

核物质液-气相变和热核稳定性*

宋宏秋

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 简述了研究核物质液-气相变的理论计算及研究热核稳定性的二相平衡模型. 讨论了相变的临界温度及其对核物质大小、不对称度及库仑相互作用的依赖性. 比较了用各种核力或模型算得的热核极限温度及实验结果.

关键词 核物质 液-气相变 热核稳定性

分类号 O571.22

核子-核子间的相互作用与水分子间的相互作用十分相似——短程排斥和中长程吸引. 从水的相变联想到在核物质中也可能存在液-气相变. 80 年代初, 在中能质子诱发的核反应^[1]和中能重离子反应^[2]的分析中, 人们发现了液-气相变的迹象, 从而引起核物理界的广泛关注. 在理论上, 人们采用各种方法研究核物质的状态方程, 如 Thomas-Fermi^[3]、HF^[4]、Walecka 模型^[5]、导数标量耦合(ZM)模型^[6]、夸克-介子耦合模型^[7]. 计算得到的压强-密度($P-\rho$)等温曲线显示典型的 Van der Waals 相互作用给出的结果, 如

图 1 所示. 在较低温度处, 有一液相与气相共存的区域. 当温度上升时, 这个共存区缩小. 直到某个温度 T_c , 出现一个拐点时, 满足 $(\partial P/\partial \rho)_{T_c} = (\partial^2 P/\partial \rho^2)_{T_c} = 0$ 条件. 温度高于 T_c 时, 系统只存在气相. T_c 称为液-气相变的临界温度, 大致范围为 15~20 MeV. 具体数值依赖于所用的模型和相互作用势. 表 1 列出用 Skyrme 势算得的结果^[4]. 可以看出, 对应于硬的状态方程(不可压缩性系数 K 比较大)的 Skyrme 势所给出的临界温度比较高.

以上讨论是无限大对称核物质的液-气

表 1 用各种 Skyrme 相互作用计算得到的核物质液-气相变的临界温度($k_B T_c$)、临界密度(ρ_c)、临界压强(P_c)以及在临界点和饱和点的有效核子质量(m^*/m)_c 和 (m^*/m)_o.

	Sk I	Sk II	Sk III	Sk IV	Sk V	Sk VI	SkM*
$k_B T_c^{(1)}/\text{MeV}$	20.120	16.750	17.950	16.000	14.550	20.050	14.600
ρ_c/fm^{-3}	0.061	0.580	0.056	0.057	0.048	0.055	0.052
$P_c/\text{MeV} \cdot \text{fm}^3$	0.399	0.331	0.330	0.333	0.276	0.367	0.210
$(m^*/m)_c$	0.963	0.779	0.893	0.703	0.744	0.980	0.920
$(m^*/m)_o$	0.913	0.577	0.760	0.471	0.382	0.949	0.789

相变. 在重离子反应中实际形成的核物质是有限大小、不对称和带电的. 严格来讲, 只有无限大系统才能定义相变, 而在有限大小

的系统中, 只能近似地利用这个概念^[8]. 由于在有限大小的系统中定义压强比较困难, 通常用化学势-密度($\mu-\rho$)等温曲线来研究液-

* 1998 - 07 - 15 收稿.

* 国家自然科学基金(项目号 19675060)和中科院九五基础性研究重大项目资助.

气相变. 临界温度 T_c 由拐点条件 $(\partial\mu/\partial\rho)_{T_c} = (\partial^2\mu/\partial^2\rho)_{T_c} = 0$ 决定. 在无限大对称核物质情况下, 这个条件与上述 P - ρ 等温曲线拐点条件等价. Song 等^[9]用 HF 及 Gogny 势研究了临界温度对系统大小、中子与质子不对

称度及库仑力的依赖性. 结果指出, T_c 随系统粒子数的减少而下降(见表 2). 对不对称核物质, 通常定义一个不对称度: $d = (\rho_n - \rho_p)/\rho$, 其中 $\rho = \rho_n + \rho_p$, ρ_n 、 ρ_p 分别为核物质密度、中子密度和质子密度. 对于对称核物

表 2 核物质液-气相变临界温度 T_c 和临界密度 ρ_c 对核子数的依赖性

N	50	100	200	1 000	10 000	∞
T_c/MeV	7.900	9.400	11.100	12.900	14.500	15.800
ρ_c/fm^{-3}	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060

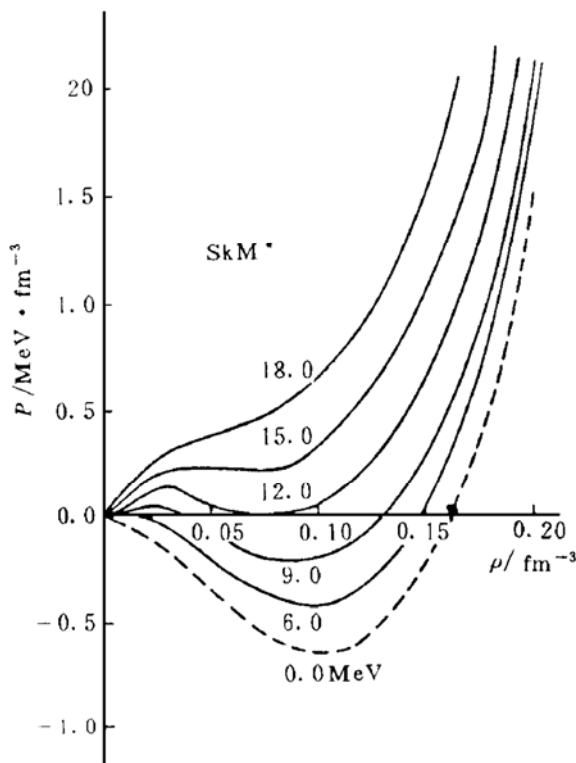


图 1 用 SkM* 相互作用计算得到核物质的压强-密度等温曲线

质, $d=0$; 中子物质, $d=1$. 当 $d \neq 0$ 时, 中子化学势 μ_n 与质子化学势 μ_p 不再相等. 图 2 为文献[9]给出的 $T=8$ MeV 时的 μ - ρ 等温曲线. 由图可见, $d > 0$ 时, μ_n - ρ 曲线(点划线)上移, μ_p - ρ 曲线(虚线)下移. 观察发现, μ_n - ρ 曲线出现拐点的温度 T_c^n 要比 μ_p - ρ 曲线出现拐点的温度 T_c^p 要低. 我们不难想象, 当中子全部气化后, 质子还能凝聚于液相. 因此, 通常必须把 T_c^n 和 T_c^p 中的较低者 T_c^n 取为系统的临界温度. 给定一个不对称度 d ,

可定出一个临界温度 T_c . 反之, 给定一个温度 T , 变动不对称度 d 也可使 μ - ρ 等温曲线出现拐点, 即达到临界. 我们可把这个 d 值称为临界不对称度 d_c . 图 3 中的实线是作者^[9]用 Gogny 势算出的 T_c - d_c 相图. 在 T_c - d_c 曲线的右上方, 系统完全处于气相, 而在曲线的另一边, 系统可处于液相或二相共存. 另外, 图中给出了文献[10]中用 SkM* 算得的结果(虚线), 在确定临界温度时, Su 等^[10] 用了一个平均化学势: $\mu_A = [\mu(n)\rho(n) + \mu(p)\rho(p)]/\rho$. 为了便于比较, 图中还以点划线给出了用 Gogny 势及文献[10]同样方案算得的结果. 由图可见, Gogny 势的结果与 SkM* 的相近. 考虑到原子核是带电的, 必须在质子化学势 μ_p 上叠加库仑势, 其结果使 μ_p - ρ 曲线向上移(见图 2 中的实线), 因而 T_c^p 也将得到修正. 表 3 给出了文献[9]的结果.

表 3 不对称度和库仑相互作用对临界温度的影响

N	d	T_c^n/MeV	T_c^p/MeV	
			Without V_c	With V_c
100	0.0	9.4	9.4	(5.5)
	0.1	7.5	11.5	8.3
	0.2	4.8	13.4	10.8
200	0.0	11.1	11.1	(3.8)
	0.1	8.7	12.8	(7.4)
	0.2	5.7	14.5	10.3

可以看出, T_c^n 总是低于 T_c^p . 在考虑库仑势后, T_c^p 有所降低, 但比 T_c^n 还是要高些.

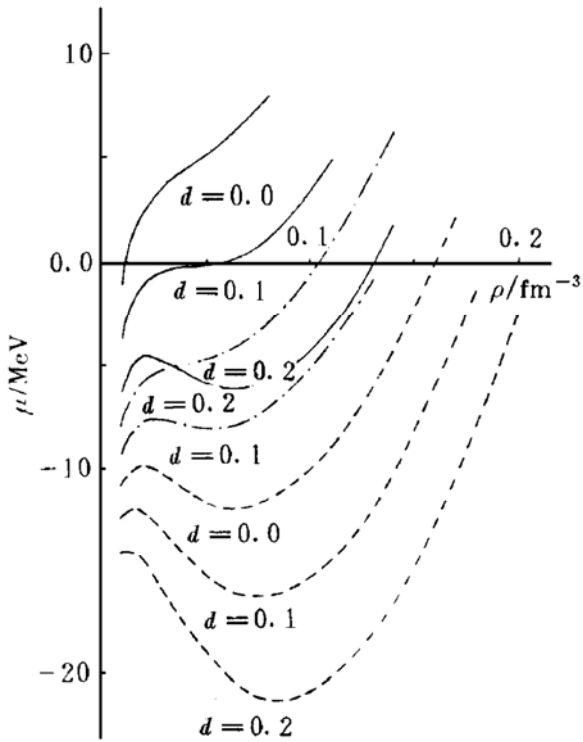


图 2 用 Gogny 相互作用计算得到的温度 $T=8 \text{ MeV}$ 及各种不对称度情况下核物质的化学势-密度等温曲线

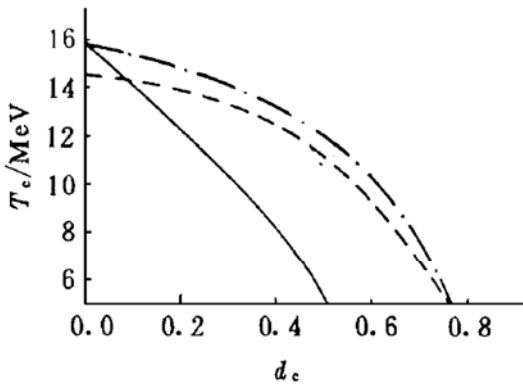


图 3 T_c-d_c 相图

实验上如何提取温度，目前仍是个没有彻底解决的问题，只有对于一热平衡系统才能定义温度。在重离子碰撞中，系统是否达到平衡也是个难以论证的问题。一般来说，系统没有达到全部平衡或只是局部平衡，这时谈论温度是没有意义的。但是，在实验数据的分析中，温度概念却被广范应用着。目前，提取温度的方法大体有三种。第一种方法是用一运动源拟合遍举粒子的动能谱法提取温度。这个温度称为斜率温度，在大多数情况下其中包含了非平衡源。Surand 等^[11]指

出，合理测量温度必须满足如下条件：(1)发射源核与蒸发粒子符合测量；(2)在多个后向角测量，以便孤立出达到热化的蒸发粒子。他们用此方法测量了 27 MeV/u 的 $\text{Ar}+\text{U}$ 系统，得到的温度是 5 MeV 。第二种方法是测量系统激发态的相对布局数，文献^[12]给出的温度为 $4.5 \sim 6.0 \text{ MeV}$ 。第三种方法是测量同位素产额比^[13]，是目前几种方法中最好的一种。

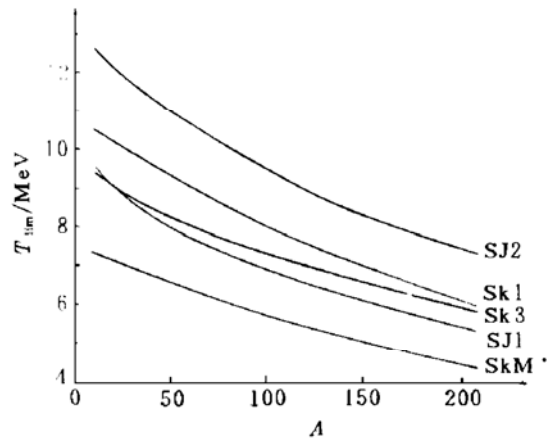


图 4 用各种 Skyrme 相互作用算得的极限温度 T_{lim} 随核质量数的变化

随着重离子反应实验的发展，人们发现与液-气相变临界温度有关但更有意义的一个温度——热核极限温度 T_{lim} 。它是热核还能稳定存在的最高温度，在实验上容易观察。也许上面提到的测量到的系统温度应与这个极限温度相联系。我们用 HF 及 Skyrme 力在二相平衡模型下系统地研究了热核的稳定性^[14]。在这个模型中，热核被看为均匀带电液滴，它与周围的核子蒸气处于力学、化学和热力学的平衡中，可以如下方程组表示。

$$p(T, \rho_L, d_L) + p_{\text{Coul}}(\rho_L) + p_{\text{Surf}}(T, \rho_L) = p(T, \rho_V, d_V) \quad (1)$$

$$\mu_n(T, \rho_L, d_L) = \mu_n(T, \rho_V, d_V), \quad (2)$$

$$\mu_p(T, \rho_L, d_L) + \mu_{\text{Coul}}(\rho_L) = \mu_p(T, \rho_V, d_V). \quad (3)$$

其中，下标 L 与 V 分别表示液相与气相，而

n 与 p 分别表示中子与质子； μ 、 ρ 、 d 与 P 分别表示化学势、密度、不对称度和压强.

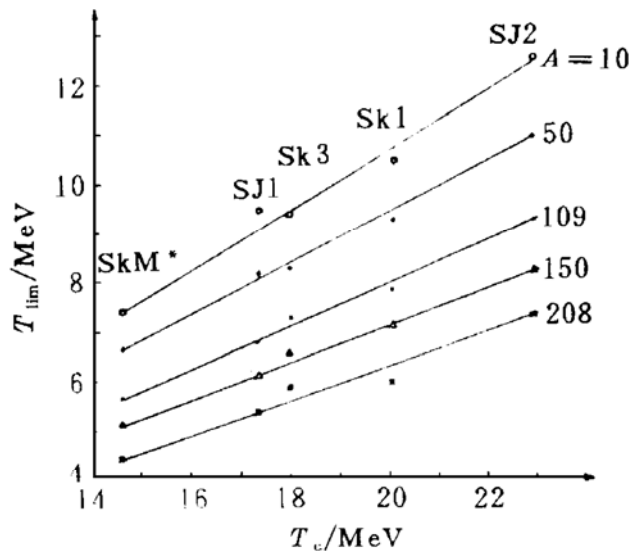


图 5 核物质液-气相变临界温度 T_c 与热核极限温度 T_{lim} 之间的关联

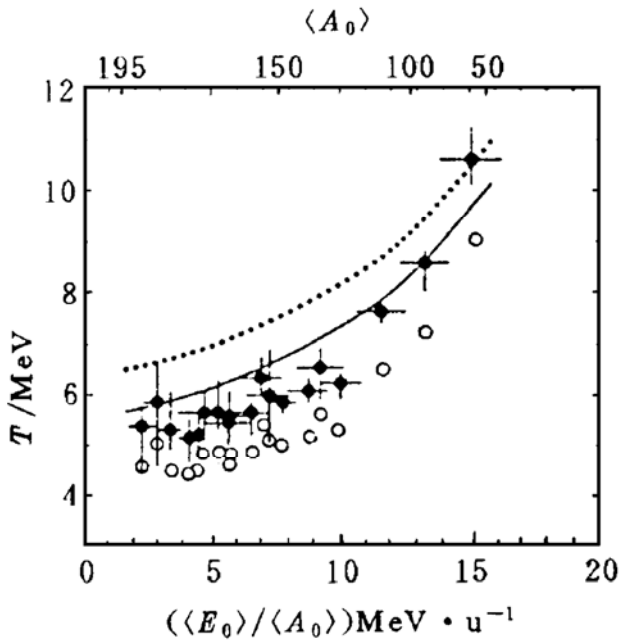


图 6 热核极限温度

黑点是校正后的实验值，虚线是文献[17]的计算值，实线是用文献[14]的结果校正后的结果

对于液滴，还考虑了库仑及表面效应^[14]. 在一定的温度 T 下，求解上列联立方程组可得各物理量的平衡值. 当温度上升到某个数值 T_{lim} 时，方程组不再有解，即系统已不稳定. 这个温度就是热核的极限温度. 图 4 为预言的在 β 稳定线上热核的极限温度. 可以看出，

不同的 Skyrme 力给出的热核极限温度是不一样的，SJ2 给出的最高，SkM* 的最低. 但所有曲线都有一致的变化趋势： T_{lim} 随着系统核子数的增加而单调下降，但在大 A 处下降趋势有所变缓. 前者是由于质子数增大导致库仑排斥效应的增大，后者是因为在大 A 处中子数比质子数增加得快，抵消了一部分库仑效应. 此外，作者还发现，对于 Skyrme 力，热核极限温度 T_{lim} 与核物质液-气相变临界温度之间有一近似的线性关联，如图 5 所示. Baldo 等^[15]指出，这个关联的存在提供了从热核唯象数据中提取核物质状态方程特性的可能性. Natowitz 等^[16]把最新的实验数据与文献[14]中 T_{lim} 的理论预言进行比较. 发现用 SJ1 计算得到的结果与实验符合得最好. 为了解释文献[13]的实验结果，Natowitz 等用了 Bcsprovany 等^[17]用 Sk1 计算的离开 β 稳定线的热核的 T_{lim} ，结果如图 6 的虚线所示，它明显地比实验值高. 如果用文献[14]中 SJ1 的结果加以校正，就得到图中的实线，与实验符合较好.

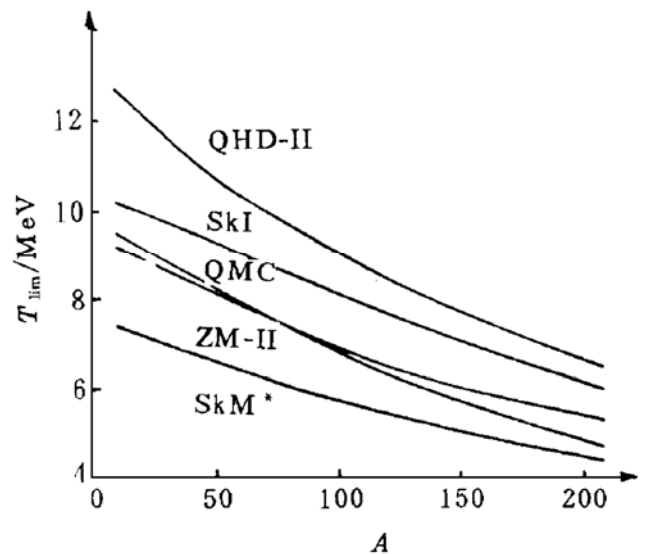


图 7 用 QMC、QHD-II、ZM-II 模型及 SkI、SkM* 相互作用算得的热核极限温度 T_{lim} 随核质量数的变化

Song 等还用 Walecka (QHD-II) 模型^[18]、导数标量耦合 (ZM-II) 模型^[19]、夸克-介子耦合 (QMC) 模型^[20]以及 Gogny 力^[21]研究了热核的库仑不稳定性. 得到的极限温度在定性上与 Skyrme 力的结果差不多，但绝对值可

相差很大. 例如, 图 7 给出了前三种模型结果与 Skyrme 力中 SkI 及 SkM* 结果. 由图可见, QHD-II 描述的核物质最硬, 依次为 SkI、QMC、ZM-II, 最软的是 SkM*.

目前, 有关热核的实验数据还在不断积累, 各种理论也在不断完善. 在今后若干年中, 这个领域仍然是核物理的一个热点.

参 考 文 献

- 1 Finn J E, Agarwal S, Bujak A *et al.* Nuclear Fragment Mass Yield from High-energy Proton-nucleus Interactions. *Phys Rev Lett*, 1982, 49: 1321~1325
- 2 Panagiotou A D, Curtin M W, Toki H *et al.* Experimental Evidence for a Liquid-gas Phase Transition in Nuclear Systems. *Phys Rev Lett*, 1984, 52: 496~499
- 3 蔡延璜, 夏克定, 宋宏秋. “热核”的统计特性和核物质液气相变. *高能物理与核物理性*, 1990, 14: 661~667
- 4 Su R K, Yang S D, Kuo T T S. Liquid-gas and Superconducting Phase Transitions of Nuclear Matter Calculated with Real Time Green's Function Methods and Skyrme Interactions. *Phys Rev*, 1987, C35: 1539~1550
- 5 Su Rukeng, Qiang Zhixin. Fluctuation Effects of Meson Fields on Quantum Hydrodynamics at Finite Temperature. *Phys Rev*, 1992, C46: 1528~1534
- 6 Qiang Z X, Song H Q, Su R K. Thermodynamical Properties of Relativistic Nuclear Matter With Derivative Scalar Coupling. *Phys Rev*, 1993, C48: 154~158
- 7 Song H Q, Su R K. Quark-Meson Coupling Model at Finite Temperature. *Phys Lett*, 1995, B358: 179~183
- 8 Jaqaman H R, Makjian A Z, Zamick L. Liquid-gas Phase Transition in Finite Nuclear Matter. *Phys Rev*, 1984, C29: 2067~2074
- 9 Song H Q, Zheng G T, Su R K. Critical Phenomena in Nuclear Matter with Gogny Interaction. *J Phys*, 1990, G16: 1861~1871
- 10 Su R K, Yang S D, Li G L *et al.* Critical Neutron-proton Asymmetry of Hot Nuclear Matter. *Mod Phys Lett*, 1987, A1: 71~80
- 11 Surand E, Gregoire C, Tamain B. Birth, Life and Death of Hot Nuclei. *Prog Part Nucl Phys (U. K.)*, 1989, 23: 357~467
- 12 Chen Z, Gelbke C K, Gong W G *et al.* Inclusive Two-particle Correlations for ^{16}O -induced Reactions on ^{197}Au at $E/A=94$ MeV. *Phys Rev*, 1987, C36: 2297~2308
- 13 Pochozalla J, Mohlenkamp T, Rubehn T *et al.* Probing the Nuclear Liquid-gas Phase Transition. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 1040~1043
- 14 Song H Q, Su R K. Coulomb Instability of Hot Nuclei with Skyrme Interaction. *Phys Rev*, 1991, C44: 2505~2511
- 15 Baldo M, Giansiracusa G, Lombardo U *et al.* Microscopic Theory of The Nuclear Equation of State. *Nucl Phys*, 1995, A583: C599~606
- 16 Natowitz J B, Hagel K, Wada R *et al.* Limiting Temperature of Neutron Rich Nuclei: A Possible Interpretation of Data from Isotope Yield Ratios. *Phys Rev*, 1995, C52: R2322~2325
- 17 Besprovan J, Levit S. Limiting Temperature and Limits of Statistical Particle Emission. *Phys Lett*, 1989, B217: 1~4
- 18 Song H Q, Qiang Z X, Su R K. Coulomb Instability of Hot Nuclei in Quantum Hydrodynamics. *Phys Rev*, 1993, C47: 2001~2007
- 19 Song H Q, Qiang Z X, Su R K. Coulomb Instability of Hot Nuclei with Derivative Scalar Coupling. *Phys Rev*, 1994, C49: 2924~2931
- 20 Song H Q, Su R K. Thermodynamical Properties of Relativistic Nuclear Matter in a Quark-Meson Coupling Model. *J Phys*, 1996, G22: 1025~1035
- 21 Zhang Yijun, Su Rukeng, Song Hongqiu *et al.* Thermodynamical Properties and Coulomb Instabilities in Hot Nuclear Systems. *Phys Rev*, 1996, C54: 1137~1142

Liquid-gas Phase Transition in Nuclear Matter and Stability of Hot Nuclei

Song Hongqiu

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000)

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A brief introduction of the theoretical studies of liquid-gas phase transition in nuclear matter and a two-phase equilibrium model for studying stability (下转第 206 页)

(上接第 197 页)

of hot nuclei is presented. The critical temperature of the phase transition and its dependence on size and asymmetry of nuclear matter and Coulomb interaction are discussed. The limiting temperatures of hot nuclei calculated with various nuclear forces or models and experimental results are compared.

Key words nuclear matter liquid-gas phase transition stability of hot nuclei