§ 8.7 原子核的高自旋态与超形变

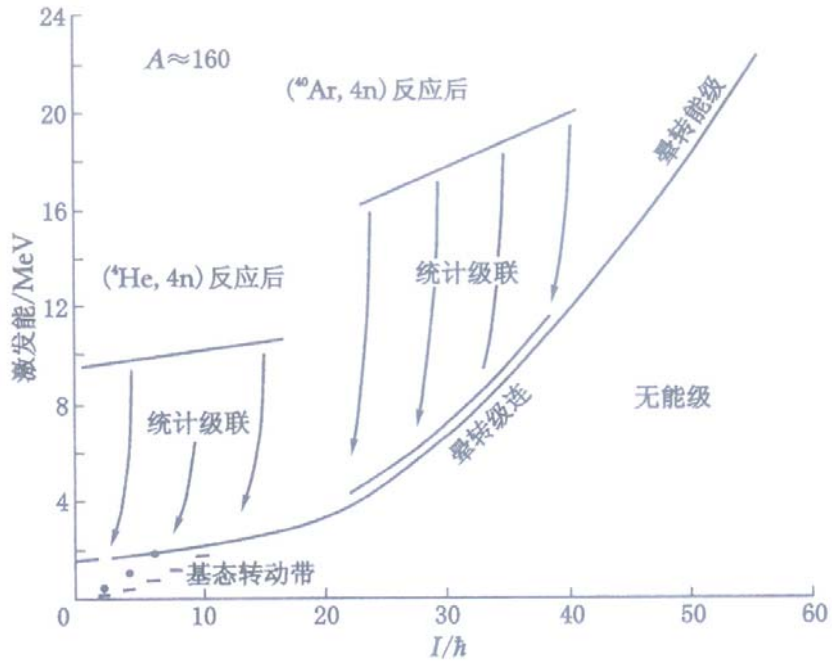


图 8-26　用(^{40}Ar,4n)反应在 $A\approx160$ 附近形成的激发态及其衰变过程

[引自 J. O. Newton et al., Nucl. Phys. A141,631(1970).]

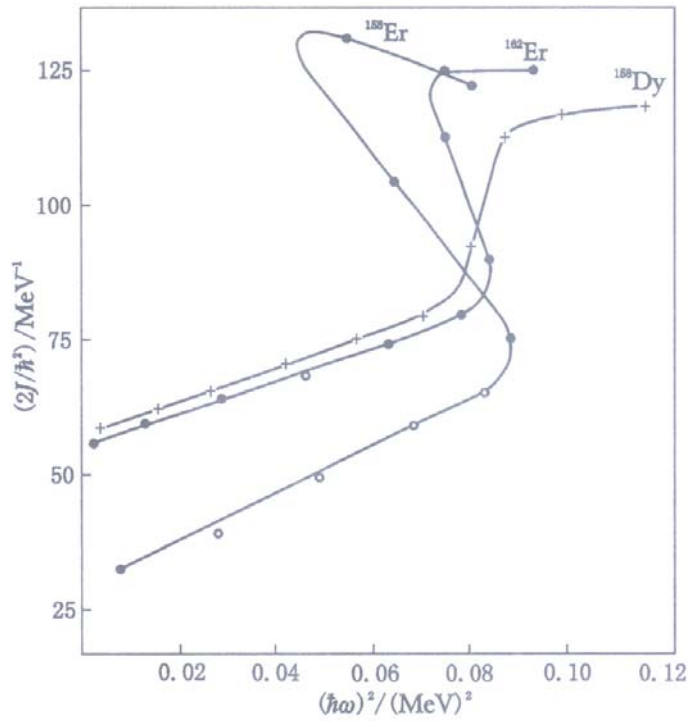
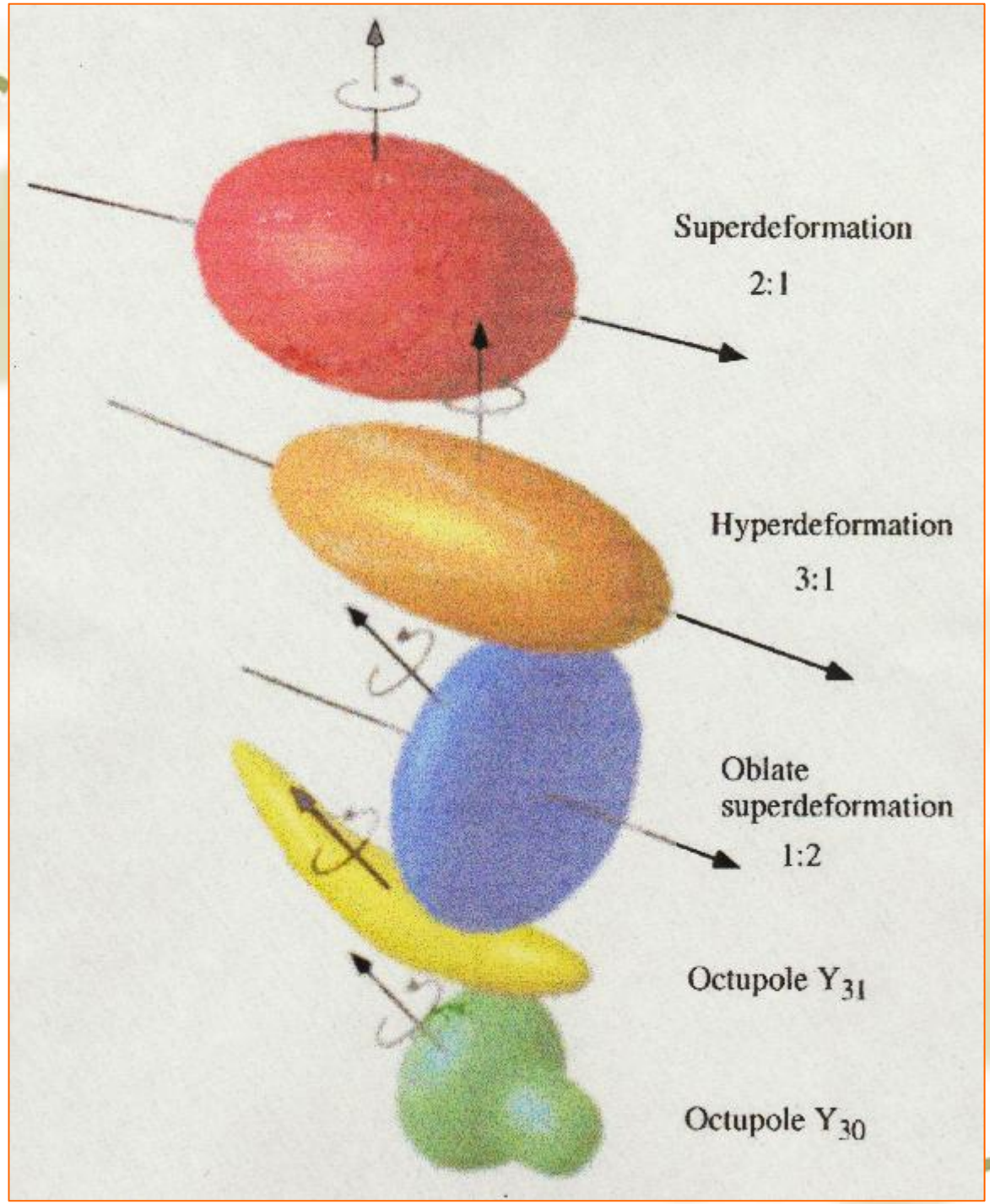


图 8-27　变形核高自旋态中的回弯现象

[引自 J.H. Hamilton et al., Phys. Today,26,4,42(1973).]


Superdeformation
2:1
Hyperdeformation
3:1
Oblate
superdeformation
1:2
Octupole Y_{31}
Octupole Y_{30}

§ 8.8 原子核的非核子自由度

涉及到原子核结构的介子和夸克自由度，可视为是传统核物理与粒子物理的交叉。

1. 电子散射与 EMC 效应

按至今为止的认识，电子仍然是一个点粒子，而且电磁相互作用可以在量子电动力学的框架下精确计算。因此，用电子作为微观体系的探针有特别的优越性。

如果将原子核视为带 Ze 电荷的点粒子，可得电子在点电荷上的卢瑟福散射截面：

$$(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\text{Rutherford}} = \frac{(Ze^2)^2}{(4\pi\varepsilon_0)^2 4E^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \qquad (8.8-1)$$

在考虑到自旋的作用后，应修正为窦特(Mott)截面：

$$(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\text{Mott}} = (\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\text{Rutherford}} (1-\beta^2 \sin^2(\frac{\theta}{2})) \qquad (8.8-2)$$

其中β＝v/c。由于原子核并不是点粒子，它的电荷有一定的空间分布，实验测得的截面应为：

$$(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\text{exp}} = (\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\text{Mott}} \cdot |F(q^2)|^2 \qquad (8.8-3)$$

其中 $q = 2p\sin(\theta/2)$ 是动量转移，$F(q)$ 称为形状因子。可以证明在一级近似下，$F(q)$ 就是原子核的电荷分布 $f(r)$ 的富里叶变换：

$$F(q^2) = \int e^{iq.r/\hbar} f(r)\mathrm{d}^3 r \qquad (8.8-4)$$

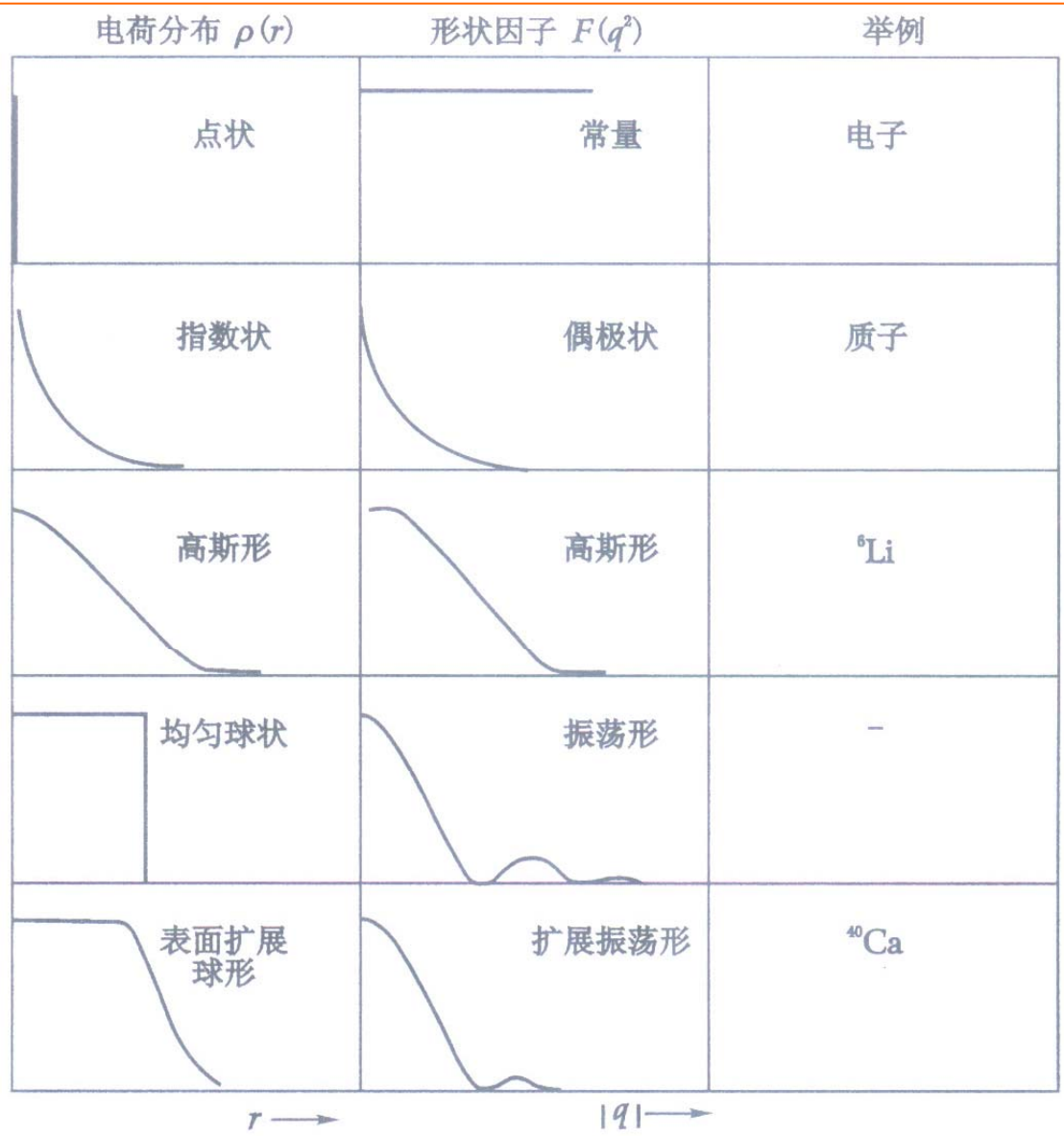


图 8-28　在玻恩近似下电荷的空间分布与形状因子间的关系[①]

由实验测量得到 $F(q)$，就可以通过富里叶逆变换确定核的电荷分布。这样的实验要求电子的波长小于核的尺度，一般需要几百 MeV 以上。当电子能量达到 1GeV 以上，即波长远小于 1fm 时，通过散射可以“看” 到核子内部的电荷分布。这时，除了电子电荷与核电荷之间的电作用之外，还必须考虑电子流与核子磁矩间的磁相互作用。这时，散射截面可以表达为：

$$(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\exp}=(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\mathrm{Mott}}[\frac{(G_{\mathrm{E}}{}^{2}(Q^{2})+\tau G_{\mathrm{M}}{}^{2}(Q^{2})}{1+\tau}+2\tau G_{\mathrm{M}}{}^{2}(Q^{2})\tan^{2}(\frac{\theta}{2})] \qquad (8.8-5)$$

这儿，Q 是四维动量转移，$G_{\mathrm{E}}(Q^{2})$ 和 $G_{\mathrm{M}}(Q^{2})$ 是电形状因子和磁形状因子。$\tau=q^{2}/(4M^{2}c^{2})$，其中 M 是核子的质量。从电、磁形状因子可以推出核子的电荷与电流分布。六十年代末期在斯坦福大学的 SLAC 实验室等进行了广泛的测量。实验数据分析表明，质子内电荷的分布即不是点状的，也不是均匀的，而是指数状的（见图 8－28）：

$$\rho(r)=\rho(0)\mathrm{e}^{-ar},\quad a=4.27\ \mathrm{fm}^{-1} \qquad (8.8-6)$$

而中子内部也有电荷分布，只是从外部看来正负电荷相互抵消。

当入射电子的能量足够高时，可以使核子激发，甚至发射出大量别的粒子。以 E 表示电子的入射能量，E' 表示散射后能量，$\upsilon=E-E'$ 为能量转移，υ 很大的散射称为深度非弹散射。此时，散射截面可以表示成：

$$(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}E})_{\exp}=(\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega})_{\mathrm{Mott}}\cdot[W_{2}(Q^{2},\nu)+2W_{1}(Q^{2},\nu)\tan^{2}(\frac{\theta}{2})] \qquad (8.8-7)$$

W_2 和 W_1 称为结构函数。通常定义洛仑兹不变量 $x=Q^{2}/(2M\upsilon)$，并采用

$$F_{1}(x,Q^{2})=Mc^{2}\,W_{1}(Q^{2},\upsilon)$$

$$F_{2}(x,Q^{2})=\upsilon\,W_{2}(Q^{2},\upsilon) \qquad (8.8-8)$$

作为结构函数的另一表达。当电子波长远小于核子尺度时，实验数据分析发现结构函数基本上与 Q^2 无关。这表明核子内部有点状的子结构。进一步的分析还得出这些点状成分的自旋为 1/2。这为后来的强子的夸克模型提供了有力的证据。

实验发现核的环境有可能改变核子的内部状态。核子的结构函数与核环境有很大的关系，这就是著名的 EMC 效应，是欧洲的 EMC 合作组在 1983 年首次发现的。核越重，EMC 效应越明显。理论上对 EMC 效应进行了多方面的解释，典型的如：不同核子中的夸克间的相互作用；核介质中核子体积的“膨胀”；核子聚合成双核子、三核子等多夸克态；束缚态下核子有效质量的减小；费米运动的影响等等。但直到现在，仍然没有令人满意的结论。

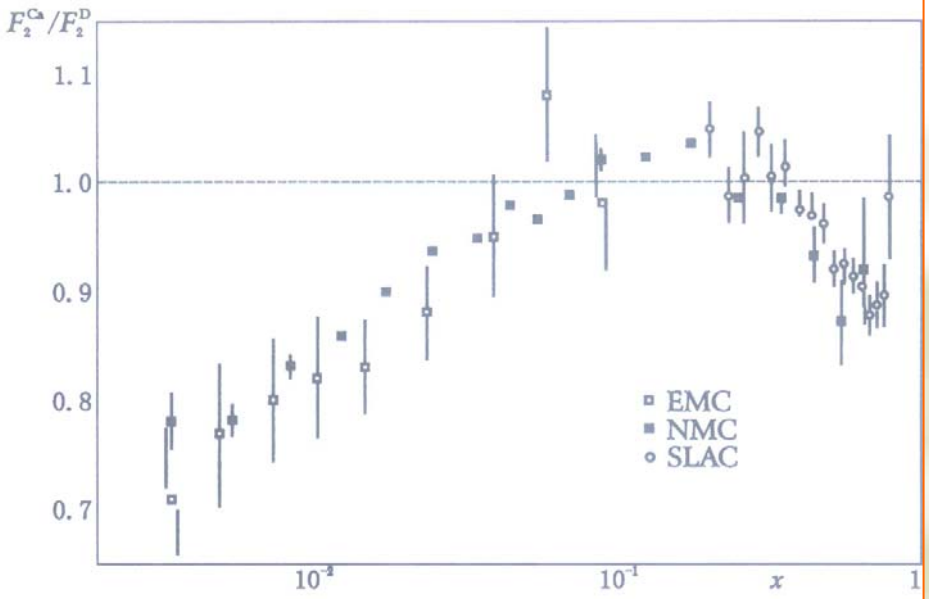


图 8-29 ^{40}Ca 的结构函数与 D 的结构函数之比

[引自 R. G. Arnold et al., Phys. Rev. Lett. 52,727(1994)]

2.介子和夸克

在核力一章中，我们曾谈到核子间的核相互作用可用介子的交换来处理。这意味着由于核力的作用而形成的原子核结构中，也应当体现介子的效应。比如，在带电介子交换时，必然造成相关的电流，它叠加到核子电流上，会造成核磁矩的变化。图8－30显示了在萨克莱测量的^3H的磁矩形状因子及其理论解释，介子自由度的考虑在这儿显然是必要的。人们对原子核结构的认识，与所采用的探针的特性有关。当在核反应中转移给原子核的能量超过π介子静止质量时，自由的介子可以被产生出来。能量转移超过约300MeV时，核子本身可以被激发成Δ共振态，这种激发过程也是由复杂的介子交换引起的。总之，单用核子自由度无法解释许多实验事实，更合适的图象是认为核子的周围还有介子云。

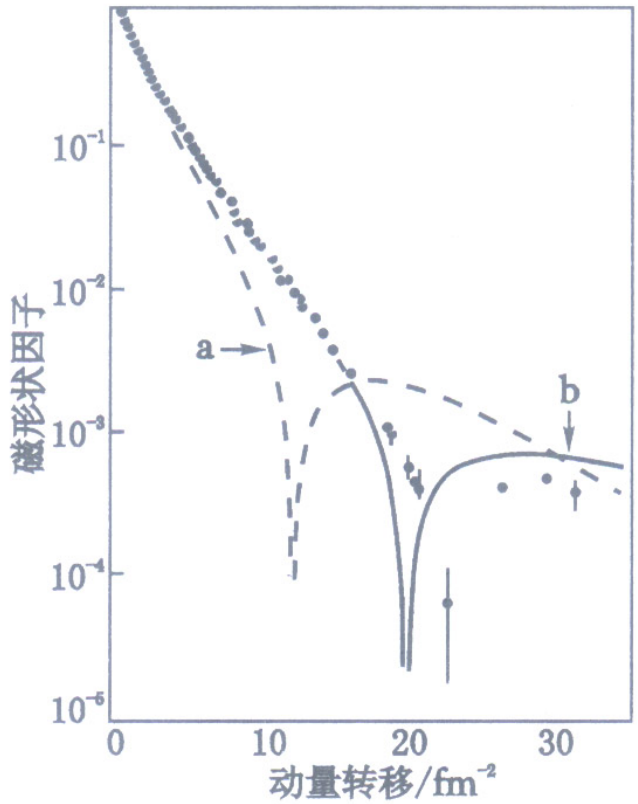


图 8-30　^3H 的磁矩及其理论解释①

对核力的研究表明，当核子相互接近到**0.5fm**左右时，会碰倒很强的排斥芯。从高能电子在核子上的深部非弹散射中，已发现核子内部有点状组分，加上其他理论和实验的工作，逐渐导致了强子的夸克模型的建立。强子是介子和重子的统称，他们均由夸克组成。夸克之间通过交换胶子传递强相互作用。强子中的介子是玻色子，自旋为整数；而重子是费米子，自旋为半整数。核子（质子和中子）就是重子中最常见的两种。

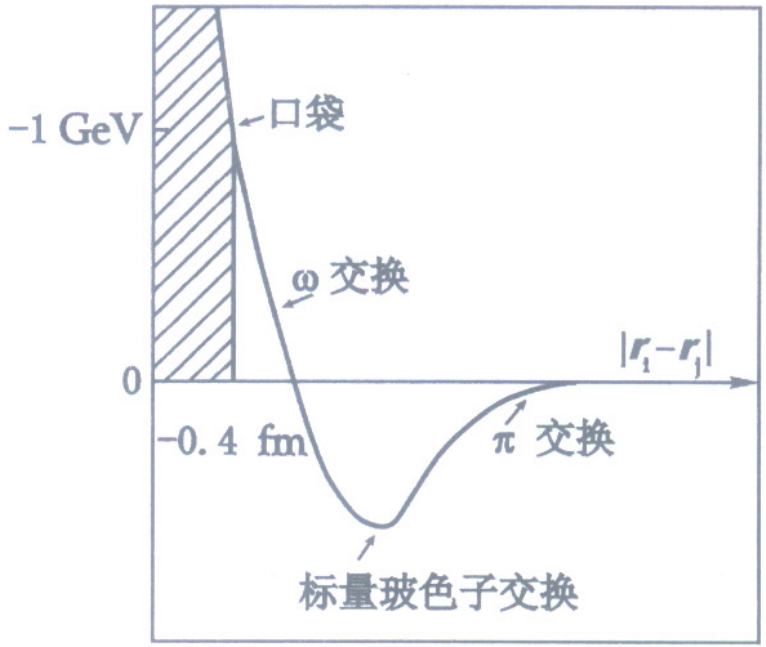


图 8-31　核子-核子相互作用势②

实验表明，夸克在核子内部是准自由的，但在核子表面有极高的位垒，将夸克禁闭在很小的范围内。为此，可以用“口袋”模型来对核子内夸克的行为进行简单的分析。在这个模型中，夸克作为无质量的费米子在半径为**R**的球形口袋中自由运动，但不能穿出口袋。口袋的能量是：

$$E_{bag} = \frac{4}{3}\pi R^3 B + 3\left(\frac{2.04\hbar c}{R}\right) \qquad (8.8\quad 9)$$

其中第一项是口袋外部的压强***B***造成的，体现了夸克禁闭的特性；第二项是袋内三个夸克的动能，每个夸克的动能 $2.04\hbar c/R$ 是通过在袋内求解夸克基态波函数得到的。***B***的数值可以通过使 $dE_{bag}/dR = 0$来定出； 当取$R=0.8$fm时，$B=235$ MeV·fm^{-3}。从处理相互作用的方便考虑，可以将核子视

为一个小的夸克口袋加上它周围的介子云，这样可以描写核力的介子交换理论和描写夸克－胶子相互作用的量子色动力学在不同的范围适用。

天然存在的原子核都只包含质子和中子这两种重子，而它们都是由最轻的两种夸克－上夸克(up)和下夸克(down)组成的。现在已经发现，还有其他四种夸克可以在实验中产生，他们是粲(charm)、奇异(strange)、顶(top)和底(bottom)夸克。目前人们对含有奇异夸克的物质已开始进行深入的研究。含有奇异夸克的重子被称为超子，含有超子的原子核称为超核。由于新的自由度（奇异量子数）的引入，奇异核相对于普通核有许多不同的性质。

3. 夸克—胶子等离子体（QGP）

强子的夸克结构能否打破，夸克能否从“口袋”中被释放出来，是涉及到量子色动力学和核物质结构的重大问题。首先考虑一个在高温T下和体积V中处于热平衡的夸克、胶子系统。为简单起见，取夸克和胶子为没有质量的独立运动粒子，并且正反夸克数目相等，即净重子数为零。由量子统计可以证明，系统的压强

$$P = g_{\text{total}} \frac{\pi^2 (kT)^4}{90(\hbar c)^3} \qquad (8.8\quad 10)$$

其中

正反夸克统计（密度）性质的平均效应

$$g_{\text{total}} = [g_{\text{g}} + \frac{7}{8}(g_{\text{q}} + g_{\bar{\text{q}}})] \qquad (8.8\quad 11)$$

是总的简并度。由于一共有八种胶子，每种有两个自旋取向，因此胶子的简并度为$g_g = 8 \times 2 = 16$。夸克有三种颜色，两种自旋取向，两种味（只考虑轻夸克—上夸克和下夸克），因此夸克的简并度$g_q = g_{\bar{q}} = 3 \times 2 \times 2 = 12$。这样可以算出$g_{total} = 37$，即

$$T(\mathrm{K}) = 1.2\times10^{10}\,E(\mathrm{MeV})$$

$$P = \frac{37\pi^2(kT)^4}{90(\hbar c)^3} \qquad (8.8-12)$$

这样,当 P 等于核子口袋的压强 B 时,就推出实现夸克胶子等离子体的转变温度:

$$kT_c = [\frac{90(\hbar c)^3}{37\pi^2}]^{\frac{1}{4}} B^{\frac{1}{4}} \qquad (8.8-13)$$

当 B=235 MeV·fm^{-3}, $kT_c \approx$ 144 MeV。更精确的量子场论的计算给出的转变温度在 200MeV 左右。此时，可以推出能量密度$\varepsilon = 3P \approx$ 2.5GeV·fm^{-3}，这可视为 QGP 的特征能量密度。口袋中的夸克物质被加热超过转变温度时,袋内的压力将超过外部的压力,口袋被打破,夸克和胶子从禁闭中释放出来,从而使强子态转变成夸克－胶子等离子体。

另一个极端是 $T=0$ 而夸克数密度很高的情况。此时，夸克将填充费米面以下的所有量子态。由统计力学可知，夸克的数密度

$$n_q = \frac{N_q}{V} = \frac{g_q}{(2\pi\hbar)^3}\int 4\pi p^2 \mathrm{d}p = \frac{g_q \mu_q^{\ 3}}{6\pi^2\hbar^3} \qquad (8.8-14)$$

其中μ_q为费米面的动量，g_q为夸克简并度。类似的可得能量密度为（假定夸克静止质量为零）：

$$\varepsilon_q = \frac{E_q}{V} = \frac{g_q}{(2\pi\hbar)^3}\int 4\pi p^3 c \mathrm{d}p = \frac{c g_q \mu_q^{\ 4}}{8\pi^2\hbar^3} \qquad (8.8-15)$$

而体系的压强 $P_q = \varepsilon_q/3$。体系的夸克数增加时，费米面提高，引起系统能量密度和压强的增大，当 $P_q = B$ 时，就会发生相变。由(8.8 - 14)和(8.8 - 15)引出：

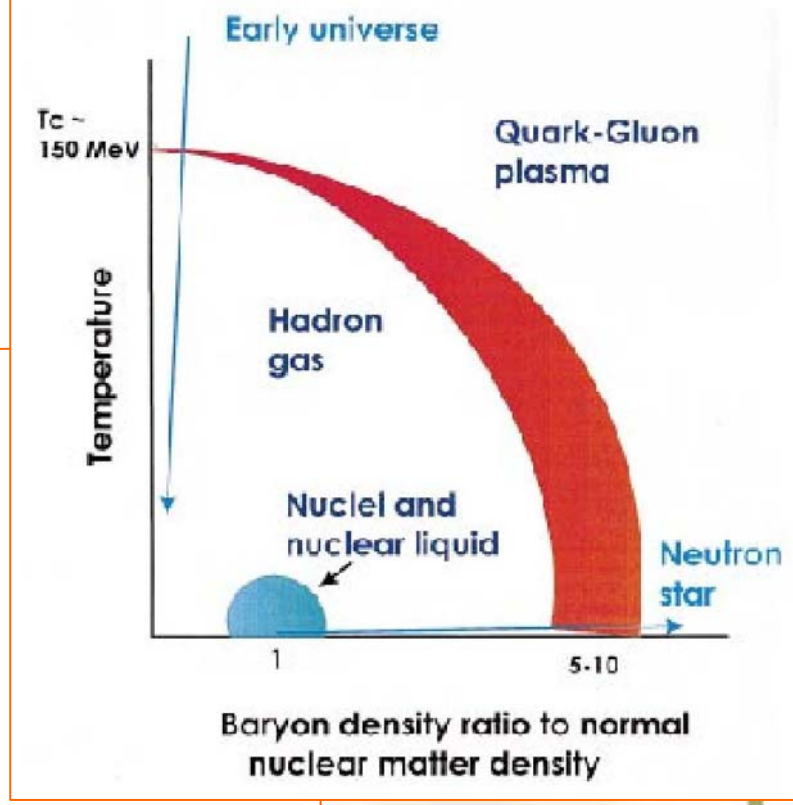
$$n_q = 4\left(\frac{g_q}{24\pi^2\hbar^3c^3}\right)^{\frac{1}{4}} P_q^{\frac{3}{4}} \qquad (8.8-16)$$

而核子数密度 $n_B = n_q/3$。取 $P_q = B = 235$ MeV·fm^{-3}，得转变点核子数密度：

$$n_c = 0.72 \text{ fm}^{-3} \qquad (8.8 - 17)$$

在通常的原子核中 $n_0 = 0.14$ fm^{-3}，因此，在温度为 0 时，实现夸克—胶子等离子体的核物质密度是正常情况的大约 5 倍。这只是最粗略的估算。采用非微扰的 QCD 格点规范理论计算的结果，转变密度 n_c 更大一些。

以上是两种极端的情况。一般地，转变温度和密度介于上述情况之间，大致如图 8—32 所示。


Early universe
Tc ~
150 MeV
Quark-Gluon
plasma
Temperature
Hadron
gas
Nuclei and
nuclear liquid
Neutron
star
1
5-10
Baryon density ratio to normal
nuclear matter density

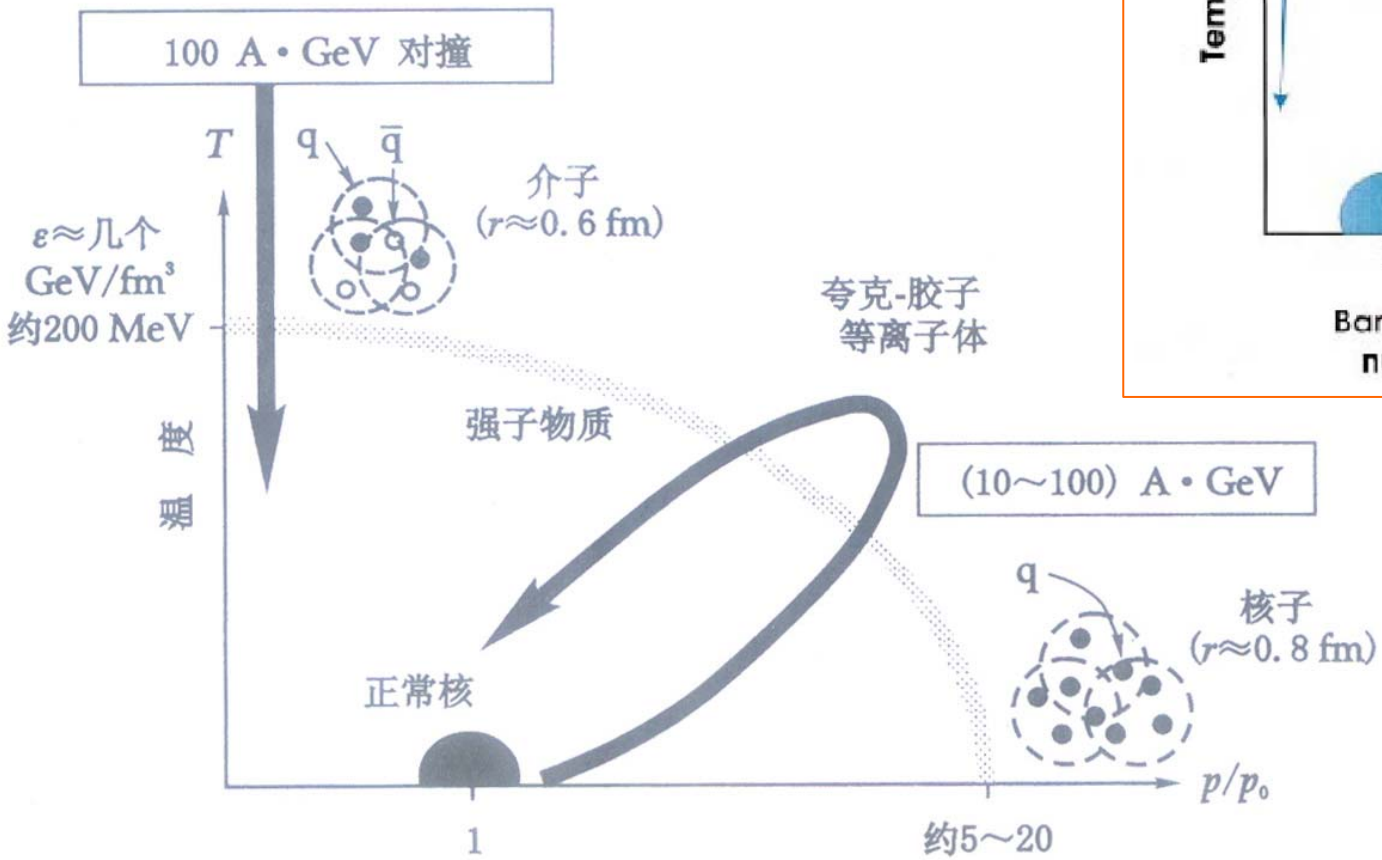

100 A • GeV 对撞
T
q
q̄
介子
(r≈0.6 fm)
ε≈几个
GeV/fm³
约200 MeV
夸克-胶子
等离子体
强子物质
温度
(10～100) A • GeV
q
核子
(r≈0.8 fm)
正常核
p/p₀
1
约5～20

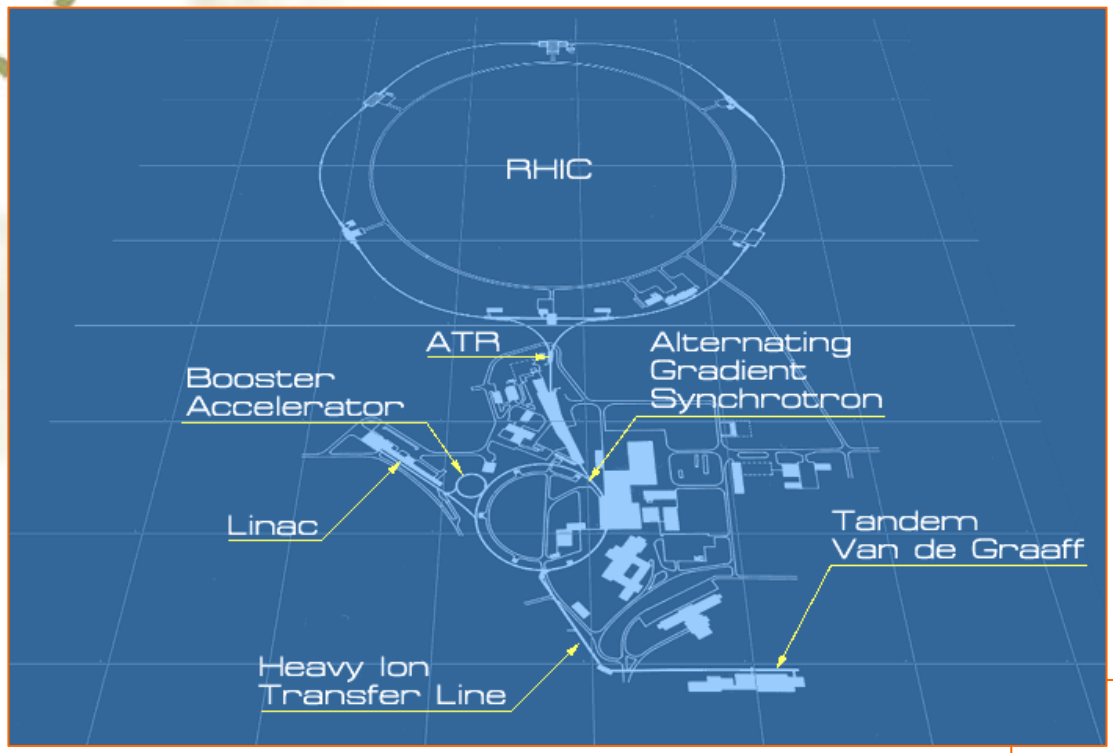
图 8-32　核物质相图

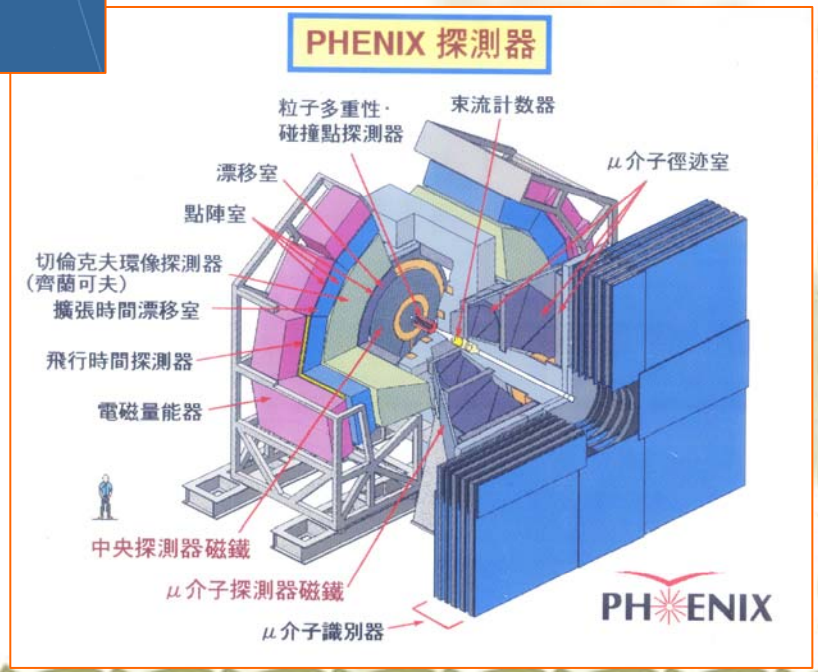
宇宙的大爆炸理论指出，在大爆炸后的约10^{-3}秒以内，曾出现过夸克－胶子等离子体的状态。要在实验室中重现这种状态，目前了解的最好办法是利用超高能相对论重离子碰撞。当两个核子在高能下碰撞是，他们相互穿越，但将部分能量沉积在碰撞区域。质子－质子碰撞实验的分析表明，该区域的能量密度可达约$0.3GeV\cdot fm^{-3}$。假如采用重离子，同时有数百个核子参与碰撞，可使能量密度提高很多。近年来，在美国的AGS(Brookhaven)和欧洲的SPS(CERN)，已采用每核子上百GeV的中等质量离子进行了许多实验，达到了约2 $GeV\cdot fm^{-3}$的能量密度，观察到一些特殊的现象，但还没有夸克－胶子等离子体出现的明确证据。从1993年以来，美国的Brookhaven国家实验室在原有重离子加速器AGS的基础上建造相对论重离子对撞机(RHIC)，已经在2000年建成（图8－34）。它使Au离子在每核子100GeV下对撞，产生约$10GeV\cdot fm^{-3}$的能量密度，比QGP所要求的能量密度高很多。 因此如果QGP预言正确的化，RHIC能够创造这种状态。欧洲核子中心（CERN）也正在建造大强子对撞机（LHC），除实现7TeV + 7TeV的质子对撞外，也将加速重离子，可以产生比RHIC更高的能量密度，但建成的时间预计在2007年以后。

RHIC开始采集数据，北大高能实验组参加。北大也参加LHC探测器建造和物理实验。

2000年，在Brookhaven建成相对论重离子对撞机RHIC。




RHIC
ATR
Alternating
Gradient
Synchrotron
Booster
Accelerator
Linac
Tandem
Van de Graaff
Heavy Ion
Transfer Line


PHENIX 探測器
粒子多重性·
碰撞點探測器
束流計數器
μ介子徑迹室
漂移室
點陣室
切倫克夫環像探測器
(齊蘭可夫)
擴張時間漂移室
飛行時間探測器
電磁量能器
中央探測器磁鐵
μ介子探測器磁鐵
μ介子識別器
PHENIX



习　题

8-1. 根据壳模型给出下列诸核基态的自旋和宇称：$^{9}_{4}\mathrm{Be}$, $^{14}_{7}\mathrm{N}$, $^{37}_{17}\mathrm{Cl}$, $^{43}_{20}\mathrm{Ca}$, $^{45}_{21}\mathrm{Sc}$, $^{63}_{29}\mathrm{Gu}$, $^{73}_{32}\mathrm{Ge}$, $^{83}_{36}\mathrm{Kr}$, $^{92}_{42}\mathrm{Mo}$, $^{101}_{44}\mathrm{Ru}$, $^{143}_{60}\mathrm{Nd}$, $^{197}_{79}\mathrm{Au}$ 。

8-2. $^{87}_{39}\mathrm{Y}$ 有一长寿命的同质异能态，其激发能为 **381 keV**，试根据壳模型判断此同质异能态的自旋和宇称，并估算其半衰期。已知同质异能跃迁的内转换系数α=0.28，并取 r_0=1.4fm。

8-3. 根据壳模型判断下列 β 跃迁的级次：

$$(i)\ {}^{39}_{20}\mathrm{Ca}\xrightarrow{\beta^+}{}^{39}_{19}\mathrm{K};\quad (ii)\ {}^{91}_{39}\mathrm{Y}\xrightarrow{\beta^-}{}^{91}_{40}\mathrm{Zr};$$

$$(iii)\ {}^{99}_{43}\mathrm{Tc}\xrightarrow{\beta^-}{}^{99}_{44}\mathrm{Ru};\quad (iv)\ {}^{137}_{54}\mathrm{Xe}\xrightarrow{\beta^-}{}^{137}_{55}\mathrm{Cs}.$$

8-4. 实验测得 $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ 的低激发态的能量依次为 **49.8 keV**，**163 keV**，**333 keV**，**555keV**，试求它们的自旋和宇称，并确定它们向下的 γ 跃迁的多极性。

8-5. 实验测得 $^{137}_{70}\mathrm{Yb}$ 第一、第二激发态的能量分别为 **78.7 keV** 和 **179.5 keV**，并知基态的自旋和宇称为 **$5/2^-$**，试求激发态的自旋和宇称，并确定它们向下的 γ 跃迁的多极性。

8-6. 实验测得 **^{159}Tb** 的最低三个能级的能量、自旋和宇称如下：**0:$2/3^+$**；**58 keV:$5/2^+$**；**137 keV：$7/2^+$**，试求 **$9/2^+$**能级的能量。

8-7 利用核子的口袋模型，计算当半径 **R=0.5 fm** 时，对应的口袋压强 **B**。以这个 **B** 值，重新计算 **QGP** 相变的 kT_c 和 n_c。