

高能重离子碰撞与核媒质相变

刘亦铭

(哈尔滨工业大学)

图1是理论上推测的核媒质密度—温度相图。传统的低能核物理学研究相图中 $\rho/\rho_0=1$ 和 $T=0$ 附近小区域冷核媒质的物理特性。高能重离子碰撞提供了研究在极端密度和极端温度下核媒质性质的可能。图1中的虚线指明了碰撞中核媒质所遵循的一条可能途径。研究碰撞中所发射的粒子，能够获得核媒质态方程和动力学的情报。这些知识不仅对核物理学和基本粒子物理学的发展是非常重要的，对 neutron star、超新星、以及宇宙形成的研究也将起着不可估价的作用。

一、核媒质相变

图1中左下角是类似液态的核媒质。升高温度液体蒸发形成气体。这种气体不仅由核子组成，还包含有 π 介子和其它更重的强子，称为强子气体。在低密度，但相对低的

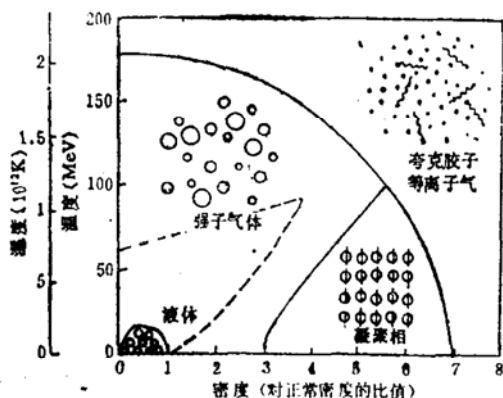


图1. 核媒质相图

温度下，核媒质被冻成晶体结构。人们还没有找到它存在的确切证据，但猜测它可能存在于中子星内部深处。进一步加热和压缩核媒质，强子本身分解成构成它们的粒子、夸克和胶子，称为夸克胶子等离子体。核媒质新相—“夸克胶子等离子体”的存在，已由QCD点阵规范计算所预言。人们认为，在200亿年以前宇宙大爆炸时，它短暂地存在大约 $1\mu s$ 的时间。

高能核—核的中心碰撞能够产生极高温度和极高密度，提供了核媒质相变的条件，因而成为高能重离子物理学研究中的中心课题。

二、相对论核—核碰撞的VUU模型

建立描述相对论核—核碰撞的正确理论，应当使用量子色动力学。但是今天这种逼近是极其困难的，是毫无希望的，因为重离子碰撞理论要处理一个极其复杂的多体系统。要了解核媒质，我们需要做简化问题的某些假设和近似，建立相对论核—核碰撞的模型理论。这些模型可分为：热力学模型(有时称为统计模型)，流体动力学模型，内核级联模型，以及运输模型。模型可能是解析的，如：火球模型；也可能是数值的，如：内核级联模型。近来发展起来的VUU模型⁽¹⁾

3. 核物理知识对搞清无规散射(从经典到量子)规律可能很有用(像过去束缚态情况一样)，可选一些例子加以分析；

4. 微观动力学的研究尚需具体深入并推广到量子情况。

我们期待着通过原子核各种运动形态的研究有助于建立量子小体系的统计力学(平衡与非平衡)。这对认识自然，对各个学科的发展，对应用都将有重大意义。

是一种输运模型,它是基于Vlasov—Uehling—Uhlenbeck量子输运方程

$$\begin{aligned} \partial f / \partial t + \vec{v} \cdot \partial f / \partial \vec{r} - \nabla \cdot \nabla U \cdot \partial f / \partial \vec{p} = \\ - \int \int [d^3 p_2 d^3 p_1' d^3 p_2' / (2\pi)^6] \sigma v_{12} \\ [f f_2 (1 - f_1') (1 - f_2') - f_1' f_2' (1 - f) \\ (1 - f_2')] \delta^3(\vec{p} + \vec{p}_2 - \vec{p}_1' - \vec{p}_2') \end{aligned}$$

明显地求解这样复杂的非线性积分微分方程几乎是不可能的。事实上, VUU模型并不是方程的直接数值解,而是蒙特卡罗模拟。它

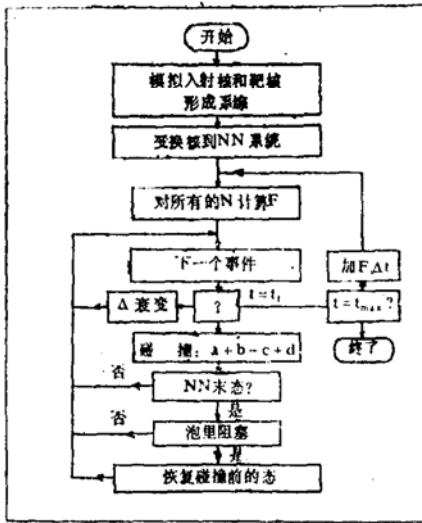


图2. VUU模型流程图

模拟方程所包含的全部物理学,抽取VUU方程的基本思想,同时包括 π 和 $\Delta(1232)$ 共振的产生。

VUU模型的核心是内核级联模型,它同时还考虑了势场和泡里阻塞的效果。图2是计算机的流程图。假定初始核是简单的费米气体。核子在坐标空间中无规则地分布在半径为 $r_0 A^{1/3}$ 的球内,在动量空间中分布在半径为 p_f 的球内,其中 p_f 是费米动量。VUU模型中使用的平均势场是

$$V(\rho) = a\rho + b\rho^c$$

ρ 是核子密度, a 、 b 和 c 是常数。计算定域密度时,考虑该点为中心,半径为 2fm 的球内所含粒子数。对每一事件,由于球内核子数有限,密度将围绕平均值涨落约50%。VUU模型同时模拟相同碰撞参量的15个碰撞事件,求得系综平均密度。关于粒子的碰撞,

模型考虑了核子、 Δ 粒子、 π 介子的同位旋态。

三、压缩核媒质性质的测量

通常把每核子的内能

$$W = W(T, \rho)$$

做为核媒质的态方程。其中 T 是温度, ρ 是核子密度。 W 可以认为是二个独立项的和

$$W(T, \rho) = W_c(\rho) + W_k(T)$$

其中 W_k 是动能, W_c 是每核子压缩能。不同类型的核媒质态方程可由压缩模数 K 来表征

$$K = 9\rho_0^2 [\partial^2 W / \partial \rho^2]_{\rho=\rho_0}$$

1. π 介子多重数 M_{π^-}

为了测量 K , Harris等人^[2]在8种不同的入射能量下测量了 ^{40}Ar 和 KCl 碰撞的负 π 介子多重数。外推实验资料,获得零碰撞参量时的 M_{π^-} 。由于内核级联模型不包括势能, W_c 可由下式决定

$$W_c(M_{\pi^-}) = E_{cm}^{c.p.}(M_{\pi^-}) - E_{cm}^{c.a.}(M_{\pi^-})$$

其中 $E_{cm}^{c.p.}$ 是由实验资料得到的质心系中每核子能量, $E_{cm}^{c.a.}$ 是由Cugnon内核级联模型求得的能量。用级联模型也可得到 M_{π^-} 和 ρ 的关系,转换 $W_c(M_{\pi^-})$ 为 $W_c(\rho)$ 。最后拟合压缩能与假定的抛物线型的态方程

$$W_c(\rho) = K(\rho - \rho_0)^2 / 18\rho_0^2$$

求得 K 。结果指明压缩模量大约是 240MeV 。对这种 W_c 的测量方法虽然存在不同的争议,但是 K 的值与其它模型的预言基本一致。

2. 集合侧向流

当两个核碰撞时,向前方向运动的碎片在作用平面内有偏离入射束轴的集合运动,向后方向的碎片将被推向相反的方向。这种集合侧向流是由于火球达到最大密度时的压缩能转换为火球膨胀时集合流的动能而产生的。集合运动的大小决定于态方程的硬度。近来使用较多的分析方法是横向动量法。这个方法使用矢量

$$\vec{Q} = \sum w_p \frac{\vec{p}}{p}$$

$$w_\nu = \pm 1 \quad \text{重子快度 } y_{cm} \leq \pm \delta$$

$$= 0 \quad -\delta < y_{cm} < \delta$$

估计每一个事件的反应平面。其中 \vec{p}^{ν} 是第 ν 条轨迹的核子的横向动量。量值 $\langle P^{x'}(y) \rangle$ 是在估计作用平面内每个核子横向动量平均分量

$$P^{x'} = (\vec{p}_\nu \cdot \vec{Q}_\nu) / Q_\nu$$

$$\vec{Q}_\nu = \sum_{\mu \neq \nu} w_\mu \frac{1}{p} \vec{p}^\mu$$

条件 $\mu \neq \nu$ 从上述标积中移除了自身关联项。真实作用平面内的分量 P^x 是

$$\langle P^x(y) \rangle = \langle P^{x'}(y) \rangle / \langle \cos\phi \rangle$$

图3是每核子1.2GeV的Ar和BaI₂碰撞的实验资料和VUU的计算结果^[3]。实验和模型比较指明K值约在中等和较硬的区域之间。图中 $\langle P^x(y) \rangle$ 做为快度的函数划分为3个多重数区域，集合流效果在中等多重数处最大。VUU模型成功地预言了集合流对于多重数的依赖关系。

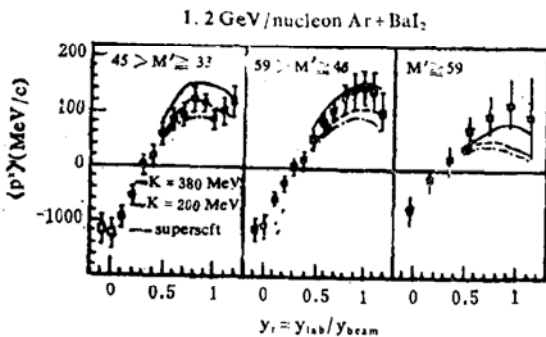


图3. VUU模型对集合流的预言以及和实验的比较

3. π 干涉学

由 π 干涉学可研究 π 发射源的空间形状、展阔、随时间的演变、相干程度、以及有关的动力学信息。测量相对论重离子碰撞时形成的核相互作用区域的时空结构是非常重要的。设若知道了参与者核子的数目，则可直接求得核媒质态方程中的重要参量—密度。有人预言 π 干涉学可能将是检测相互作用区域核媒质相变—夸克胶子等离子体出现的一个重要手段。

两 π 介子的关联函数定义为

$$C(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = P(\vec{k}_1, \vec{k}_2) / P(\vec{k}_1) P(\vec{k}_2)$$

其中 $P(\vec{k}_1 \dots \vec{k}_n)$ 是同一事件中检测到所有动量 \vec{k}_i 的 π 介子的几率。由于全同玻色子波函数的对称化， $1 \leq C(\vec{k}_1, \vec{k}_2) = \lambda \leq 2$ 。 λ 是相干因子。图4的实验资料来自于Bevalac流光室中1.8A GeV的Ar和Pb靶的中心碰撞^[4]。关联函数在小 q 区域有显著的提高，其宽度反比于源的线度进一步通过对多重数的截断， π 介子动量的截断的研究，得到了这种碰撞产生的 π 源的细致空时结构。这些结果阐明了 π 干涉学可以为检测反应动力学的重要手段。

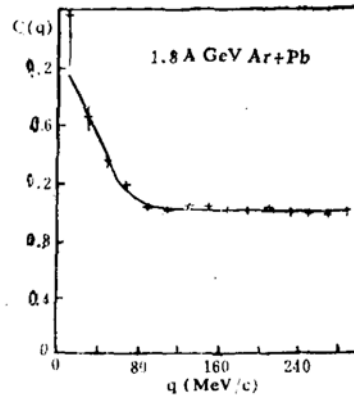


图4. 关联函数实验资料的拟合

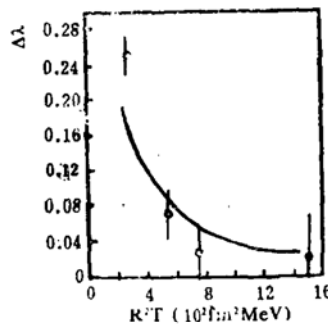


图5. 2π 相干因子畸变,图中四个点是蒙特卡罗的结果

由于高能重离子碰撞是相当复杂的，许多效果，如：末态相互作用，核屏蔽，不同碰撞参量和事件拓扑的平均等都能够影响到 π 干涉学结果的解释。 π 干涉学假设在低相对动量区域关联函数的提高仅仅来自于玻色爱

因斯坦统计,因而检验这个假设是否正确是至关重要的。先验的唯象的高斯模型用于描述相对论重离子碰撞中的 π 发射源,这种先验的假定是否合理也有待探讨。碰撞事件 π 介子的多重性远高于2,因而多重 π 关联的影响必须考虑^[5]。由于实验统计的缺乏,十年来一直局限于 2π 干涉的研究。随着实验技术的改进,理论的逐步发展,多重 π 干涉的研究已经开始^[6,7]。目前 3π 干涉学的分析结果指明,在目前实验精度的范围内,高斯模型是一个自恰的唯象的理论模型,在低相对动量区域关联函数的提高单一的来自于玻色爱因斯坦统计。 3π 干涉学提供了独立地检验 2π 干涉学的结果,以及找到更多动力学的信息的可能。图5指明了 3π 关联对 2π 分析所带来的相干因子的畸变。图中的实线是解析的结果,四个点是蒙特卡罗计算的结果,两者是相当一致的。

四、结束语

本文主要介绍了Bevalac能量下的核-核中心碰撞的研究。Bevalac的能量仅能产生温度大约是50~100MeV,密度大约是2~4倍正常密度的核媒质。但这些条件对于产生夸克胶子等离子体是不充分的。1986年末至1987年初更高能量的美国Brookhaven国立实验室的AGS和欧洲联合核子研究中心(CERN)的SPS分别出束。AGS可加速 ^{16}O 和 ^{28}Si 到每核子14.5GeV,SPS可加速它们到每核子200GeV,开拓了探索核媒质相图中一个未知领域的新时期。通过实验,人们已经开始获得了一系列重要的数据,揭示出了一批新奇的现象。CERN的NA35组使用 π 干涉学对实验分析的结果就是其中之一。他们指出,每核子200GeV的氧核碰撞后所形成的 π 源的横向半径从初始的3fm增长到7fm。这相当于中心能量密度从初始最大值减少了20倍,但是没有看到横向动量分布上的集合流。理论物理学家M.Gyulassy评论时说,如果上述的结果被

证实的话,我们将有由实验资料所提出的第一个真正的谜。产生更接近于早期宇宙条件的无重子的夸克胶子等离子体要求更高的能量,新的更高能量的相对论重离子对撞机(RHIC)已在筹建之中。预期相对论重离子物理学这个前沿科学领域不久将会发生重大的突破。

参考文献

1. J.J.Moitoris, D.Hahn, C.Alonso, I. Collazo, P.D'alessandris, T.McAbce, J.Wilson and J. Zingman, Phys. Rev. C 37, 1014(1988)
2. J.W.Harris, R. Bock, R. Brockman, A. Sandoval, R.Stock, H. Strobele, G. Odynice, H.G. Pugh, L.S. Schroeder, R.E. Renfordt, D. Schall, D. Bangert W. Rauch and K.L. Wolf, Phys. Lett. 153B, 377(1985)
3. D. Keane, S.Y. Chu, S.Y. Fung, Y.M. Liu, L.J. Qiao, G. VanDalen, M. Vient, S. Wang, J.J.Moitoris and H. Stocker, Phys, Rev. C 37, 1447 (1988)
4. D. Beavis, S.Y. Fung, D. Keane, Y.M. Liu, G. VanDalen, M. Vient, Phys. Rev.C34, 757(1986)
5. Y.M. Liu, D. Beavis, S.Y. Chu, S. Y.Fung, D. Keane, G. VanDalen, M. Vient, Phys. Rev. C34, 1667(1986)
6. Y.M. Liu, D. Beavis, S.Y. Fung, D. Keane, G. VanDalen, M. Vient, in Proceedings of International Symposium on Medium Energy Physics, Beijing, 1987, P. 557, edited by H. C. Chang and L.S. Zhen (World Scientific, 1987)
7. D. Olson, W. Christie, T. Abov, D. Beavis, P. Brady, H. Crawford, S.Y. Fung, D. Keane, P.Lindstrom, Y.M. Liu, W. Muller, T. Symons, C. Tull, W. Wieman, in Proceedings of the 8th High Energy Heavy Ion Study, Berkeley, 1987, P. 205, edited by G. Wozniak(LBL, California, 1988)