

对相对论性重核碎片动量分布宽度 理论公式的改进

王淑华 周作旭

(山西师范大学物理系 临汾 041004)

柴正维

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 根据 H. Feshbach 和 K. Huang 关于核碎片动量分布的理论计算和新的假设,可以得到一个新的关于相对论性核碎片的动量分布公式. 该式与实验结果符合较好,它可以大体上解释碎片质量 $K \leq A/2$ 时的实验结果.

关键词 高能核碰撞 核碎片 动量分布宽度

1 引言

相对论性核-核碰撞是近年来科学工作者们研究的热门课题. 核碎片是高能核碰撞后的一类末态粒子. 许多实验对核碎片的动量进行测量,结果发现,核碎片的动量分布具有高斯分布形式,动量分布宽度 σ 与碎片质量有关. H. Feshbach 和 K. Huang (简称 F.H) 根据离散液滴模型对早期的核碎片实验结果进行了理论解释^[1],由他们的推导,碎片的动量分布具有高斯分布形式,但是碎片的动量分布宽度与碎片的质量无关,这与实验结果不相符合. 本文在此基础上通过一定假设,给出与实验结果符合较好的动量分布宽度理论公式,从而进一步证实了离散液滴模型.

2 F.H 公式中存在的问题

F.H 公式依据离散液滴模型. 该模型认为:核内核子在碰撞前就有一定的动量分布,核碎片的动量分布由碰撞前核内核子的动量分布决定. F.H 基于 4 个假设,并运用碎片动量 $p \ll p_{\text{HF}}$ 条件下的近似,得到碎片动量分布,该分布具有高斯形式. 其中 p_{HF} 表示重核的费米动量,约等于 $260 \text{ MeV} / c$ ^[2]. F.H 计算的动量分布由以下两式表示:

$$f(p) \approx \exp(-p^2 / 2\sigma^2), \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{A(n-1)}{3n^2} \langle p_n^2 \rangle, \quad (2)$$

其中, A 为碎裂核质量, n 为末态核碎片数, $\langle p_n^2 \rangle$ 为核内核子的动量平方平均, σ 为高斯分布宽度.

对于费米气体, 以 p_{F} 表示碎裂核的费米动量, 存在

$$\langle p_n^2 \rangle = 3p_{\text{F}}^2 / 5. \quad (3)$$

对 F.H 公式进行分析发现, 近似条件 $p \ll p_{\text{HF}}$ 对质子碎片成立, 对较重的靶核碎片 (例如 ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$) 并不成立. 以 ${}^{16}\text{O}$ ^[3,4] 和 ${}^{56}\text{Fe}$ ^[5] 为例分析:

1) ${}^{16}\text{O}$ 的质子碎片, 其动量的高斯分布宽度约为 $80\text{MeV}/c$, 动量的范围约在 $0-250\text{MeV}/c$ 内. 重靶的费米动量约为 $260\text{MeV}/c$, $p \ll p_{\text{HF}}$ 的条件近似成立.

2) 对于 ${}^{16}\text{O}$ 的 He 碎片, 其动量的高斯分布宽度约 $130-150\text{MeV}/c$, 动量分布范围约在 $0-450\text{MeV}/c$. He 碎片的动量同 p_{HF} 相比并不算小量, $p \ll p_{\text{HF}}$ 的条件不成立.

3) 对于 ${}^{16}\text{O}$ 的 Li 碎片, 其动量的高斯分布宽度约等于 $170\text{MeV}/c$, 动量分布范围约在 $0-550\text{MeV}/c$. $p \ll p_{\text{HF}}$ 的条件也不成立.

4) 实验测得, 比 ${}^{16}\text{O}$ 重的射弹核碎裂后, 它们的 He 碎片动量分布宽度更宽, ${}^{56}\text{Fe}$ 的 He 碎片动量分布宽度达 $220\text{MeV}/c$, 动量范围约在 $0-700\text{MeV}/c$. $p \ll p_{\text{HF}}$ 的条件对 ${}^{56}\text{Fe}$ 的 He 碎片也不成立.

$p \ll p_{\text{HF}}$ 对于较重碎片不成立, 这是 F.H 公式推导中的缺陷, 使得 F.H 公式计算的动量分布宽度与实际动量分布宽度不符合.

3 对核碎片动量分布宽度公式的改进

3.1 假设

碎裂核由 A 个核子组成, 在碰撞发生前, A 个核子有一定动量分布, 动量在核静止系中为球对称分布. 碰撞时, A 个核子重新组合发射出来, 重组过程中, 单个核子的 4 动量保持不变. 以 p_i 表示重组碎片的动量, n 表示碎片数, 在碎裂核静止系中 $\sum_{i=1}^n p_i = 0$.

若实验中探测到质量为 K 的碎片, 则其余 $(A-K)$ 个核子不论如何组合发射, 总可以将它们分成 $(A-K)/K$ 个质量数为 K 的核子集团, $(A-K)/K$ 个核子集团实际上也许并不存在, 但在动量意义上可以这样划分. 这也就相当于在核 A 碎裂之际, 将核内核子划分为 n_K 个核子集团, 每个核子集团具有 K 个核子. 若 n_K 为整数, 令第 j 个集团的动量为 p_j . 在碎裂核静止系中 $\sum_{j=1}^{n_K} p_j = 0$. 其中 $n_K = A/K$ 为可以划分的 K 核子集团数. 求质量为 K 的碎片的动量分布, 相当于求 A 核全部碎裂成 n_K 个碎片时, 碎片的动量分布. 若 n_K 不为整数, $\sum_{j=1}^{n_K} p_j = 0$ 只是一种近似, 在这种情况下, 本文计算的结果与实验结果也符合较好.

3.2 新公式的推导

1) 若实验中探测到一个质量 $K=1$ 的碎片, 依照假设, 认为碎裂核可以从动量意义上划分为 n 组, 每组的质量 $K=1$, 组数 $n=A$. 核 A 碎裂成 $n=A$ 个碎片时, 由式 (3), 并由 $p_{\text{HF}} \geq p_{\text{F}}$, 碎片的动量 $p \ll p_{\text{HF}}$ 成立, 这种情况下可以利用 F.H 计算的式 (2), 得到 A 个核子的动量分布宽度为

$$\sigma^2 (K=1) = \frac{A(n-1)}{3n^2} \langle p_n^2 \rangle. \quad (4)$$

由于 $A = n$, (4)式变为:

$$\sigma^2 (K=1) = \frac{(A-1)}{3A} \langle p_n^2 \rangle, \quad (5)$$

这就是 $K=1$ 碎片的动量分布宽度.

2)若实验中探测到一个质量为 K 的碎片,依假设,将核内 A 个核子划分为 n_k 组, $n_k = A/K$, 每个核子集团质量为 K . 即核由 n_k 个核子集团组成,以核子集团为单位的核其质量数为 A_k , $A_k = n_k \cdot K$.

由 A. S. Goldhaber^[6]的计算,质量为 K 的核子集团的动量平方平均为

$$\langle p_k^2 \rangle = \frac{K(A-K)}{A-1} \langle p_n^2 \rangle. \quad (6)$$

以质量为 K 的核子集团为单位的费米气,其费米动量 $p_{\text{fF}}(K)$ 为

$$p_{\text{fF}}^2(K) = 5 \langle p_k^2 \rangle / 3. \quad (7)$$

以核子集团为单位的重核,其费米动量 $p_{\text{hF}}(K) \geq p_{\text{fF}}(K)$, 核 A_k 碎裂成 n_k 个质量为 K 的碎片时,碎片的动量 $p(K) \ll p_{\text{hF}}(K)$ 近似成立. 这时,利用 F.H 动量分布宽度式(2),得到 K 碎片的动量分布宽度为

$$\sigma^2(K) = \frac{A_k(n_k-1)}{3n_k^2} \langle p_k^2 \rangle. \quad (8)$$

由于 $A_k = n_k \cdot K$ 并利用(7)式,(8)式变为

$$\sigma^2(K) = \frac{n_k-1}{n_k} \frac{K(A-K)}{3(A-1)} \langle p_n^2 \rangle. \quad (9)$$

用 A/K 替换 n_k 得

$$\sigma^2(K) = \frac{K(K-1)^2}{3A(A-1)} \langle p_n^2 \rangle. \quad (10)$$

式(10)即为任意质量碎片的动量分布宽度公式.

4 实验检验及结论

A. S. Goldhaber 的动量分布宽度经验公式为^[6]

$$\sigma_{\text{A.S.G}}^2(K) = \frac{K(A-K)}{3(A-1)} \langle p_n^2 \rangle. \quad (11)$$

式(10)与式(11)相比

$$\sigma^2(K) = \frac{n_k-1}{n_k} \sigma_{\text{A.S.G}}^2(K). \quad (12)$$

表 1 给出了已测得的各种射弹 He 碎片的动量高斯分布宽度,并给出(10)、(11)式的计算结果. 因为弹核碎片中除了⁴He 外,还有³He 同位素. 若假设⁴He:³He = 3.0:1.0, He 碎片的平均质量 $K = 3.75$. 计算中所有的费米动量均来自 Moniz 等^[2]的结果. ¹²C, ¹⁴N, ¹⁶O,

^{32}S , ^{40}Ar , ^{56}Fe 的费米动量分别为: 221、226、230、245、251、260 MeV / c . 表 2 列出了 ^{16}O 与 ^{12}C 的各种 $K \leq A/2$ 碎片的动量分布宽度的实验测量值^[3]以及由式(10)和式(11)的计算结果.

通过比较可以看出,当碎片质量 $K \leq A/2$ 时,基于 F.H 的理论以及将碎裂核进行平分的假设而得到的碎片动量分布宽度公式,可以大体反映核碎片的实际动量分布情况. 但是,当碎裂核质量较大 ($A > 100$) 时,多重碎裂碎片间的末态库仑散射对动量的影响不能忽视^[7]. 由本文推导的式(10)对大质量相对论核进行计算得到的碎片的动量分布宽度与实验测得的结果相差较大,式(10)不能用以解释碎裂核质量较大时的实验结果. 本文推导的结果同样不能解释碎片质量大于 $A/2$ 时的实验结果. 原因可能出于对碎裂核的等分过程.

总之本文所推导的理论公式适用于碎裂核质量 $A < 100$, 并且碎片质量 $K \leq A/2$ 时的情况. 此时式(10)计算的碎片动量分布宽度与实验结果符合较好.

表1 各种弹核He碎片的动量分布宽度

弹核	能量 (GeV/n)	σ (He) MeV / c			文献
		测量值	本文推导 式 (10)	$\sigma_{\text{A.S.G}}$ (He) 式 (11)	
^{12}C	1.05	125±3	137	166	[2]
	2.1	129±1			[2]
^{14}N	2.1	143±5	149	174	[8]
^{16}O	2.1	131±1	157	180	[2]
	200	155±8			[3]
^{32}S	200	169±9	191	203	[9]
^{40}Ar	2.0	179.5±6	200	210	[4]
^{56}Fe	0.9	220±12	211	220	[4]

表2 ^{16}O 与 ^{12}C 的各种 $K \leq A/2$ 碎片的动量分布宽度

束流	能量 (GeV/n)	K	Z_K	σ (K) MeV / c		
				σ_{exp} (K) 实验测量 ^[3]	本文推导 式(10)	$\sigma_{\text{A.S.G}}$ (K) 式(11)
^{16}O	2.10	1	1	71±6	100	103
		2	1	134±3	131	141
		3	1	150±3	150	166
		3	2	156±2	—	—
		4	2	131±1	159	184
		6	2	167±20	163	206
		6	3	141±7	—	—
		7	3	163±4	158	211
		7	4	166±2	—	—
		8	3	170±13	150	212
^{12}C	1.05	1	1	67±5	95	99
		2	1	134±4	122	133
		3	1	138±5	134	155
		3	2	145±8	—	—
		4	2	129±1	137	169
		6	2	136±7	126	179
		6	3	127±7	—	—

作者感谢高能所唐孝威教授对本工作的指导,感谢高能所薛大力博士对本文所提的中肯意见,感谢原子能院周书华教授和华中师范大学刘连寿教授的审阅。

参 考 文 献

- [1] Feshbach, H K. Huang. Phys. Lett., 1973, 47B: 300
- [2] Moniz E J et al. Phys. Rev. Lett., 1971, 26: 445
- [3] Greiner D E et al. Phys. Rev. Lett., 1975, 35: 152
- [4] Adamovich M I et al. Phys. Rev., 1989, C40: 66
- [5] Aggarwal M M, Bhalla, K B Das G et al. Phys. Rev., 1983, C27: 640
- [6] Goldhaber A S. Phys. Lett., 1974, 53B: 306
- [7] Kim Y D, Desouza R T, Gelbke C K et al. Phys. Rev., 1992, C45: 387
- [8] Bhanja R, Shyam M, Tuli S K. Nucl. Phys., 1985, A438: 740
- [9] Adamovich M I et al. Modern Phys. Lett., 1993, A8: 21

Improvement on Momentum Distribution Formula of Relativistic Heavy Ion Fragments

Wang Shuhua Zhou Zuoxu

(Physics Department, Shanxi Normal University, Linfen 041004)

Chai Zhengwei

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract A new formula about the momentum distribution width σ of relativistic heavy ion fragments can be obtained by equally dividing the number of nucleons A in the fragmenting nucleus into groups and using the result derived by H.Feshbach and K. Huang. The new formula can explain the quantity σ of fragments which mass number $K \leq A/2$.

Key words high energy nucleus-nucleus collision, nucleus fragment, momentum distribution width.