体的主要组分. 但是在核合成开始前不久, 它们已与其他粒子失去了碰撞机会(即退耦). 这件事与我们讨论的问题也有关, 下面还会谈到. 原初核合成阶段结束后, 宇宙气体成了等离子气体, 其组分粒子的下一步变化是中性原子的形成. 它又是一个组分粒子的微观结团过程.

当宇宙气体中含有原子核和自由电子后, 它们会通过碰撞结合成中性原子. 为简单起见, 这里只讨论氢(它占的比例最大). 相应的反应过程是:



当温度高于 1eV 时, 逆反应也同样在大量地进行着. 在正过程和逆过程的统计平衡下, 中性氢所占的比例是随温度连续变化的. 温度越高, 中性氢原子就越少. 容易估计出, 到宇宙年龄为几万年时, 温度降到了 1eV(即 10^4 K)以下, 中性氢占的比例开始不可忽视. 人们(随意地)定义中性氢占 90% 为原子复合的标志. 理论上算出, 那时宇宙年龄约为 10^5 年, 温度约是 0.4eV. 这时宇宙完成了又一次组分粒子的结团, 即原子的“复合”. 在这次结团过后, 宇宙介质转变成由中性原子组成的普通意义下的气体. 值得指出的是, 中性原子形成后, 光子失去了碰撞对象, 它也退耦了. 退耦后的光子就是现今大家熟知的背景辐射. 已退耦的中微子和光子将在宇宙中永远存在下去, 但是它们对宇宙演化的影响已很次要了.

此后发生的主要演化过程就是中性气体的引力结团. 结团的物理机理是自引力不稳定性. 均匀的中性气体中有密度的微小起伏. 其中密度偏高的区域有更大的引力来吸引周围的气体, 从而使它的密度更偏高. 引力效应造成了一种正反馈, 它将导致气体的宏观结团. 由于宇宙膨胀对引力结团的快慢起着阻尼作用, 这过程实际进行得很慢. 大体说来, 到宇宙年龄为 10 亿年后, 宇宙中才出现了星系、星系团和超团. 恒星形成则是星系内部的细节过程. 于是, 宇宙才呈现出了今天被大家熟知的、有层次结构的面貌. 这方面的理论相当复杂, 但现在已发展得相当成熟. 本文的兴趣不在这过程本身, 而在结团过程中熵的变化.

从以上这简单的定性分析中可以看出, 从宇宙年龄为 1s 到今天(年龄为 140 亿年), 由高温、均匀的热平衡宇宙演化到今天观测到的有层次结构的宇宙, 其间所发生的演化主要是物质的微观结团和宏

观结团.下面主要论证,在这两种结团中宇宙的熵都是增加的.

2 微观结团中的熵增加

从今天粒子物理的可靠的认识(标准模型)看,甚早期宇宙的高温气体应主要由夸克、轻子和它们的反粒子组成.第一次微观结团是夸克结成强子.通常叫夸克-强子相变.它应发生在宇宙温度为 10^3GeV (即 10^{16}K)左右.此后宇宙中才有了今天实验室中能观测到的强子,即质子、中子和介子等800多种强作用粒子.因为这个相变过程没有留下可判定性的遗迹,所以至今研究得并不透彻.本文将不涉及它,而只讨论原初核合成和原子复合过程.这两种过程中都有熵增加,而且机理是类似的.

微观和宏观力学都告诉我们,当粒子结成束缚态时,它必有结合能放出.质子和中子结合成氘核,每次放出的结合能是 2.2MeV .由电离氢转化为中性氢,每次放出的能量是 13.6eV .前者来自强作用能,后者则来自电磁能.至此为止,过程是力学的,反应释放的能量主要表现为所放出的光子的动能.这意味着结团后的气体中会出现一部分非热光子.由于频繁的碰撞,接着发生的是将这部分非热光子的动能转化为周围气体的热能,即把那些非热光子热化,以使宇宙保持热平衡状态.按照热力学第二定律,后一步注定是熵的增加过程.概括地说,组分粒子的微观结团是机械能(相互作用能)自发地转化为热能的过程.这种过程必然有熵增加,那正是热力学第二定律的体现.

这里值得指出一个容易出现的误解.早期宇宙中微观结团的发生,会使宇宙气体的组分粒子向着复杂和多样化的方向前进一大步.随后才有复杂分子和有机分子的形成,宇宙才会有今天的面貌.然而人们常误以为符合热力学的过程就应使系统“简单化”.于是就推想:可能由于某种原因,使热力学对宇宙演化不适用,宇宙才会越演化越复杂.其实这是错误的推想.上面的分析告诉我们,结团主要是一个力学过程,而不是热力学过程.这过程在一定程度上破坏了原有的热平衡,而后热力学规律的作用是恢复热平衡.整个过程是在已知物理规律(包括热力学)支配下井然有序地实现的.这里不存在也不会出现使热力学不成立的因素.

最后补充讨论一下熵增加的大小问题.现在观测已确切表明,今天光子的数密度是每立方厘米

400个,而重子(主要是质子)数密度约为每立方米不到半个,正如上面已提到,后者要少9个量级.这是观测事实,但它是怎么造成的?这是宇宙演化理论中一个重要的未解决的问题.作为事实,它告诉我们,当高温宇宙中正反物质都大量存在时,必定由于某种物理机理,造成了正反重子在数量上有微小的差别.正重子比反重子约多 10^{-9} 个.当宇宙温度降到 1GeV 以下时,正反重子将成对湮灭.这时,只有不成对而多出的正重子才能存活下来.于是造成了此后重子数比光子数少9个量级的事实.本文的兴趣不在讨论有关的机理,而是想说明,这个事实使得微观结团过程中产生的熵在量值上相对地很微小.

以原初核合成为例来讨论.它发生时的热光子温度约是 10keV ,核合成所放出的非热光子的能量为 MeV 量级.后者比前者约高2个量级.注意到核合成放出的光子数比原有的热光子要少9个量级.因此所放出的总能比光子总能少7个量级.这样,核反应放出的光子在热化时所增加的熵相应也很少.这样的讨论对原子的复合过程也适用.这也就是说,当宇宙演化中有微观结团发生时,由于所放出的结合能最后会被热化,因此,宇宙的演化实质上是熵的增加过程;可是实际研究时常作为近似,把熵的变化忽略掉了.

3 引力结团造成熵增加的简单例子

在宇宙年龄到 10^5 年后,中性原子气体成了宇宙介质的主要组分.从质量百分比讲是这样,从演化情节来讲也是这样.此后,中性原子气体的引力结团(即星系的形成)是演化的主要情节.我们的兴趣依然是讨论这过程中熵的变化.

人们常会觉得气体的结团是空间分布上的有序化,因而是熵减少的过程.其实这是错觉.在没有长程力作用的情况下,空间不同位置在物理上是没有区别的,因而均匀分布是最可几的.若出现结团分布,则意味着熵的减少.当有长程力(如引力)存在时,子系统处于不同位置的几率是不同的,因而均匀分布不再是最可几的状态.相反,某种符合力学平衡和热平衡的结团状分布才是最可几的.宇宙的宏观结团正是引力作用的结果.让我们先用一个简单的例子来讨论它.

设想把一大盒均匀等温气体放入地球的重力场中.在这样的情形下,分子(子系统)将参与两种运动:重力场中的力学运动和热碰撞.重力倾向于让气

体向地面沉淀,热碰撞则使气体偏离沉淀.众所周知,两种运动的综合效果使气体的分布服从 Boltzmann 分布.它才是重力场中的最可几分布,原来的均匀分布不再是最可几分布.假设气体最后依然达到等温状态,我们对此气体状态进行计算,结果表面,从均匀分布过渡到 Boltzmann 分布,其温度和熵都有所升高.

这结果也可以从能量的角度来理解.在这个变化过程中,系统的引力位能是降低的,即分子倾向于往位能低的地方跑.所释放的引力位能转化成了气体分子的动能.碰撞会使这部分动能热化.而动能热化必有熵的增加,这正是热力学第二定律的体现.从这个简单的例子可以看到,当有引力作用时,气体从均匀走向结团依然是熵增加过程,而不是熵减少.不能把它看成气体从无序走向了有序.或者说,宏观结团使宇宙结构进一步复杂化,但它没有也不会破坏热力学的熵不减原理.

从统计物理的眼光看,热力学第二定律所揭示的是:当子系统间有足够多的碰撞时,它们在相空间的分布必将趋向于最可几的分布,即趋向于熵极大化的分布.而要实现这一点,大量碰撞是关键因素.值得强调的是,子系统之间若没有大量碰撞发生,分布将不会最可几化,熵也不会极大化.这道理后面还会涉及到.

4 宇宙结构形成是熵增加过程

宇宙结构的形成同上面的简单例子一样,它也是引力造成的气体宏观结团.可是今天的已结团宇宙并没有重新达到热平衡.而演化的终局还并不清楚.这样,我们也就无法用比较初态和终态的方法来论证熵的增加,而必须讨论结团的过程.这项工作难度较大.另一个困难来自引力理论.影响宇宙膨胀和结团的引力须用广义相对论来描写,而在广义相对论中,引力位能的概念不存在,能量是否守恒也是一个未解决的问题.为此,我们只能做近似的定性讨论,目的是想说明引力结团也是一个熵增加过程.当然这种论证的力度也会弱得多.

结构形成理论是把宇宙看成是有微小密度起伏的均匀气体,并用广义相对论做全局性的处理.自引力不稳定性会导致星系形成已经是没有争议了.这不是我们现在的兴趣所在.考虑到构成一个星系的那部分气体的线性尺度远小于宇宙的特征尺度,因此牛顿力学(包括牛顿引力)可以近似地作为讨论一

个星系形成的基础.这是我们能做的事.

按照牛顿引力理论,星系结团必然带来引力位能的降低.与上面的简单例子一样,结团过程中所释放的位能先转化为收缩的机械动能,而后通过热碰撞再转化为热能.结团气体温度的升高,引起它对外辐射.辐射消耗的是热能,它间接地消耗着引力位能.总而言之,扣除辐射的消耗,引力位能的主要部分转化成了热能.按照热力学,这种自发转化是不可逆的,熵是增加的.这正是我们想说的结果.顺便说一下,在星系级的气体团块形成后,其内部的密度起伏还会因为引力不稳定性而产生恒星.按同样道理,这一过程仍然是熵的增加过程.这样我们也就不严密地论证了宇宙中宏观结团(即星系或恒星的形成)过程也是熵增加的.其理由同样因为它是机械能自发地转化为热能的过程.

5 关于宇宙的终局

上面几节说明,宇宙演化主要表现为组分粒子的变化(微观结团)和结构的变化(宏观结团),而这两种变化都是熵增加的.那么能不能说 Clausius 有关宇宙的熵将最终极大化的判断对了呢?这问题的答案很明确——不是这样.

熵的极大化就是分布的最可几化,它依靠的是大量的热碰撞.应该引起注意的是,宇宙中某些组分会失去碰撞的机会.这些组分就是退耦后的粒子.

宇宙气体要在膨胀中保持热平衡,必须有足够大的碰撞率(单位时间内的碰撞次数).把 $dR/dt/R$ 叫宇宙膨胀率($R(t)$ 是宇宙膨胀尺度因子).估算表面,当某组分在膨胀中能保持热平衡时,其碰撞率必须远大于宇宙膨胀率(大若干量级).可是,这两种速率都是随时间而降低的,于是形成了一种竞争.若碰撞率降低得更快,则会有一个时刻,某种粒子的碰撞率会降到与膨胀率接近相等.估算表明,这意味着它从这时开始到无穷远的将来约还有 1 次碰撞机会.也就是说,这种粒子此后实际上已失去了碰撞机会.理论上称这种粒子退耦了.上面已提到,今天宇宙中存在有退耦的中微子和退耦的光子.用中微子的碰撞截面算出,它是在宇宙年龄约为 1s 时退耦的.用光子与自由电子的碰撞截面算出,光子是在原子复合后不久退耦的(年龄为 10^5 年).退耦后的光子气体就是通常讲的背景辐射.原初核合成发生在中微子退耦之后.上面已讲到,核合成放出的结合能将转化为气体的热能,从而升高宇宙的温度.但是已退耦

的中微子就没有可能分享了. 光子退耦比较晚, 它得到了这份热能, 所以它的温度比中微子气体要高一些. 这情况一直持续到今天. 今天的观测表明, 背景辐射的温度是 2.7K, 背景中微子的理论温度约不到 2K(尚未观测到). 这差别就是中微子退耦较早造成的. 因为今天这两种组分都已不参与碰撞, 它们的温度差别将无法消除. 这是一个很好的例子, 说明宇宙的将来已不能达到统一的热平衡, 即熵的极大化状态是达不到的.

让我们简单概括一下 Clausius 的判断与宇宙的事实不相符的原因. Clausius 默然认为, 热碰撞永远存在, 非热平衡状态总会过渡到热平衡状态. 实际上宇宙将来的温度和密度都非常低. 它主要的组分粒子都会退耦, 即没有碰撞. 失去了碰撞, 宇宙的熵将不会趋于极大化.

最后谈一下宇宙的终态会是什么样子的. 这是一个非常不清楚而又没有人研究的问题. 原因在于不确定因素很多. 让我们试着讨论其中的一个方面: 质子会或不会衰变. 这是粒子物理未解决的问题, 而它对宇宙的终局却有着决定性的影响. 观测已表明, 质子的寿命在 10^{32} 年以上. 如果到某一天宇宙中的质子衰变了, 那么一切化学元素都将瓦解. 没有了质子, 原来以固态存在的死亡了的恒星(白矮星和中子星)多半也不能继续存在. 质子衰变产生的正电子可能会与负电子相碰而湮灭(能否相碰不知道). 于是宇宙组分将只剩下中微子和光子, 可能还有退耦了的冷暗物质粒子. 这样的终局与质子不会衰变所演化出来的终局是大相庭径的. 若要等观测来回答“实际宇宙属于哪一类”这样的问题, 那是 10^{32} 年以后的事, 人类等不到. 这大概是宇宙演化只研究过去而不研究将来的原因.

6 结束语

本文开始时已指出, Clausius 提出的热寂说是一个长期有争议而没有共识的话题. 上面是用宇宙理论的成果来讨论这热力学问题, 因而其结果应当是确切的. 让我们概括一下本文得到的两个主要结果.

在从甚早期至今天的演化中, 宇宙介质的质变主要是气体的微观结团和宏观结团. 我们通过对这些过程的分析指出, 这两种结团都是对原有热平衡的破坏, 而后靠碰撞使宇宙重新实现热平衡. 热力学

在这样的演化过程中自然都是成立的, 从而熵是一直在增加的. 在这意义上讲, Clausius 把热力学用于宇宙是对的. 这是我们的第一点结果.

宇宙演化的时间尺度是无穷大. 熵不断增加会不会趋向熵的极大化? 这个问题的结论与人们对宇宙的认识关系密切. Clausius 不可能认识到宇宙在膨胀以及膨胀使宇宙降温. 今天的演化理论告诉我们, 宇宙的不断降温使热碰撞对演化的影响削弱, 直至失去(即退耦). 当碰撞不再发生时, 热力学失去了起作用的条件. 因此, 虽然宇宙演化的时间是无穷的, 但并不会逼近熵的极大化. 这是我们的第二点结果.

最后对热力学的适用性问题再做一些补充说明. 由于有微观物理的发展做借鉴, 人们已认识到, 20 世纪前建立的经典物理学适用于宏观客体, 而并不是普适的. 它对微观客体的不适用, 自然会给宇宙学研究带来一个疑问: 它对宇观客体适用吗? 对此能采取的态度几乎是唯一的. 人们只能先用已知的(宏观和微观)规律来研究宇宙的演化. 如若出现与事实的强烈冲突, 才须考虑宇观客体或许有自身独特的规律.

宇宙学最基本的事实是其中的物质的结构和形态非常复杂多样. 可是理论告诉我们, 早期宇宙的组分和结构非常简单. 演化理论的目标是应用已知的物理规律, 从早期简单的宇宙演化出今天复杂的宇宙. 至今的研究进展表明, 该理论在所有关键性的演化环节上都很成功. 这就提供了一个强有力的证据, 表明已知的规律是完全适用的. 这里当然包括热力学, 因为热过程是演化中不可或缺的因素. 这正是本文想说明的主要之点. Clausius 的热寂说不成立不是因为热力学失效, 而是宇宙演化使在部分物质中失去了热力学起作用的条件.

参考文献

- [1] 俞允强. 物理宇宙学讲义. 北京: 北京大学出版社, 2002
- [2] Steven Weinberg. Cosmology. Oxford: Oxford university press, 2008

致谢 在酝酿此文时, 我深怕自己对热力学的把握不够准确. 为此我与林宗涵教授(我的同学和同事)做了好几次详尽而认真的讨论, 要求他把关. 我在此对他表达深切的感谢. 如若文中仍有不恰当或错误的表述, 则责任全在我自己, 与他无关.