

反质子与原子核弹性散射的分析*

李扬国

(汕头大学, 广东)

摘 要

用反质子与核的光学势分析了反质子入射能量为 50 MeV 和 180 MeV 时 ^{12}C , $^{16,18}\text{O}$, ^{40}Ca 和 ^{208}Pb 核的弹性散射微分截面. 讨论了反质子光学势是强吸收型的特点. 从寻找最佳符合实验的光学势分析中发现: 弥散参数 a 的可变性很小, 且它随核的增大而增大. 光学势的实部是一个浅位. 光学势在核中的吸收系数趋于零, 因此弹性散射主要发生在核的表面.

一、引 言

研究反质子与原子核的相互作用是最近很受重视的问题. 为了获得反质子束流, 西欧核子中心 (CERN) 建立了一个低能反质子贮存环装置 LEAR, 把 PS 26 GeV/c 高能下反质子降低到很低能量, 这样可用于反质子与原子核相互作用的精细测量. 并已作出一批实验. 这些结果与同样的质子核弹性散射角分布比较, 有明显不同, 主要出现前所未见的绕射花纹^[1,2], 且随核的增大, 能量的增高越来越明显. 这些结果是引起人们极大兴趣去研究反核子与核相互作用的事例. 在反核子与原子核相互作用时, 人们会遇到很强的吸收问题, 弹性散射实验表明的现象只是一部分证据. 今天人们希望通过反质子与原子核的相互作用了解反物质在核中可能有的行为. 如由 $\bar{N}N$ 的湮灭现象引导到 \bar{p} 与核的强吸收作用或 \bar{p} 在核中湮灭的特点. 通过 \bar{p} 与核的弹性散射或非弹性散射数据, 再加上模型的帮助, 例如用光学模型的分析^[3], 从而对 \bar{p} -核相互作用的主要特点有一个初步的认识^[4]. 人们还想通过 (\bar{p}, p) 敲出质子的反应来寻找在 \bar{p} -A 相互作用下存在束缚态或共振态^[5]. 这些要求人们对 \bar{p} -核的平均相互作用有一个基本的认识. 本文的目的是唯象地取反质子与核作用的光学势来分析目前已有 \bar{p} -核的弹性散射微分截面. 通过分析, 了解光学势有哪些主要特点. 例如它随能量、靶核有什么变化, 有哪一些不确定因素.

在第二节中, 我们将讨论反质子光学势应该有哪些特点. 在第三节中用唯象的光学势分析不同核, 不同能量的弹性道微分截面. 在第四节中进一步分析在核中反质子被吸收的特点. 最后是小结.

* 国家自然科学基金资助课题.
本文 1987 年 4 月 20 日收到.

二、反质子与核作用光学势的描述

绕射的现象表明反质子与原子核发生多次碰撞。可以用多次散射理论来导出弹性散射道的光学势。在冲量近似下,光学势可表为^[6]:

$$U_{\bar{N}}^{(opt)}(\mathbf{r}) = \left\langle \varphi_0 \left| \sum_{j=1}^A t_{\bar{N}N}(j) \right| \varphi_0 \right\rangle \quad (1)$$

其中 φ_0 为核多体基态, $t_{\bar{N}N}$ 为反质子与核子作用的 t 矩阵, 它与 $\bar{N}N$ 相互作用势 $V_{\bar{N}N}$ 的关系为

$$t_{\bar{N}N} = V_{\bar{N}N} + V_{\bar{N}N} g t_{\bar{N}N} \quad (2)$$

g 为格林函数。从介子交换理论, 反核子与核子的相互作用势 $V_{\bar{N}N}(r)$ 与核子-核子相互作用势 $V_{NN}(r)$ 之间可以通过 G 宇称变换而得:

$$V_{\bar{N}N}(r) = \sum_M (-1)^{G_M} V_{NN}^M(r) \quad (3)$$

G_M 对于 π, ω, δ 介子反号, 对于 η, ρ, ε 介子为正号。由于 ρ 介子与 ω 介子的 G 宇称反号, 因此 $\bar{N}N$ 相互作用中自旋相互作用很弱^[7], 且中心力具有强的吸引力。因此, 在一级近似下, 反质子的光学势可用一复中心势来描述

$$U_{\bar{N}}^{(opt)}(\mathbf{r}) = V_{\bar{N}}(\mathbf{r}) + iW_{\bar{N}}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

它形式上或微观上可由(1)式导出。反质子与核的弹性散射由下面 Schrödinger 方程的散射解求得:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U_{\bar{N}}^{(opt)}(\mathbf{r}) + V_c(\mathbf{r}) \right) \phi(\mathbf{r}) = E\phi(\mathbf{r}) \quad (5)$$

其中 $V_c(r)$ 是反质子与核的库仑相互作用, 一般取电荷均匀分布的结果, 并注意到它是吸引势。将用严格的分波法来求解上面(5)式方程。为此必需对光学势有更具体的描述。我们的目的是在给出一个有依据的半唯象的反质子光学势下, 以此为基础, 分析目前所有的反质子弹性微分截面。以期对反质子光学势有一定量的认识。

利用反质子与核子二体散射振幅与二体 t 矩阵与振幅 $f_{\bar{N}N}(q)$ 的关系, 在 Eikonal 近似下可以导出反质子与原子核的等效光学势^[8]

$$\begin{aligned} U_{\bar{N}}^{(opt)}(\mathbf{r}) &= 2\pi\hbar m f_{\bar{N}N}(0)\rho(r) \\ &= i\hbar v_{\bar{N}} \frac{\sigma_{\bar{N}N}(1 - i\xi)}{2} \rho(r) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式等价于(1)在上述近似下的结果。其中 $v_{\bar{N}}$ 为反质子在入射能量下的速度, $\sigma_{\bar{N}N}$ 为反质子-核子系统总截面, ξ 为振幅实、虚比值, $\rho(r)$ 为核中的物质分布。从(6)式可以得出虚部强度由反质子-核子总截面及反质子的速度确定、实部由实、虚比值进一步确定。

用分波法求解(5)式散射解时, 由于只有中心势及库仑势, 它的散射振幅与分波 S 矩阵的关系为:

$$F(\theta) = \frac{1}{2ik} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) [S_l - 1] e^{2i\sigma_l} P_l(\cos\theta) + f_c(\theta) \quad (7)$$

μ 为

并可

论光
三倍
1791
时;
Saxo

光学

这个
阱强
数寻
此, 要
一步
用, 以
射进V_c(+
+
+
+
+

其中 $f_c(\theta)$ 为库仑散射振幅

$$f_c(\theta) = -\frac{\gamma}{2k} \cos \epsilon c^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \exp \left[2i\sigma_0 - 2i\gamma \ln \left(\sin \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (8)$$

$$\gamma = -\frac{\mu Z e^2}{k}$$

μ 为折合质量, σ_l 为库仑相移, $S_l = \gamma e^{2i\sigma_l}$ 是分波 l 的 S 矩阵. 弹性散射的微分截面为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F(\theta)|^2 \quad (9)$$

并可相应的计算出总吸收截面 σ_R 和总截面 σ_T .

三、微分截面的计算分析

用(6)式描述的反质子光学势,分析现在所有的反质子-核的弹性散射实验. 首先讨论光学势强度. 光学势的虚部比例于 $\sigma_{\bar{N}N}$ 和 $\nu_{\bar{N}}$. 在所讨论的能区, $\sigma_{\bar{N}N}$ 比 σ_{NN} 强约三倍^[9]. $\sigma_{\bar{p}p} = 157\text{mb}$, $\sigma_{\bar{p}N} = 136\text{mb}$. 同时 $\nu_{\bar{N}}$ 比例于入射反质子动量, 对应 48MeV 和 179MeV 分别约为 300MeV/c 和 600MeV/c. 因此虚部很强且随入射动量线性增加. 同时; 实验分析认为实、虚比 ξ 很弱^[10]. 即反质子光学势是强吸收型. 若取位阱形状为 Saxon-Woods 型, 即 $\rho(r) = f_x(r)$

$$f_x(r) = \frac{1}{1 + e^{(r-R_j)/a_j}} \quad j = v \text{ 或 } w \quad (10)$$

光学势的具体形状写为

$$U_{\bar{N}}^{(opt)}(r) = -V_0 f_v(r) - iW_0 f_w(r) \quad (11)$$

这个光学势一共有六个参数; 即位阱深 W_0 , V_0 , 半径 R_j 和弥散度 a_j . 除了上面对位阱强度的初步分析外, 将进一步调节参数, 以寻找最能符合实验的结果. 运用自动变换参数寻求最佳符合的 Saxon-Woods 光学模型程序 SNOOPY8^[11] 进行参数的选取. 即使如此, 要在多维参数空间进行变化选择最优值也是很艰巨之事. 为此, 我们分二步进行. 第一步在给定 W_0 , 初步筛选 r_w , a_v 和 a_w . 第二步, 进而变化 V_0 , r_v . 有时二步反复运用, 以期最后获得与弹性微分截面符合最好的结果. 先以 179.7 MeV 反质子与 ^{12}C 的散射进行分析, 结果画于图 1 中. 图中一共画出六组最佳符合的曲线, 并与实验比较. 对立

表 1 反质子与 ^{12}C 在 $E_{\bar{p}} = 179.7\text{MeV}$ 的最佳光学势参数

$V_0(\text{MeV})$	$W_0(\text{MeV})$	$R_v(\text{fm})$	$R_w(\text{fm})$	$a_v(\text{fm})$	$a_w(\text{fm})$	分 组
+20	+166.5	3.06	2.26	0.52	0.533	1
+41	+217.7	2.57	2.00	0.52	0.563	2
+62	+202.9	2.32	2.00	0.52	0.576	3
+72	+198.6	2.26	2.00	0.52	0.58	4
+82	+195.6	2.15	2.00	0.52	0.584	5
+106	+192.4	2.01	2.00	0.52	0.588	6

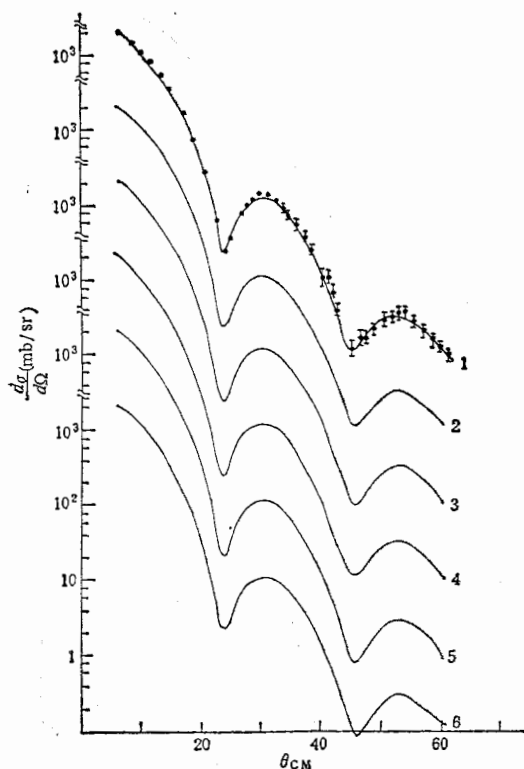


图1 $E_p = 179.7 \text{ MeV}$ $\bar{p}-^{12}\text{C}$ 弹性散射角分布。实线是光学势计算，数字标示表1中所用参数的组数。

● 为实验值

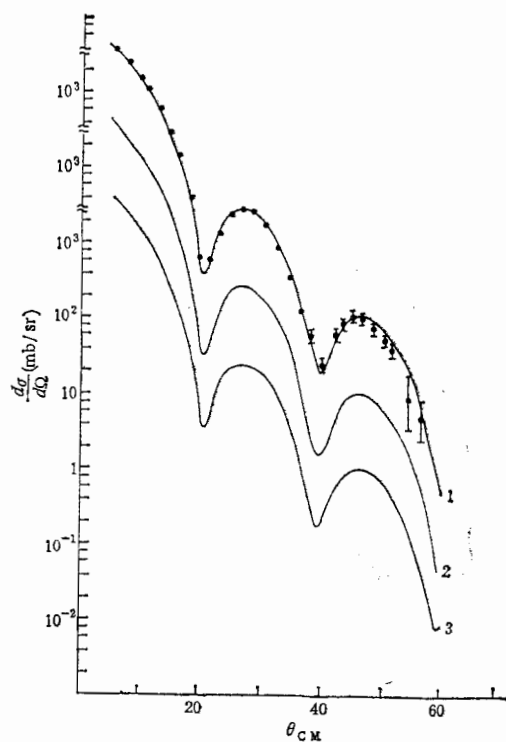


图2 $E_p = 178.4 \text{ MeV}$, $\bar{p}-^{16}\text{O}$ 弹性散射角分布说明同图1

的光学势列于表1中：从图1中可以看到，几乎六组数值都同样好的与实验结果吻合。这些参数对立于弥散参数 a 可以变化的范围是极小的，而对立于实位阱的深度可以有一个比较大的变化范围，如从20至100MeV间变化，与其相匹配的核物质分布半径从3fm-

表2 反质子与核散射在 $E_p = 176 \text{ MeV}$ 时最佳光学势参数

靶核	$V_0(\text{MeV})$	$W_0(\text{MeV})$	$R_V(\text{fm})$	$R_W(\text{fm})$	$a_V(\text{fm})$	$a_W(\text{fm})$	分组
^{16}O	60	200	2.65	2.4	0.55	0.60	1
	70	200	2.52	2.4	0.55	0.60	2
	80	200	2.47	2.4	0.55	0.60	3
^{18}O	60	200	2.7	2.31	0.57	0.61	1
	70	200	2.69	2.31	0.57	0.61	2
	80	200	2.57	2.31	0.57	0.61	3
^{40}Ca	80	200	3.59	3.42	0.54	0.62	1
	90	200	3.93	3.59	0.54	0.62	2
	120	200	3.76	3.59	0.54	0.62	3
^{208}Pb	15	200	8.414	6.517	0.71	0.71	1
	20	200	7.88	6.517	0.70	0.72	2
	120	200	6.517	6.517	.70	0.72	3

2f
普
见

Me

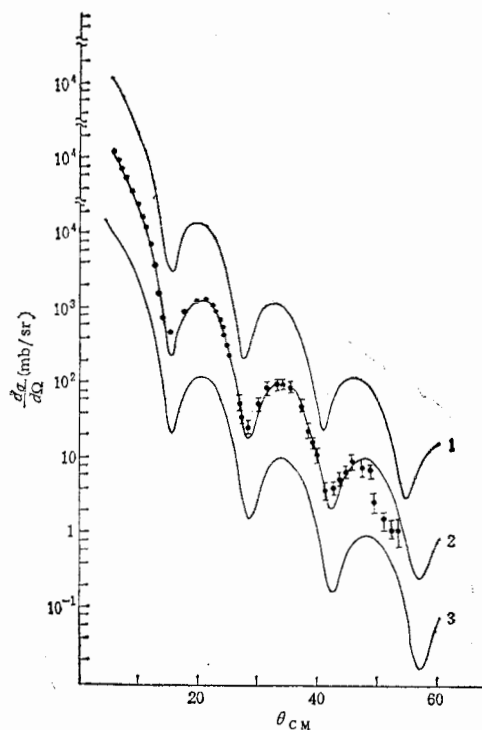


图 3 $E_{\bar{p}} = 179.8 \text{ MeV}$, \bar{p} - ^{40}Ca 弹性散射角分布, 说明同图 1

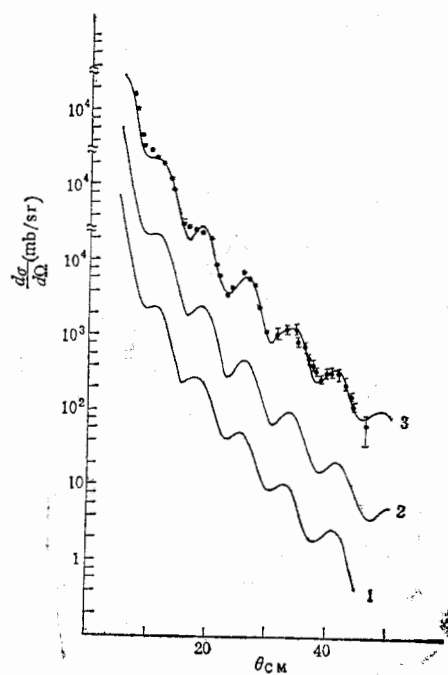


图 4 $E_{\bar{p}} = 180.3 \text{ MeV}$, \bar{p} - ^{208}Pb 弹性散射角分布, 说明同图 1

2fm 中变化。这是一个很有意思的现象, 下面将进一步讨论。为了了解反质子光学势的普遍特点, 对已有在 180MeV 入射反质子的实验结果, 都进行相似的计算分析, 部分结果见图 2—4。所有光学势参数列于表 2 中。

从上节的讨论, 认为虚部势阱不应随粒子数有显著变化, 故这些计算取 W_0 为 200 MeV。其他的参数, 按上述方法反复寻找而得的最佳符合结果。从图和表的结果表明所

表 3 反质子与核散射在 $E_{\bar{p}} = 48 \text{ MeV}$ 时最佳光学势参数

靶核	$V_0(\text{MeV})$	$W_0(\text{MeV})$	$R_V(\text{fm})$	$R_W(\text{fm})$	$a_V(\text{fm})$	$a_W(\text{fm})$	分组
^{12}C	0	110	2.289	2.404	0.52	0.54	1
	7	110	2.289	2.404	0.52	0.54	2
	20	110	2.289	2.404	0.52	0.54	3
	25	61	2.793	2.676	0.56	0.56	4
^{40}Ca	30	110	4.104	3.762	0.62	0.62	1
	40	110	3.865	3.762	0.62	0.62	2
	50	110	3.694	3.762	0.62	0.62	3
^{208}Pb	10	110	7.11	6.517	0.71	0.71	1
	20	110	6.517	6.517	0.71	0.71	2
	30	110	6.221	6.517	0.71	0.71	3

采用的光学势能够描述已有的实验。同一实验能为多组的光学势参数所满足。这些参数的特点主要是有确定的弥散系数 a ，位

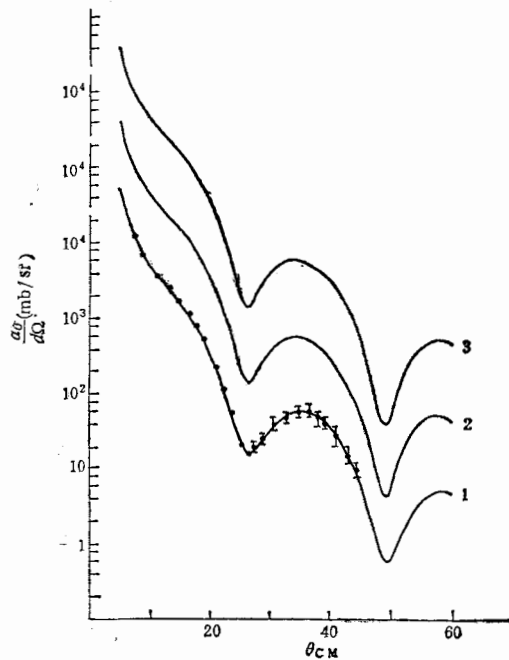


图5 $E_p = 47.8\text{MeV}$, $\bar{p}-^{40}\text{Ca}$ 弹性散射角分布, 说明同图1

阱的实部可以有一个很大的变化区, 约 $(1/2)W_0$ 到很低值。相应的分布半径, 在核的平均半径左右变化。

随着原子核的增大而增大。实位阱是一个浅位阱, 它的强度在一个较大的范围内变化。大致从 $1/2 W_0$ 到很浅的范围。与期相匹配的分布半径 R_V 在平均半径的左右一个区间中变化。

四、反质子光学势的吸收特性

上述反质子-核的光学势有一显著特点, 便是虚位阱很强。这是反核子与核子相碰时发生湮灭现象, 导致反质子与核散射过程有很强的吸收。这与核子-核的光学势很不相同, 它在低能区是弱吸收型。

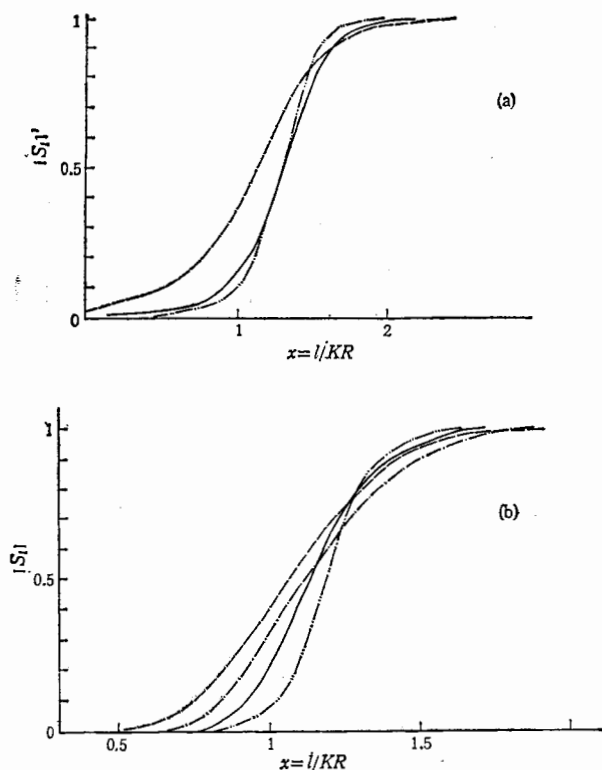
用这一光学势计算吸收截面 σ_R , 并与实验^[12]比较, 符合得很好。为了进一步看清靶核对反质子的吸收情况, 计算了各分波的吸收系数 $|S_l| = |e^{2i\delta_l}|$ 。并画出它与 $x = 1/kR$ 的关系。其中 $R = 1.2A^{1/3}$ 为核的平均半径。 k 为入射反质子的动量。这些计算对应于不同组的光学势参数几乎看不出变化, 画不出它们的区别。结果画于图6中。从图中的结果, 明显地看到, 在原子核里, 反质子很快的被吸收。以 180MeV 为例, 对于 ^{12}C 靶在 $0.74R$ 处散射波的 90% 被吸收掉。相对立的位置是 ^{18}O , ^{16}O 在 $0.82R$, ^{40}Ca 在 $0.93R$, ^{208}Pb 在 $1.04R$ 处。对应于 48MeV 的情形, ^{12}C 在 $0.5R$, ^{40}Ca 在 $0.9R$, ^{208}Pb 在 $1R$ 处 90% 的散射波被吸收。这些结果表明轻的靶核, 反核子穿入到核里的部位深于重的靶核。这点可以认为反质子在确定能量入射情况下的吸收依赖于它穿过靶核时的路程。这个路程如大

在低能区, 反质子能量为 48MeV 的实验看到弹性散射的微分截面仍有明显的绕射花纹。上面已指出, 光学势的虚部比例于 v_N , 它比 180MeV 时约小一倍, 而 σ_{NN} 则略增大^[9]。这样取 W_0 为 110MeV 。用同样二步调节的方法, 寻找最佳符合实验的光学势参数。所用参数列于表3中, 篇幅限制, 只画 ^{48}Ca 于图5中。低能的计算结果及与实验比较, 得到和 180MeV 时同样的特点。

从弹性散射角分布这些分析中可以看到, 反质子的光学势具有很强的吸收。势阱虚部的强度由 σ_{NN} 和 v_N 确定。故随着入射能量上升而增大。弥散参数 a_V , a_W 可变动的范围是极小的。且随

于反核表面在核

与核上升, 计算布形, 但不

图6 吸收系数 $|S_1|$ 与 $x = l/KR$ 的关系(a) $E_p = 178\text{MeV}$ (b) $E_p = 48\text{MeV}$ ----- ^{12}C , -.-.- ^{16}O , -.-.- ^{208}Pb , —— ^{40}Ca

于反质子与核子碰撞湮灭所需的平均作用路程 S_0 时，反质子即被靶核全吸收去。若把靶核视为一个球体，重核半径 R 大，对应于反质子的穿透厚度增大。因此反质子要越接近核表面才不被吸收。在吸收的区域，弹性道不发生。因此对于反质子的弹性散射，主要发生在核的表面。

五、小 结

在唯象的情况下，用强吸收型的光学势计算分析了能量为 48MeV 和 179MeV 反质子与核的弹性散射。这些核是 ^{12}C ， $^{16,18}\text{O}$ ， ^{40}Ca 和 ^{208}Pb 。吸收势的深度随入射反质子的动量上升而加深。在 Saxon-Woods 型的光学势下，它的实位阱是较浅或很浅。在所有的计算， V_0 约为 $\frac{1}{2}W_0 - \frac{1}{5}W_0$ 或更浅。而对应于浅位阱要求有较大的分布半径。所有的计算都很好解释现有的微分截面 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 实验和吸收截面 σ_R 。这一些表明弹性散射角分布形状主要由核的强吸收引起的绕射所决定。实位阱对角分布形状的变化有一些影响。但不是决定性的。

一
致
立
约
的
显
一
为
致
致
5
得
以
致
致
致
大
中

时
相
靶
核
子
的
在
Pb
散
可
大

从吸收系数与核半径的关系看到反质子光学势具有很强的吸收。在核中几乎是黑的。象一个黑碟,但还不是一个黑体。用黑体 ($V_0 = 0$) 的结果,未能很好的描述角分布。核的透明度随着核越重越弱。

认为光学势自旋轨道力是次要而忽略。目前未有自旋依赖的观察量出现。还将进一步探讨这样的忽略是否适当。

计算中,使用 SNOOPY 8 光学势程序。特此对 P. Schwandt 的帮助表示谢意。

参 考 文 献

- [1] D. Garreta et al., *Phys. Lett.*, **135B**(1984), 266.
- [2] D. Garreta et al., *Phys. Lett.*, **139B**(1984), 464;
149B(1984), 64; **151B**(1985), 473.
- [3] S. Janouin et al., *Nucl. Phys.*, **A451**(1986), 541;
H. Heiselberg et al., *Nucl. Phys.*, **A446**(1985), 637.
- [4] J. Lichtenstadt et al., *Phys. Rev.*, **C32**(1985), 1093; K-l. Kubo, *Phys. Lett.*, **153B**(1985), 195.
- [5] D. Garreta et al., *Phys. Lett.*, **150B**(1985), 95.
- [6] A. K. Kerman et al., *Ann. of Phys.*, **8**(1959), 551.
- [7] C. B. Dover and J. M. Richard, *Phys. Rev.*, **D17**(1978), 1770.
- [8] Li Yang-guo and Chiang Huan-ching, *Nucl. Phys.*, **A454**(1986), 720.
- [9] C. Bricman et al., *Phys. Lett.*, **75B**(1978), 1.
- [10] O. D. Dalkarov, *Nucl. Phys.*, **A445**(1985), 579.
- [11] P. Schwandt., IUCF Report, No 32—3.
- [12] F. Balestra et al., *Phys. Lett.*, **149B**(1984), 69;
H. Aikara et al., *Nucl. Phys.*, **A360**(1981), 291.

ANALYSIS OF ANTIPROTON-NUCLEUS ELASTIC SCATTERING

LI YANGGUO

(Shantou University, Guangdong)

ABSTRACT

The antiproton-nucleus elastic scattering differential cross section of ^{12}C , $^{16,18}\text{O}$, ^{40}Ca and ^{208}Pb at incident energies 50 MeV and 180 MeV have been calculated and analysed by optical potential. It is shown that the antiproton optical potential have strong absorption characteristics. It analyzing the optical potential parameters to best fit the experimented data, it is found that the diffuseness parameters could vary only in a narrow region and increased with heavier nuclei. These optical potential have shallow real parts. The absorption coefficients approach to zero inside the target nucleus, so that the elastic scattering takes place at the surface region of nucleus.

分工
背角
给出
偏离
的考

核上
新的

子做
进而
输入
一定
以 π -

看它