

三. 理论物理

我所理论物理研究包括粒子物理理论、中高能核物理理论、宇宙学和数学物理等方面，2000 年共发表 101 篇学术论文（其中 60 篇在国外杂志上发表），主要研究领域简述如下。

3.1 B 物理及 CP、T、CPT 破坏的理论研究

3.1.1 CPT 和 T 破坏的研究

CPT 不变性是相对论性定域场论的普遍性质。CPT 不变性的破坏将导致粒子理论观念的重大改变。因而实验上如何观测 CPT 破坏效应至关重要。B 介子的级联(cascade)衰变 $B \rightarrow \psi + K \rightarrow \psi + [\eta]$ 其中 $[\eta]$ 是 K 介子衰变末态)是研究 CPT 破坏的理想场所。这类过程有很奇特的性质 即 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合迭加在 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合之上，因而有级联混合(cascade mixing)的特性。我们在 $\Delta S = \Delta Q$ 假定下讨论了上述级联衰变过程中由 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合诱导的 CPT 破坏，分析了在 B 介子工厂和 LHC-B 上测量 CPT 破坏效应的可能。

T 破坏的直接测量在物理上有重要意义。

我们研究了 B 介子衰变中检验 T 破坏的可能性。结果表明由 $B^0 - \bar{B}^0$ mixing 诱导的 T 破坏在标准模型下约为 10^{-3} 量级。但在 $B \rightarrow VV$ 中分枝比对末态两矢量介子衰变平面夹角的角分布破坏 T 不变性。我们发现在 $B^0 \rightarrow K^{*0} \psi \rightarrow (K_s \pi^0)(\ell^+ \ell^-)$ 中 T 破坏可达 4-7%。

以上 CPT 和 T 破坏都可以 B 介子工厂和 LHC-B 的实验中观测。

3.1.2 用 QCD 因子化研究 B 衰变

最近 Beneke 等人发展了一套 QCD 因子化方法来计算 B 到轻介子衰变分枝比。这个方法的特点是：原则上可逐级计算 B 衰变中的非因子化修正，并且在重夸克最低近似下回到了原来的 Stech 等人的简单因子化方案。我们在 Beneke 等人的方案下计算了 $B \rightarrow \pi\pi, \pi K$ 分之分支比，首次包括了企鹅图(penguin)修正，得到同行的重视。

我们还讨论了 QCD 因子化方案中引入 twist-3 波函数后红外发散的消除问题。详细分析了 ϕ_p ， ϕ_σ 引入后在什么条件下可以消除红外发散。

3.1.3 $B \rightarrow \eta' K$ 的研究

由於实验上观测到的 $B \rightarrow \eta' K$ 分支比出奇的大，用标准模型难以解释。我们曾提出了双胶子聚变为 η' 的机制来解释实验。但这一新机制强烈依赖于 η' gg 形状因子。我们研

究了几种不同的形状因子的贡献。发现常数形状因子 $F(k_1^2, k_2^2) = 1$ 贡献最大，

$$F(k_1^2, k_2^2) = \frac{m_\eta^2}{2(k_1 \cdot k_2)} \text{ 贡献较大。}$$

3.2 新强子态 hybrids 的研究和新物理探讨

BNL 的 E852 实验组报告了一个可能的 hybrid 态 $\rho(1405)$ 和 $\rho(1600)$, BES 上也有迹象表明 light-quark hybrids 存在。因此, 从理论上研究 hybrid 态的质量谱和衰变宽度是有意义的。我们已经应用 QCD Sum Rules 研究了 light-quark hybrids 的质量谱的衰变宽度, 指出在 J/ψ 的衰变中应注意 2.3GeV 附近可能存在一个 0^{++} 或 0^{-+} 的 hybrid 态。进一步又研究了 heavy-light hybrids 的质量谱和衰变宽度。例如, 在 HQET 的框架里利用 QCD Sum Rules 计算了 b 和 c 夸克的 hybrids。对于含 c 夸克的 hybrids 0^{++} 、 1^{++} 和 $(0^{++})'$ 分别是 3.5GeV、3.1GeV 和 3.2GeV, 它们强衰变为 $D\pi$ 的宽度分别为 16MeV、1.0MeV 和 2.6MeV。

3.2.1 弱、电形状因子计算和 QCD 非微扰效应的研究

为了计算弱、电形状因子中 QCD 非微扰效应, 我们采用了两种途径: Light-Cone QCD 求和规则; 基于大 Q^2 下微扰 QCD 预言的唯象内插法。

对于 B 介子衰变为轻强子的弱形状因子, 由于从重到轻介子衰变中有一个大的动量转移, 这就可能应用 Light-cone QCD 求和规则计算 $B-\pi$ 弱形状因子。在我们的计算消去了带来不确定性的 twist-3 波函数, 明显地改进了 $B-\pi$ 形状因子计算, 从而有利于从 $B-\pi\ell\bar{\nu}_\ell$ 实验结果确定 CKM 矩阵元 $|V_{ub}|_0$ 。

对于 d 核的电磁形状因子, 基于大 Q^2 下微扰 QCD 预言, 在中间能量区域内插一个能与大 Q^2 下渐近预言相自洽的指数形式外推到 1GeV^2 附近。从符合实验数据的结果表明:

(1) G_{00}^+ 矩阵元无论是大 Q^2 还是中等 Q^2 都在 $A(Q^2)$ 中占主要地位; (2) 对于 G_{+-}^+ , 忽略高阶贡献是很好近似; (3) 对于 G_{+0}^+ , 高阶贡献在中等 Q^2 区或是不可忽略的。

3.2.2 超出于标准模型的新物理探讨

顶夸克的质量很重, 接近于对称性自发破缺的标度, 这预示着超出标准模型的新物理很可能来自于第三代费米子。基于这一想法, 我们在有效拉氏量的框架内深入系统地研究了 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ 、 $r\bar{t}\bar{t}$ 、 $z\bar{t}\bar{t}$ 和 $t\bar{w}b$ 这些顶点的反常耦合。具结果表明对于 $\sqrt{s} \sim 0.5-1.5\text{TeV}$ 的直线对撞机, 若亮度达到 $10-100\text{fb}^{-1}$, $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ 过程可能探测到反常 $t\bar{t}H$ 耦合。类似地, 我们也讨论了第三代 τ 轻子反常耦合的效应, 它导致了轻子数不守恒和轻子味改变的中性流的新物理效应。从 $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ 、 $\mu^+\mu^-$ 和 $\mu \rightarrow e\gamma$ 的实验数据

对 τ 轻子反常耦合的参量提供的限制。其反常耦合所导致的 $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变分枝比可能会达到 $10^{-6} - 10^{-7}$ 。

关于中微子的质量，我们计算了 ^{76}Ge 的 $2\nu\beta\beta$ 和 $0\nu\beta\beta$ 衰变寿命，利用 $0\nu\beta\beta$ 衰变的最新实验结果可以得到有效中微子质量的上限为 0.4eV 。

3.3 超弦与 M 理论

一种 anti-de Sitter (AdS) 空间中的第二类 B 型超弦与其边界上的共形场论(CFT)之间的对偶性假设重新引发人们对 AdS 动力学的巨大兴趣。AdS/CFT 对应给出规范场与超弦物理可观测量间的明确对应。一些物理学家期望这种对偶性可以准确描述 QCD 强耦合区物理。实际上利用简单的超引力计算已经得到包括：夸克禁闭、 θ 真空、胶球质量及拓扑极化在内的很多有趣结果，定性地与强耦合格点 QCD 类同。使理论物理学家感到惊奇的是：AdS/CFT 对应给出的胶球激发态质量与基态质量之比在定量上也有与格点 QCD 的结果非常一致。这使得超弦理论(或其低能近似：超引力)成为继格点 QCD 之后又一种计算胶球、混杂态的有用工具。由于超弦理论处理的是高维空间的线性方程远远比格点 QCD 的计算简单，所以容易得到更多更好的结果。胶球、混杂态正是 BEPC 的重要工作方向之一。理论与实验结合可望促进参强相互作用本质的进一步理解。为了检验 AdS/CFT 对应及更深入地了解其物理内容就需要对 AdS 动力学从各种不同的方向进行广泛的研究。我们利用准确求解运动方程与构造内部一边界传播子两种方法相结合研究有质量标量场的 AdS 动力学。从 $(n+2)$ 维嵌入空间中明显 $\text{SO}(2,n)$ 不变的度规形式得到一个类 Robertson-Walker 度规。类 Robertson-Walker 度规允许我们构造一个在按空间变换下协变的类 Killing 向量。我们发现这种坐标系中存在一个物理视界。找到一种构造任意号差流形中内部一边界传播子的系统方法。明确得到波函数在边界上的奇异行为。我们特别强调严格解与利用内部一边界传播子得到的构造解之间存在一一对应关系。

3.4 1^{++} 奇异态的研究和胶子球的混合机制

3.4.1 在 BEPC/BES 上通过 J/ψ 衰变寻找 1^{++} 奇特态

由于 BES 新一轮运行已积累了 2500 万 J/ψ 事例，明年将 5000 万事例。这就使得在 BES 上通过 J/ψ 衰变寻找 1^{++} 奇特态成为可能。

胶球及混杂态的寻找和确认是 BES 下一阶段工作的重点。而 1^{++} 奇特混杂态，由于不存在与普通强子混合的问题，因此近年来颇受关注，已在多个实验室的强子反应中发现了它的踪迹。我们针对同位旋矢量及同位旋标量 1^{++} 奇特混杂态的特点，提出了若干可行方案，会有助于 BES 的 J/ψ 物理工作。

3.4.2 胶子球研究中的混合机制

胶球和普通强子的混合是不可避免的，因此研究它们的机制具有现实意义和理论意义。我们针对近年来颇受关注的赝标、标量和张量胶球候选者，分别研究了它们的混合机制。

对张量介子的研究，发现在 $f_2(1270) - f_2'(1525)$ 混合的框架内，两个态衰变的理论结果和实验数据符合很好，显示出这两个态的波函数不需要其它(如胶球)分量。如果把 $\xi(2230)$ 视为 2^{++} 粒子，研究它和这两个态的混合，确定它们的胶球—夸克偶素内容，则 $\xi(2230)$ 几乎是一个纯胶球。

对于赝标介子的混合，我们利用包含 η, η' 的辐射跃迁，双光子衰变过程以及某些 $J/\psi \rightarrow P + V$ 电磁过程的最新实验数据的拟合结果表明， η' 中必须混入少量的非 $q\bar{q}$ 成份(见(1))。我们还修改了被广泛采用的 Kawai 模型，研究 η, η' 和 $\eta(1440)$ 的混合，使质量矩阵既符合厄密性又能与 QCD Lattice Quenched 近似下的结果不矛盾，得到了与实验数据相当一致的拟合结果，发现 η' 中确混入少量的胶球成份，而相比 QCD Lattice Quenched 近似下对赝标胶球质量的预言，费米子圈的修正很大。

对于标量介子，针对 $f_0(1500)$ 和 $f_0(1710)$ 疑难，我们分别从质量矩阵以及转动矩阵来描述三个标量介子态 $f_0(1370)$ ， $f_0(1500)$ 和 $f_0(1710)$ 的混合。研究它们衰变到二个赝标介子的强子衰变过程，分别采用求解非线性方程及拟合实验数据，得到了这三个态的胶球—夸克内容，计算了这三个标量介子到二个赝标介子的强子衰变和双光子衰变宽度，并对混合质量矩阵作了讨论，有助于推进此问题的深入研究。

我们还就 J^{PC} 为 $even^{++}$ 胶球衰变到一对赝标介子的研究工作，考虑了末态介子中可能的胶球成份，给出了识别此类胶球的新的判据。对于轴矢量介子我们研究了 $f_1(1420)$ 和 $f_1(1285)$ 的混合，计算了它们衰变和产生的分支比，结果表明，目前的实验数据支持，在 3P_1 $q\bar{q}$ 九重态中 $f_1(1420)$ 为 $f_1(1285)$ 的 Partner，而 $f_1(1510)$ 的存在则需要实验的进一步确认。

3.5 量子少体问题的研究

除了继续研究低维空间各种运动方程下的 Levinson 定理形式外，工作重点转移到量子少体问题的研究中来，重点在于把转动自由度和系统内部自由度干净完全地分离开来，建立只依赖于内部变量的波函数及其微分方程组。同时开始对若干量子三体问题，如氦原子问题，选择适当的内部变量，消除波函数的奇异性，加快波函数展开级数的收敛速度，具体计算量子系统的能级和波函数。最近对量子 N 体问题，成功地把转动自由度和系统内部自由度完全分离开来，已经导出了只依赖于内部变量的所谓广义向方程。

3.6 格点规范理论的数值模拟研究

在瞬时近似下,我们求解了胶球的 BS 方程。利用所得到的 BS 波函数,我们计算了 0^{++} 胶球衰变成两个赝标介子的衰变宽度,给出下列预言:

$$\begin{aligned}\Gamma(\pi^+\pi^-) &= 2.4\text{MeV}, & \Gamma(\pi^0\pi^0) &= 1.2\text{MeV}, \\ \Gamma(K^+K^-) &= 0.91\text{MeV}, & \Gamma(K^0K^0) &= 0.91\text{MeV}, \\ \Gamma(\eta\eta) &= 0.83\text{MeV}, & \Gamma(\eta\eta') &= 0.68\text{MeV}\end{aligned}$$

对 SU(2)格点规范场作冷却处理,发现场变量,场强张量和拓扑荷密度的付氏分量随冷却的过程有不同的表现。场变量的高频部分并不随冷却而消去,场强张量的各个频率部分随冷却面很快减少,拓扑荷密度的高频部分随冷却减少,这改变了我们过去的看法,认为所有量的高频部分都会随冷却面减少,为研究各种物理量的产生机制提供新思想。

为了研究 QCD 非微扰效应,要建造规范不变的算符。我们发现把贝阿尔 Stokes 定理应用于利用 Wilson 圈构造算符时,再要求规范不变性就会再现任意性,我们用构造非定域算符作为例子加以说明,这要引起我们的进一步注意。

用 Wilson 作用量和改进作用量分别在点阵上计算拓扑荷(经冷却处理),得到分立的拓扑荷值。发现 Wilson 作用量给出的拓扑荷值偏离整数值约 15%,而改进作用量的结果仅偏离 30%。冷却处理使我们更多地了解 QCD 真空。

3.7 粒子宇宙学和 BES 新物理

1. 粒子宇宙学

粒子宇宙学研究集中于暴涨宇宙模型,宇宙重新加热过程和暗物质物理。今年着重研究了引力扰动并作数值计算。提出了一个冷暗物质粒子非热产生的机制并计算了动率谱。为在小尺度上可能的天文观测与传统的冷暗物质理论模型预言的矛盾提供了一个解决的途径。

2. BES 新物理

理论研究并与实验结合讨论了 J/ψ 和 ψ' 的稀有衰变过程,探讨了发现新物理,如轻子数破坏的可能性。

3.8 双光子过程及光脉冲实验的理论分析

我们对 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma, Z \rightarrow 3\gamma, \gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ 和 $\gamma Z \rightarrow \gamma\gamma$ 过程的贡献。给出了这些过程的解析的手征振幅,由此数值计算了 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ 的高能散射总截面和一些极化散射截面。计算结果表明,在一定条件下(一定的能量区间,散射角区间),W 圈图的贡献是重要

的，并且 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$ 的散射截面比 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ 的散射截面大几倍。在当今技术可设计的光子对撞机上，将能够观察到这些过程，从而可以用来检验标准模型。

王力军等人实验观察到激光脉冲在特别的铯原子气体中传播时，其群速度远远超过光在真空中传播速度 c ，我们对此实验的内部机理进行了理论分析，发现当光通过特定介质时，光的速度将超过光在真空中传播速度 c ，但这中的机制与王力军实验中的机制看来是不同的。

3.9 微扰场论计算机自动化系统 FDC 方面的工作

在 BEPC 的物理实验研究中，强子物理的研究是一个重要的方向，而其理论计算和写拟合程序是一项很费时费力的工作，特别是如果包含高自旋态的贡献的话，在 2000 年我们工作重点是用 FDC 系统产生包括高自旋态的分波分析的有效拉氏量，各个物理过程的微分截面程序及最大似然法拟合程序。另外，还做了其他方面的工作。

(1) 1998-99 年，我们完成了超对称模型的拉氏量的自动构造和费曼规则的自动推导。但在应用于 R 宇称破坏的超对称模型时，有多个的多粒子混合，在推导费曼规则直接引入质量本征态使中间表达式非常大，以至于用我们能用的最快的计算机也没法完成推导。在 FDC 系统中改进了费曼规则的推导方法，使得在 R 宇称破坏的超对称模型的推导中，能够得简洁的，完全的费曼规则的表达式，及其 Latex 文本。

(2) 在理论上对于分波分析的有效拉氏量方法进行了研究、总结，明确构造有效拉氏的规则，我们发现对于自旋为 5/2 及更高的费米子的传播子以前的文献给出的理论公式只在质壳上才对，不能直接推广到不在壳的情况，直接推广会带来理论公式的电荷不对称，因此，我们提出了一个电荷对称的高自旋费米子的传播子公式。在 FDC 系统中实现这些有效拉氏量的构造方法，现在已包括了到 5/2 的自旋的粒子。在 BEPC 能区我们已经构造了一个有效拉氏量模型作为部分结果，引入了 278 个共振态，自动产生了 4952 个，相互作用顶角和 3027 个参数。

(3) FDC 系统中增加了包括高自旋态粒子相互作用的费曼图产生和最大似然法拟合程序的产生部分，自旋越高，传播子的 Lorentz 结构就越复杂，表达式就越长，而其参加的有效相互作用顶角就越复杂，因此有高自旋粒子的费曼图的振幅及其平方的解析表达式就越复杂，一个有 5/2 自旋粒子的三体末态的费曼图，其矩阵元的 FORTRAN 源程序就会有几千行，与实验数据进行拟合时要花很多的计算时间。我们结合最大似然法拟合程序的算法，对于矩阵元平方的算法在结构上进行了两次大的优化，使得产生的程序在实验分析拟合中计算速度两次都有 10 倍的提高。目前正在 BES 上，应用 FDC 产生的程序做物理分析的过程有如下几个：

$$e^+e^- \rightarrow J/\Psi \rightarrow p\bar{p}\eta, p\bar{p}\pi, p\bar{p}\omega, p\bar{p}\Lambda\kappa, p\bar{p}\pi^-, \rho\omega\pi,$$

(4) 应用 FDC, 和别人合作, 我们讨论, 计算了可能的物理给带来的可观测效应。计算和讨论了在物理过程的计算中 U(1) 规范不变的恢复问题。

3.10 双重子态的理论研究

1. $(\Omega\Omega)_{0^+}$ 双重子态的特性

研究了它深度束缚的物理原因及各种手征场耦合对束缚能的影响。计算了 $\Omega + \Omega \rightarrow (\Omega\Omega)_{0^+} + \gamma$ 和 $\Omega + \Omega \rightarrow (\Omega\Omega)_{0^+} + \eta$ 的生成截面。为进一步估算在重离子碰撞中 $(\Omega\Omega)_{0^+}$ 的生成率提供了基本过程的数据。研究了二步生 $(\Omega\Omega)_{0^+}$ 的可能性计算了 $\Omega + (\Omega\Omega)_{2^+} \rightarrow \gamma(\Omega\Omega)_{0^+} + N$ 的截面。指出在相对论重离子碰撞中形成的火球内, 有可能通过二步过程成 $(\Omega\Omega)_{0^+}$ 。

2. 双重子态的研究及重子-重子(B-B)相互作用

利用我们建立起来的手征 SU(3)夸克模型研究了从奇异数 $s=0\sim 6$ 的 S-分波 B-B 束缚态, 预言了十一个可能的双重子态, 其中 $\Omega\Omega$, $\Xi\Xi^*$ 和 $N\Omega$ 可能为具有较窄宽度的双重子态, 并建议在实验中寻找这几个双重子态。他们的实验上的发现将丰富我们 NPQCD 的知识及核内夸克自由度的认识。其他的几个束缚态, 由于强衰变道的存在, 可能具有较宽的宽度, 因此实验上的观测有相当的难度。

我们还进一步研究研究了 B-B 相互作用的散相移与截面。对今后 JHF 上的实验工作给出了参考性的数据, 也为进一步研究超核打下了基础。

3. Λ -超核的研究

由于实验条件的限制, 目前具有奇异数的数据仍然很少。 Λ -超核的数据下是其中的一部分。特别是轻 Λ -超核, 其简单的结构已成为 Y-N 相互作用研究的重要场所。利用我们建立起来的手征 SU(3)夸克模型, 计算了 ${}^5_{\Lambda}He$, ${}^5_{\Lambda}He$ 和 ${}^5_{\Lambda}He$ 的结合能。结果表明从该模型抽出的非定域 Y-N 势能合理地同时给出上述 Λ -超核结合能的范围。因此, 这些数据能作为优化夸克模型的判据, 为非微扰 QCD 效应的研究提供了有效的场所。

4. Pomeron 的胶子内涵的研究

Pomeron 的胶子内涵的概念已被广泛接受。在假设 Pomeron 是胶球与介子混杂态的条件下, 研究了高能 p-p 碰撞中的单 σ 和双 σ 的表面产生, 预言了它们的生成截面及快度分布。若在未来的实验中被证实, 将对 Pomeron 的结构的研究有重要的推动。

5. 变分法的深入研究

变分法是粒子物理和核物理的理论研究中常用的近似方法。它简单易行, 可给出初步

的物理结果。但该方法中还有一系列问题值得深入探讨，其中变分法的精度，特别是试探波函数精度的确定及高精度波函数的获得，对研究衰变等过程关系重大。我们发展了一套切实可行的方法，它可以较好地解决上述问题。我们也对在处理强子结构时用非相对论近似带来的缺陷进行了讨论，并给出了处理意见。

我们还对微扰论中算符的次序及影响进行了深入的讨论。指出了在以前人们通常的处理方法中，忽视算符次序带来的问题，提出了一个解决方案。

3.11 奇异夸克物质研究

与国内外同行合作，在奇异物质的性质，核内重子及其激发态的性质以及胶子球的候选者的寻找等方面开展了研究工作，取得了如下进展：

(1) 利用奇异夸克质量的密度相关模型，在热力学的框架下，重新研究了奇异夸克物质与奇异星的性质，解释了以前理论上的不自洽的问题，预言了奇异夸克碎片的临界密度等性质。利用这一理论研究了奇异星的性质，发现现在人们认识到的中子星很可能是奇异星。

(2) 我们分别从重子-介子层次和夸克层次对重子共振态性质进行了研究，取得了进展。特别是利用北京正负电子对撞机/北京谱仪上 J/Ψ 衰变的数据研究了核子激发态 $N^*(1440)$ 的性质；利用 $C(\gamma, \eta)X$ 反应研究了 $N^*(1535)$ 在核内的性质以及它与核子的相互作用。

(3) 本课题对胶子球的候选者进行了讨论。

3.12 微扰和非微扰 QCD 若干问题的研究

1. 在部分子演化过程中的 4 扭度效应

最近，MRST 研究小组指出，他们可以利用类价初始胶子分布借助于 Altarelli-Parisi 演化方程很好地符合 F_2 的实验数据，这意味着在部分子演化过程中不需要考虑高扭度效应。但是，我们认为，他们所取的类价初始胶子分布对质子结构函数是不合理的初始部分子分布，我们发现，必须对 Altarelli-Parisi 演化方程作高扭度修正。

2. 对单胶子交换势的非微扰修正研究

对单胶子交换势的非微扰修正进行了详细的研究，结果表明，要获得规范不变的修正形式，QCD 真空胶子场必须取协变规范。在协变规范下，我们给出了单胶子交换势的非微扰修正的新形式。

3. 微扰 QCD 演化过程中存在遮蔽效应的一个证据

核子的纵向结构函数 F_L 以及虚光子吸收的纵向和横向散射截面的比值 R_L 在小 x 区域主要取决于胶子的分布函数。而胶子的初始分布函数的形式又决定了在演化过程中是否要考虑遮蔽效应。利用新的动力演化方程分析了 F_L 和 R_L ，发现在部分子演化过程中存在遮蔽现象。

3.13 NJL 模型及求解 N-维基态量子波函数的新方法

(1) 建立了超出平均场近似的 SU(2) NJL 模型在有限温度，有限密度下的一般框架。讨论了 $T=0$ 的极限下，组分夸克质量随化学势 μ 的变化，并与平均场近似的结果比较。

(2) 用 Bjorken Scaling 流体力学模型讨论相对论重离子碰撞可能达到的能量密度，分析了有限碰撞时间的影响。

(3) 导得一个沿着一条确定的轨迹积分求解 N-维基态量子波函数的新方法。在此基础上，得到一种新的微扰展开系列和 N-维波函数的 Green 函数。并将此方法应用于双阱位，库仑位，汤川位，二维不可分位等。

3.14 J/ψ 衰变和反核子—核子湮灭中的强子谱研究

强子是目前人类能够分割出来的物质的最小单元。研究强子谱、强子的内部结构有强子之间的相互作用是粒子物理和核共同的最前沿领域之一。本课题组配合北京正负电子对撞机(BEPC)的 BES 实验和西欧核子中心的低能反核子物理实验完成发表了以下几个方面的工作：

(1) 继续开展 J/ψ 衰变，胶球寻找和介子谱方面的研究。采用全协变张量振幅分波分析法，完成了对 J/ψ 辐射衰变最大的三个道 ($\gamma K_s^+ K^- \pi^0$, $\gamma \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$, $\gamma K^+ K^- \pi^+ \pi^-$) 的分波分析工作，基本完成了 $\gamma K^+ K^-$, $\Phi \pi^+ \pi^-$, $\Phi K^+ K^-$ 的分波分析工作。在这些 J/ψ 辐射衰变道中产额最大的 0^{++} 粒为 $f_0(1500)$ 和 $f_0(2100)$ ，产额最大的 0^{+-} 和 2^{++} 粒子则为 $\eta(2190)$ 和 $f_2(1980)$ ，这些态的质量比满足格点 QCD 胶球谱计算的最新预言。

(2) 开始了通过 $\psi \rightarrow \bar{N} N^*$, $\bar{\Lambda} \Lambda^*$, $\bar{\Sigma} \Sigma^*$, $\bar{\Xi} \Xi^*$ 研究 N^* , Λ^* , Σ^* , Ξ^* 重子谱和重子结构的新项目。已对 $J/\psi \rightarrow \bar{p} p \eta$ 进行了分波分析，在国际上首次测量了 $N \rightarrow N^*(1535)$ 的类时电磁跃迁振幅。目前正在将王建雄的 FDC 系统全面推广应用于这方面的数据分析，理论唯象研究也已经起步，我们将继续开展系统化的研究。

(3) 我们对反核子—核子飞行湮灭的多个道进行了综合分析，进一步健全了 1.92 到 2.41 GeV 的 $\bar{q}q$ 介子谱，发现这些介子的质量平方对径向激发数满足斜率为 1.143 ± 0.013 GeV^2 的线性关系，类似于质量平方对轨道角动量的雷极轨道关系。

3.15 极化核子的研究及共振区核子的自旋结构等

1. 重味介子的基态性质

利用相对论的方程计算了重味介子的基态性质并且细致地考虑了 3S_1 和 1S_0 态的能量差以及波函数的差别, 从而对重味介子的一些特性, 如 Isgur-Wise 函数的计算有了新的认识。

2. 共振区核子自旋结构函数的演化行为

共振区核子自旋结构函数的演化行为特别是考察了 Bjorken 求和规则的演化行为。通过分析可以看出该求和规则与 Roper 共振态的性质密切相关的。不同模型对 Roper 性质的不同预言将会明显地影响 Bjorken 求和规则在共振区内的演化行为。这方面的实验将要由 E155 组给出。

3. 极化核子的结构函数的演化行为

系统地分析不同模型理论的预言, 比较了非相对论和相对论模型的不同, 从而加深了对现有实验数据的理解, 并且利用现有的实验数据对两种模型进行了鉴别。

4. 高扭曲效应

可以看出极化核子的自旋结构函数的研究是研究高扭曲效应的一个重要的场所。研究结果定性上是与其它模型的预言相一致的。

5. 深度非弹区极化核子内部的性质

和日本神户大学的 Morii 教授, Yamanishi 博士共同研究深度非弹区极化核子内部的性质。试图通过研究 Drell-Yan 过程得到极化胶子的分布。这个项目是受日本学术振兴会资助的。

3.16 奇异夸克物质

对奇异夸克物质电荷与临界密度关系进行了初步研究, 同时研究了奇异物质(包括奇异夸克物质和奇异强子等)的性质、探测方法、以及与普通核物质的相互作用等。2000 年度主要进展是关于夸克质量标度、变质量粒子系统热力学以及关于玻色对称性干涉效应的探讨, 相关论文都已在国外期刊发表。