

热核的衰变动力学研究^{*}

曾祥华 张丰收 罗亦孝

(中国科学院近代物理所 兰州 730000)

摘要 在 Vlasov 框架下讨论了高温、高压核物质的动力学演化过程. 通过研究得出, 初始过程对碎裂的影响很大, 这里密度的影响比热激发能的影响更大. 在相同的初始条件下, 不可压缩系数对碎裂过程影响很大, 即热核在硬势的平均场中比在软势的平均场中更易裂开.

关键词 Vlasov 方程 热核 气泡核

1 引言

中能重离子碰撞所产生的残余核含有大量的轻粒子和小部分的中等质量碎片. 从未态产物中, 可分为蒸发(vaporation)、中等质量碎片(IMF)和汽发(evaporation). 处于低温条件下的核物质不可能进入不稳定区域, 只是对一个有限系统可能有部分粒子被蒸发. 当核物质进入不稳定区域时, 这个区域的高温边界依赖于涨落的程度. 一些研究表明^[1,2]中等质量碎片多重性来源于动力学不稳定性. 密度涨落确定了由排斥和吸引组成的平均场. 从未态产物中观测到的碎片的大小与密度直接相关, 并且末态产物直接与初始条件相关^[3], 如密度、激发能依赖于入射道. 理论上, 人们对中能区重离子碰撞所产生的多重碎裂非常感兴趣^[4], 因为多重碎裂可能导致液气相变. 一些计算结果^[5-7]表明, 在碰撞过程中可以形成气泡核和环形(toroidal)核, 然后通过多重碎裂方式跟随衰变. 两个中重核进行中心碰撞时, 核物质被挤压形成与束流方向垂直的、密度较低的各向同性的盘. 对于重核有一个能量范围, 在这个能量范围内靠近盘的边沿, 原型核(protosphere)溶合成环形结构的核, 即环形核. 从流体动力学观点来看环形核是稳定的, 存在着一个合适的能量, 能量较低时, 环塌陷成一个球; 能量高时, 环演化成 Raleigh - Taylor 形式的不稳定性——具有 n 个节点的雪茄式结构的气泡核; 能量高时, 环形核会裂开, 形成多个独立的核.

本文在三维 Vlasov 框架下研究热核膨胀过程中所形成的环形核和气泡核, 以及在不同初始条件, 即在不同的初始温度和密度条件下所导致的不同状态. 同时, 讨论了核物质状态方程对热核衰变的影响.

1999-04-07 收稿

* 中国科学院科学基金资助

2 模型

仅考虑平均场的 Vlasov 方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} - \nabla_{\mathbf{r}} U \cdot \nabla_{\mathbf{p}}\right) f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = 0,$$

$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ 是相空间单粒子的分布函数, U 为密度相关的平均场, 其形式为

$$U(\rho) = A \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + B \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\sigma, \quad (2)$$

式中 A, B, σ 为参数. 这里取两组参数, 即不可压缩系数分别为 $K = 380 \text{ MeV}$ 的硬势(H)和 200 MeV 的软势(S), 其参数如表 1 所示. 相空间密度 ρ 为

$$\rho = \int f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) d^3 p, \quad (3)$$

其中, \mathbf{r}, \mathbf{p} 为粒子在时间 t 时的坐标和动量, $\rho_0 = 0.168 \text{ fm}^{-3}$ 为核物质正常密度. 在初始时, 坐标空间的粒子分布为均匀分布, 其压缩强度由粒子在坐标空间分布抽样得到. 粒子在动量空间的分布为费米分布, 即

$$f(p) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{p^2/2m - \mu}{2T}\right)},$$

其中 $\mu = 37 \text{ MeV}$ 为化学势, T 为温度参数, 它描述的只是初始组态的动量分布, 并不是核系统的温度值.

表 1 平均场参数

	A/MeV	B/MeV	K/MeV	σ
H	-124	70.5	380	
S	-356	303	200	7/6

本文所考虑的初始核是 ^{197}Au , 每个真实核子对应的试验数为 100, 时间步长 $\Delta t = 0.5 \text{ fm}/c$. 在 Δt 内, 第 i 个实验粒子的运动方程满足方程

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \frac{\mathbf{p}_i}{\sqrt{m_i^2 + p_i^2}}, \quad \frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = -\nabla_{\mathbf{r}} U.$$

3 结果分析

3.1 相同密度和不同温度下热核的演化

以下所讨论的都是硬势的平均场, 初始核的平均密度为 $1.35\rho_0$.

当初始温度参数为 15 MeV 时, 计算结果表明, 由于初始核是一个压缩的热核, 这个核将会膨胀, 在膨胀过程中受平均场的影响, 形成了密度的涨落, 导致密度空间的不均匀性, 出现了密度较高的区域, 但中心区域的密度逐渐减小. 当 $t = 45 \text{ fm}/c$ 时, 出现了环以

及密度较高的核子集团——气泡核(bubble nuclei),这种环及气泡在吸引和排斥平衡的平均场中可以稳定存在一段时间,接着核子将进入密度较高的区域,使得系统的势能降低,而处于最稳定的状态.由于初始核所具有的能量不足以克服核子间的结合能,因此这种环形核和气泡核在 $t = 90\text{fm}/c$ 时还没有碎裂.

当温度参数为 20MeV 时,每个粒子在平均场中运动,满足牛顿运动方程.此时由于初始核的能量增大,粒子将迅速膨胀,在 $t = 10\text{fm}/c$ 时,平均密度只有正常核物质密度的 $1/3$.由于粒子迅速膨胀,核物质形成一个球壳,在 $x-z$ 平面内出现一个环,随着时间的演化,在 $t = 40\text{fm}/c$ 时,盘膨胀形成各向同性的费米气体,中心区域只有很少的粒子数.平均场的作用使粒子结团,气泡核开始形成(如图1所示).从 $40\text{fm}/c$ 环开始形成,到 $70\text{fm}/c$ 时环形核仍然存在,气泡核的数目为 $4(n=4)$,在这段时间的演化过程中环形核和气泡核并未形成一个球或全部裂开,这种气泡核有较长的寿命.

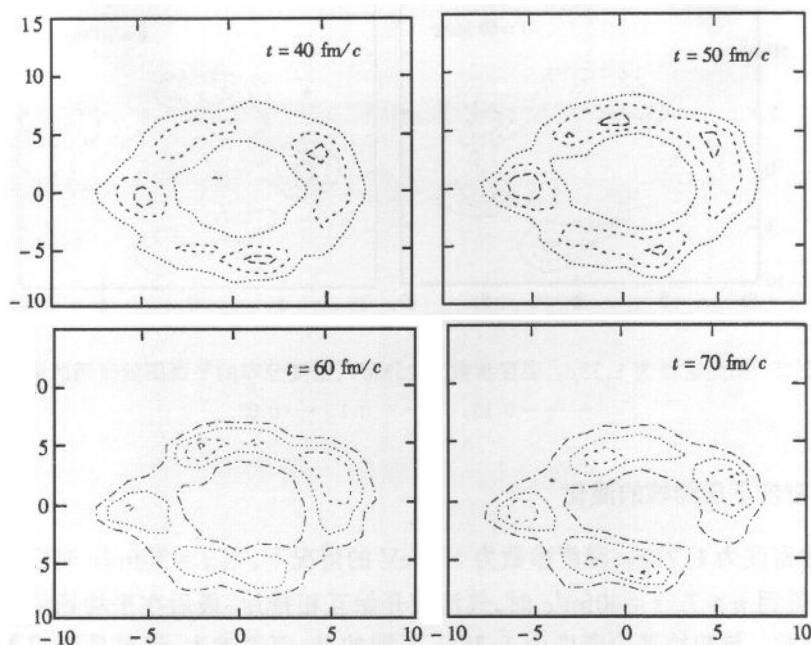


图1 初始密度为 $1.35\rho_0$, 温度参数为 20MeV 时,密度分布的平面图随时间的演化
 $t = 40, 50\text{fm}/c$ 时, ——— 0.15, - - - - 0.1, 0.05; $t = 60, 70\text{fm}/c$ 时, ——— 0.2,
 - - - - 0.15, 0.1, - · - · - 0.05.

当温度参数为 25MeV 时,发现气泡核形成的时间提前了,环中气泡核的数目未变.由于温度参数增大,提供给核子的能量增加,环中气泡核的平均场的吸引和排斥不再平衡,气泡核开始逐渐裂开并出现4个大块物质(如图2).已有预言^[5]对重核之间的碰撞,存在一个能量范围,在这个范围内,环形核稳定存在的时间较长.能量较低时,环又会聚合成一个球;能量较高时,环将会碎裂.在我们的框架下,密度和温度参数反映了入射道效应,这里再现了这种结果.文献[7]中指出,随着温度的升高,表面张力系数和库仑排斥将核物质向外推,导致环形核和气泡核的形成.而我们这里看到的结果只是由动力学效应引起的.由以上结论可知,在密度参数确定的情况下,环形核和气泡核的形成及其裂变

依赖于温度参数,即热激发能,温度低时这个环又会形成一个球;温度高时,环会裂开;温度参数值保持在一个合适的范围内时,环能存在较长的时间,但气泡核的数目并不随温度参数的大小而改变.

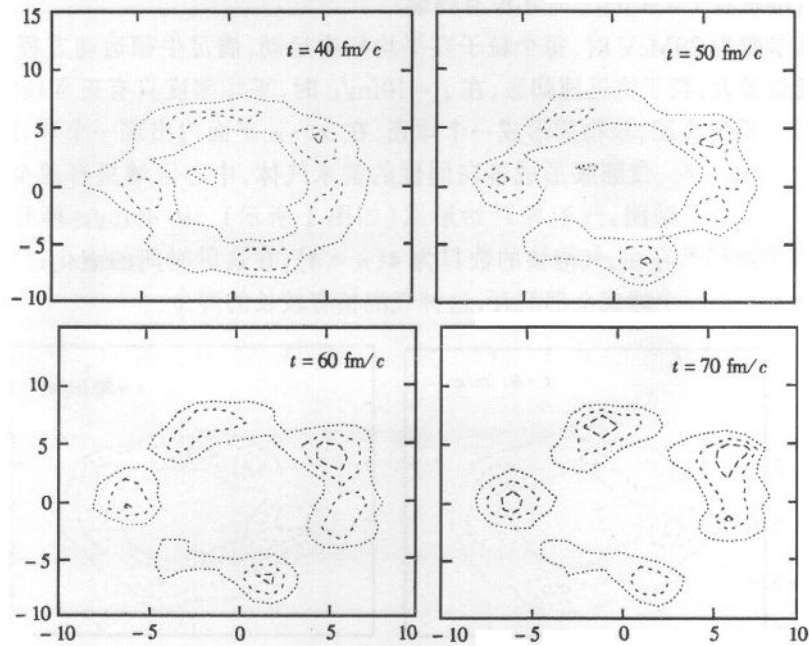


图2 初始密度为 $1.35\rho_0$, 温度参数为 25MeV , 密度分布的平面图随时间的演化
—— 0.15, - - - - 0.1, 0.05.

3.2 不同密度下压缩核的演化

在初始密度为 $1.71\rho_0$, 温度参数为 10MeV 的情况下, 当 $t = 30\text{fm}/c$ 时已观测到较多的气泡核, 得到 $n = 7$. $t = 40\text{fm}/c$ 时, 气泡核开始互相排斥, 最后在平均场的作用下形成几个大的碎片. 与初始平均密度为 $1.35\rho_0$ 不同的是, 密度越大, 越容易形成更多的气泡核, 且形成气泡核的时间步长缩短, 同时导致系统碎开的温度参数也会降低. 图3给出了不同时间的密度分布平面图. 比较不同密度下的变化, 可以看到, 最后产生的碎块数目与初始密度密切相关, 密度越大产生的碎块数目越多. 这与文献[8]中关于碎裂的讨论是一致的, 即对碎裂, 压缩比热激发效应更有效. 中等质量碎块是高密度、高激发核所产生的结果, 因此在中等质量碎片多重性的研究中, 为得到较多的中等质量碎片多重性, 应考虑不同的碰撞系统和入射能量、碰撞参数, 即入射道效应.

3.3 不同势场下气泡核的产生

以上讨论的都是对应的硬势平均场, 现在讨论系统在软势的平均场中的变化情形. 研究势场对热核衰变的影响, 目的在于找到灵敏于状态方程的物理参量. 已经知道, 有效质量对集体流比较敏感^[9], 但未发现灵敏于核物质不可压缩系数的参量, 因此对不可压缩

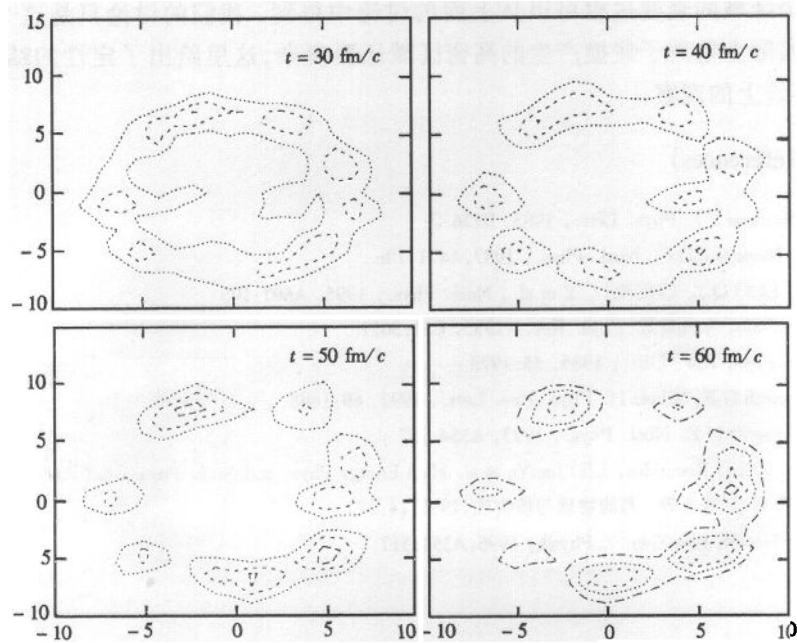


图3 初始密度为 $1.71\rho_0$, 温度参数为 10MeV , 密度分布的平面图随时间的演化
 $t = 30, 40, 50\text{fm}/c$ 时, ——— 0.15, - - - - 0.1, 0.05; $t = 60\text{fm}/c$ 时, ——— 0.2,
 - - - - 0.15, 0.1, - · - · - 0.05.

系数的提取遇到了困难. 这里计算了初始密度相同, 温度参数不同时, 两种相互作用势的结果. 这里初始压缩核的平均密度为 $1.44\rho_0$. 当温度参数为 15MeV 时, 两种相互作用下热核都未裂开, 而平均场使它们束缚在一起. 温度参数为 20MeV 时, 两种相互作用导致了不同的结果, 对硬势, $40\text{fm}/c$ 时出现了气泡核, 随时间的演化出现了大的碎块, 由于核力的短程性, 使这些碎块束缚在一起形成稳定的核物质; 而对软势, 尽管在时间的演化过程中中心出现了环, 但初始的压缩核系统始终自束缚在一起未裂开, 最后在核力的作用下又形成密度较高的稳定核系统. 这种差异说明硬势反映了核子间的较弱的束缚, 导致核系统易于裂开. 与晕核的弱束缚类比, 说明对不同的核, 核物质的不可压缩性是有差异的. 这有待理论和实验的进一步研究.

在实验上, 证实环形核和气泡核的存在, 可以从碎片中测量温度的大小^[5], 或碎片的角分布和质量分布, 因为从环形核和气泡核中出来的碎片具有更多的对称性. 或从巨偶极 γ 射线来研究热核在衰变以前的模式. 得到的环形核和气泡的密度与文献[5]中预言基本一致. 由讨论知道, 环形核和气泡核具有对称性, 如果实验上能够证实环形核和气泡核的存在, 就可以得到在碎裂以前热化的信息, 即碎裂以前复合系统是处于局域平衡或平衡的.

综上所述, 可以得到热核的衰变过程与压缩的密度密切相关, 核物质压缩越大, 产生的碎块越多, 热激发能越大, 产生的碎块时间越早; 热核在硬势的平均场作用下更易碎开. 在中能重离子碰撞中, 两个重核之间的碰撞可以产生一个温度很高、密度很大 ($1.5-2\rho_0$)

的区域,这个区域的衰变过程可以从上面的讨论中得到. 我们的讨论只是这个区域内理想的情况,实际上重离子碰撞产生的高密区域还要复杂,这里给出了定性的结论,具体的结果有待实验上的观察.

参考文献(References)

- 1 Bertsch G, Siemens P J. Phys. Lett. , 1983, **B126**:9
- 2 Pethick C J, Ravenhall D G. Nucl. Phys. , 1987, **A471**:19c
- 3 Nordbeck E, LUO Q Z, CHENG C Y et al. , Nucl. Phys. , 1996, **A607**:105
- 4 ZHANG FengShou, Suraud E. Phys. Rev. , 1995, **C51**:3021
- 5 WONG C Y. Phys. Rev. Lett. , 1985, **55**:1973
- 6 Bauer W, Bertsch G F, Schulz H. Phys. Rev. Lett. , 1992, **69**:1888
- 7 LI BaoAn, Gross D H E. Nucl. Phys. , 1993, **A554**:257
- 8 GE LingXiao, ZENG XiangHua, LIU JianYe et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1990, **14**:27
(葛凌霄,曾祥华,刘建业等. 高能物理与核物理, 1990, **14**:27)
- 9 ZENG XiangHua, GE LingXiao. Z. Physik, 1996, **A354**:317

Study on the Decay Dynamics of Hot Nuclei*

ZENG XiangHua ZHANG FengShou LUO YiXiao

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract With in the frameworu of the three - dimensional Vlasov equation, the dynamical evolution of highly compressed nuclei with high thermal excitation energy has been discussed. The distributions of particles in the space are uniform, while in the momentum space are Woods - Saxon distribution. The effects of initial conditions, temperature parameter and density, on the hot decay are great. The effect of the density on the hot decay is more important than the temperature parameter. For the same initial condition, the hot nuclei is more likely to decay in the hard potential than in the soft potential.

Key words Vlasov equation, hot nuclei, bubble nuclei

Received 7 April 1999

* Supported by Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences