

## 一个奇异中子分布结构存在的判据\*

方德清 沈文庆 冯 军 蔡翔舟 苏前敏  
张虎勇 胡鹏云 马余刚

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 通过小液滴模型的中子皮厚度计算出的中子、质子均方根半径之差与实验的比较发现,实验提取的正常核的均方根半径之差与小液滴模型计算基本一致;有奇异中子分布结构(皮或晕)核的均方根半径之差的实验结果比小液滴模型的计算结果有异常增大.提出了一个与分离能相关的有效中子皮厚度,它能很好地反映有奇异中子分布结构核的中子皮厚度的反常增加,建议把它作为奇异中子分布结构存在的判据.

**关键词** 奇异中子分布 中子皮厚度 小液滴模型

### 1 引言

次级束流装置的出现使放射性束流物理成为当前核物理中的研究热点之一.人们通过对从稳定核到滴线核的结构和反应机制等特性的研究发现了许多新的物理现象,而奇异中子分布结构(中子皮或中子晕结构)就是其中最重要的发现之一<sup>[1]</sup>.

实验表明,有奇异中子分布结构的核比邻近核有反常大的核反应总截面、电四极矩和窄的碎裂反应产物动量分布宽度<sup>[1-3]</sup>,许多中子皮或中子晕核就是依据这样的实验结果而被发现的.一般是有中子晕的核具有小的最外层一个中子( $S_n$ )或最外层两个中子( $S_{2n}$ )的分离能,通常小于1MeV.人们通常也在核理论计算的具有小的 $S_n$ 或 $S_{2n}$ 的核中寻找具有中子晕或皮的核.但并非所有 $S_n$ 或 $S_{2n}$ 小的核都有奇异中子分布结构.从核反应总截面实验数据通过Glauber模型提出的核物质密度分布半径显示可以看出,有奇异中子分布结构核的半径比邻近核大很多.根据测不准原理,窄的碎裂反应产物动量分布宽度也是大的核子空间分布的表现之一.在相对论能区(GeV/u),适当选取势参数,用Glauber模型可以较好地拟合核反应总截面;在中能区,用同样的势参数,Glauber模型的计算结果总是比总截面的实验值低.特别有趣的是,中能区Glauber模型的计算结果与

1999-12-02 收稿

\* 国家自然科学基金(19675059),上海市科学技术发展基金(96DX14011),国家杰出青年基金(19625513)和国家重点基础研究发展计划(G200077400)资助

实验值的差距对不同的核是不一样的. 对中子皮或中子晕核, 这种差距大大增强. 为了定量描述这种差距, 文献[4]定义了一个差异因子  $d$ :

$$d = \frac{\sigma_R(\text{exp}) - \sigma_R(\text{Gl})}{\sigma_R(\text{Gl})},$$

式中  $\sigma_R(\text{exp})$  是中能区实验的核反应总截面, 而  $\sigma_R(\text{Gl})$  是势参数可拟合同一反应在相对论能区实验反应总截面的 Glauber 模型用于中能区的计算值. 对稳定核或稳定线附近的核,  $d$  约为 10%—20%, 而对中子皮或中子晕核  $d$  急剧增大, 可达 40%—50%, 所以在系统研究  $d$  与中子过剩自由度或同位旋的依赖关系后, 根据  $d$  的大小可以建议一个核是否有反常核结构. 例如  $^{15}\text{C}$  的  $d$  有反常增强, 因此被认为可能是有奇异中子分布结构的核<sup>[4]</sup>.

虽然有  $S_n$  或  $S_{2n}$ ,  $d$  动量分布宽度、电四极矩等作为分析核是否有奇异中子分布的判据, 但在实验之前, 人们希望有一个简单的量来预测核是否具有奇异中子分布结构. 核的大小是原子核的一个重要性质, 而中子皮厚度或中子半径与质子半径之差也是表征核结构的一个重要物理量. 本文通过对中子皮厚度的研究, 在小液滴模型的基础上提出了与分离能相关的有效中子皮厚度, 并建议把它作为奇异中子分布结构存在与否的判据.

## 2 小液滴模型中子皮

中子皮是指中子和质子密度分布弥散表面之间的距离, 许多文献对此进行了研究<sup>[5]</sup>, 小液滴模型从中子皮的形成原因出发对中子皮进行深入的探讨<sup>[6]</sup>. 小液滴模型认为, 相对中子过剩度为  $I(=(N-Z)/A)$  的核中, 使中子向核表面分布的推力正比于核对称能系数  $J$  与  $I$  之乘积; 而阻止中子皮形成的表面能产生的力正比于中子皮厚度. 同时考虑质子静电能的影响, 通过力的平衡可得到计算中子皮厚度的公式<sup>[6]</sup>:

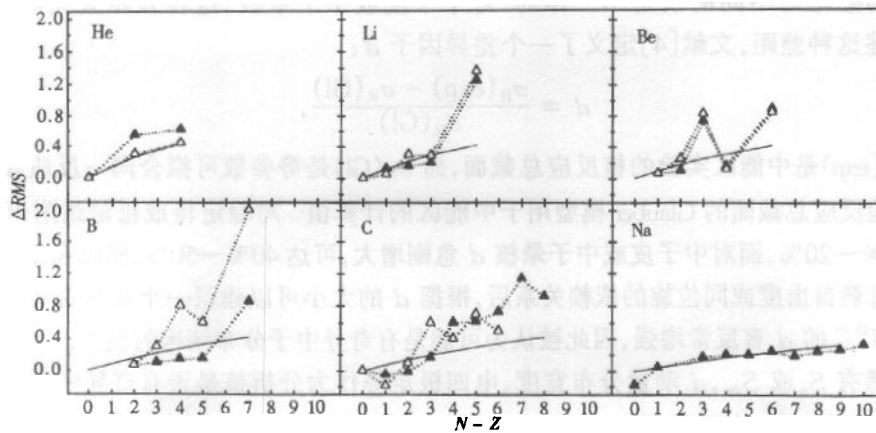
$$t_0 = \frac{3}{2} r_0 \frac{JI - \frac{1}{12} c_1 ZA^{-\frac{1}{3}}}{Q}, \quad (2)$$

式中  $Z$  和  $A$  分别为核电荷数和质量数;  $r_0$  为核半径参数, 取值为 1.18 fm;  $J$  和  $Q$  分别是核对称能和表面能系数, 大小分别为 36.8 MeV 和 17 MeV;  $c_1 = 3e^2/5r_0 = 0.7322 \text{ MeV}$ , 其中  $e$  为电子电荷.

通常中子皮不是直接用中子皮厚度表示, 而是用中子、质子均方根半径之差 ( $\Delta\text{RMS}$ ). 为了便于与实验比较, 小液滴模型给出了  $\Delta\text{RMS}$  与中子皮厚度之间的关系<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\text{RMS} \approx 0.7746 t_0 - (0.000433 \text{ fm}) Z. \quad (3)$$

图 1 对由小液滴模型的中子皮厚度算出的  $\Delta\text{RMS}$  与从实验中提取的结果进行了比较. 从图中可以看出, 对正常结构的核, 实验提取值与小液滴模型的预言基本一致; 对有奇异中子分布结构的核(如  $^{6-8}\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11,14}\text{Be}$ ,  $^{14,17}\text{B}$ ,  $^{19}\text{C}$ ), 从实验提取的  $\Delta\text{RMS}$  比小液滴模型的计算结果异常增大, 且比相邻的没有奇异中子分布结构的核大. Na 同位素被认为是有中子皮结构的核, 但它的  $\Delta\text{RMS}$  实验值与小液滴模型的计算结果基本一致. 在计算实验的  $\Delta\text{RMS}$  时, 从高能核反应总截面提出的核物质半径  $r_m$  和质子半径  $r_p$  取自文献[7]的平均值. 对中子晕核或没有准确的质子半径实验值的核, 计算中取核芯的质子半径, 再通过

图 1  $\Delta RMS$  与  $(N-Z)$  的关系

——小液滴模型的计算结果,  $\blacktriangle$  从高能核反应总截面提出的实验值,  $\triangle$  从中能核反应总截面提出的实验值.

$$r_m^2 = (Z/A)r_p^2 + (N/A)r_n^2 \quad (4)$$

算出中子半径  $r_n$ . 由于文献[7]中没有给出准确的 C 同位素的质子半径实验值, 因此 C 同位素的质子半径都取为  $^{12}\text{C}$  的质子半径, 中子半径再由(4)式算出. 从中能核反应总截面提出的核物质半径是由 Glauber 模型拟合中能核反应总截面得到的<sup>[8]</sup>. 对每一种同位素, 再归一到从高能核反应总截面实验数据提出稳定核的核物质半径, 质子半径取值与高能时相同, 再用(4)式算出中子半径. 这样得到的结果显示, 有的核高能和中能的实验结果不一致, 这需要更多更精更好的核半径提取方法.

### 3 有效中子皮

小液滴模型能较好地拟合正常核的中子皮厚度, 但不能解释有奇异中子分布结构核的中子皮厚度的反常增加. 由于最后一个或二个中子的分离能小是奇异中子分布结构存在的重要依据之一, 我们试着用下式表示有效中子皮厚度

$$t = \frac{1}{k} \frac{\hbar}{\sqrt{mS}} t_0, \quad (5)$$

式中  $m$  为核子质量,  $\hbar$  是普朗克常数;  $S$  是分离能, 取最后一个或二个中子的分离能的较小者.  $k$  为常数, 取值为  $2.25\text{fm}$ . 对所有的核素, 中子皮厚度可以非常容易地计算出来.

图 2 给出了有效中子皮和小液滴模型中子皮与  $(N-Z)$  的关系, 计算中分离能取自文献[9]. 可以看出, 对正常核有效中子皮厚度与小液滴模型中子皮基本一致; 对所有实验证实的有奇异中子分布结构的核, 如  $^{6,8}\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11,14}\text{Be}$ ,  $^{14,17}\text{B}$ ,  $^{19}\text{C}$ , 有效中子皮厚度有一反常增加; 其它一些有效中子皮厚度偏离小液滴模型中子皮的核还没有很好的反应总截面的实验数据.

为了更好地描述从实验数据得到(有效中子皮算出)的与小液滴模型中子皮算出的  $\Delta RMS$  之间的差别, 我们定义差异因子

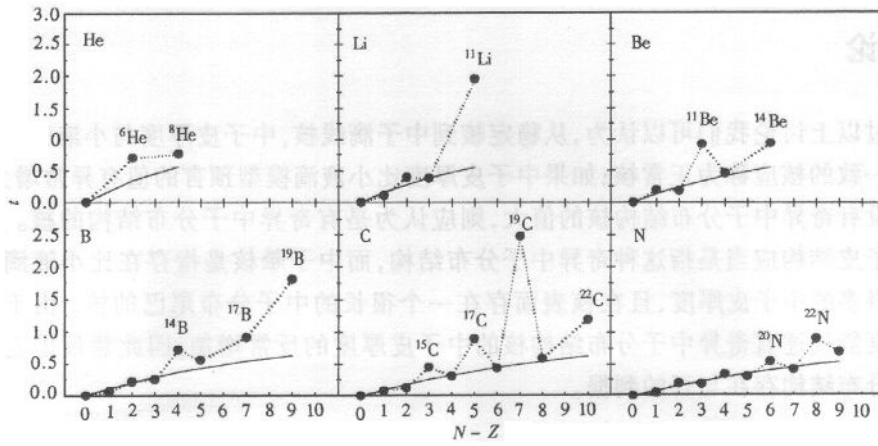


图 2 有效中子皮厚度与小液滴模型中子皮厚度的比较

—小液滴模型中子皮, ●有效中子皮.

$$dr = \frac{\Delta RMS - \Delta RMS(DM)}{r_m(DM)}, \quad (6)$$

其中  $\Delta RMS(DM)$  为由小液滴模型算出中子、质子均方根半径差,  $r_m(DM)$  为小液滴模型的核物质半径<sup>[10]</sup>. 当  $\Delta RMS$  取实验值时得到的实验差异因子为  $dr(exp)$ , 而  $\Delta RMS$  取有效中子皮的计算值(用(3)式计算)时, 则得到的有效差异因子为  $dr(eff)$ .

图 3 给出了差异因子  $dr$  与  $(N-Z)$  的依赖关系. 从图中可以看出, 有效中子皮厚度算出的结果与实验值能很好地符合. 正常核的  $dr$  几乎为 0, 对有奇异中子分布结构的核,  $dr$  存在反常增加, 一般大于 10%, 且比相邻的没有奇异中子分布的核要大. Na 同位素的差异因子几乎为 0.

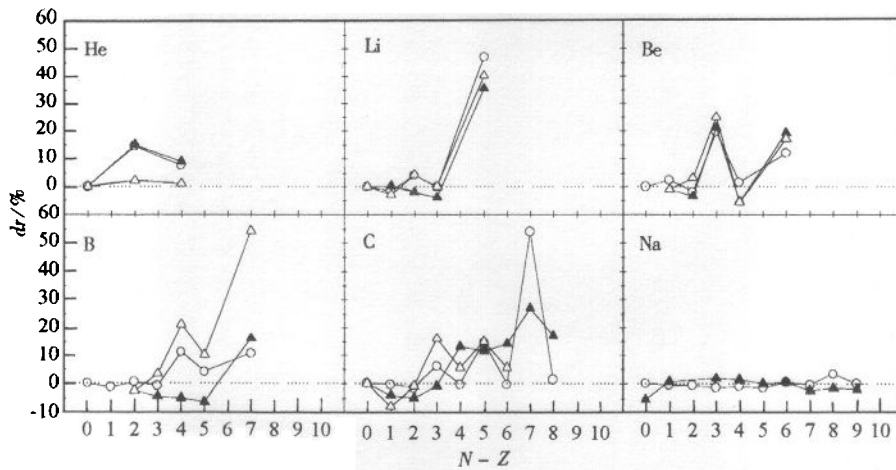


图 3 差异因子  $dr$  随  $(N-Z)$  的变化

○有效中子皮算出得结果. 其它符号说明同图 1.

## 4 结论

通过以上讨论我们可以认为,从稳定核到 neutron halo 核,中子皮厚度与小液滴模型中子皮基本一致的核应称为正常核;如果中子皮厚度比小液滴模型预言的值有异常增大,且比相邻的没有奇异中子分布结构核的值大,则应认为是有奇异中子分布结构的核。通常所说的中子皮结构应当是指这种奇异中子分布结构,而 neutron skin 是指存在比小液滴模型中子皮大得多的中子皮厚度,且在核表面存在一个很长的中子分布尾巴的核。由于有效中子皮厚度能描述有奇异中子分布结构核的中子皮厚度的反常增加,因此建议把它作为奇异中子分布结构存在与否的判据。

### 参考文献(References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676
- 2 Minamisono T, Ohtsubo T, Minami T et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2058
- 3 Kobayashi T, Yamakawa O, Omata K et al. Phys. Rev. Lett., 1988, **60**:2599
- 4 Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T et al. Nucl. Phys., 1996, **A608**:63
- 5 Swiatecki W J. Phys. Rev., 1955, **98**:204; Burhop E H S, Davis D H, Sacton J et al. Nucl. Phys., 1969, **A132**:625; Auerbach N, Hufner J, Kerman A K et al. Phys. Rev. Lett., 1969, **23**:484
- 6 Myers W D, Swiatecki W J. Nucl. Phys., 1980, **A336**:267
- 7 Tanihata I, Kobayashi T, Yamakawa O et al. Phys. Lett., 1988, **B206**:592; Tanihata I, Hirata D, Kobayashi T et al. Phys. Lett., 1992, **B289**:261; Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L et al. RIKEN-ANP-294(1998); Suzuki T, Geissel H, Bochkarev O et al. Nucl. Phys., 1998, **A630**:661
- 8 Warner R E, Patten R A, Voles P M et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1700; Villari A C C, Mittag W, Plagnol E et al. Phys. Lett., 1991, **B268**:345; Saint-Laurent M G, Anne R, Bazin D et al. Z. Phys., 1989, **A332**:457
- 9 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1993, **A565**:66
- 10 Myers W D, Schmidt K H. Nucl. Phys., 1983, **A410**:61

## A New Criterion for Nuclei with Anomalous Neutron Distribution

Wen-Qing FENG Jun CAI Xiang-Zhou

**Abstract** Comparison of the difference between the neutron and proton *RMS* radii,  $\Delta RMS$ , calculated from the neutron skin thickness of the droplet model was made with the data obtained from the experimental total nuclear reaction cross section. It was found that the droplet model reproduced the  $\Delta RMS$  of normal nuclei well, but it underestimates the  $\Delta RMS$  for neutron skin and neutron halo nuclei. Since the small separation energy of last one or two neutron is one of the most important causes of the appearance of anomalous nuclear structure, an effective neutron skin thickness was used to distinguish nuclei with anomalous neutron distribution from normal nuclei, which succeeds to reproduce the abnormal increase of the neutron skin thickness for the light nuclei with neutron skin or neutron halo.

**Key words** anomalous neutron distribution, neutron skin thickness, droplet model

---

Received 2 December 1999

\* Supported by NSFC (19675059), Shanghai Science and Technology Development Fund (96DX14011), the National Science Fund for Distinguished Young Scholar (19625513) and Major State Basic Research Development Program (G200077400)