

格点 QCD 的最新进展*

罗向前

(中山大学物理系 广州 510275)

摘要 格点 QCD 是量子场论中最可靠的非微扰方法,是粒子物理最前沿课题之一,被应用到多个交叉领域,对物理学和其它科学的发展产生深远影响.本报告综述该领域突破性新进展,并具有重大理论和实验意义的几个方面的成果.

关键词 QCD 格点规范理论 非微扰方法

1 格点 QCD 的基本思想

QCD 是描述夸克、胶子组成的粒子强作用的规范理论. QCD 一个重要特点是渐近自由,这就使得高能强作用过程可用微扰论处理. 但对于低能强作用过程,例如:夸克和胶子禁闭、真空结构、胶球和强子谱、强子弱衰变、高温高密度下新的物质形态等,微扰方法变得无能为力,只能用非微扰方法处理. 为此,1974年, K. Wilson (Nobel 奖得主)建立格点规范理论. 格点 QCD 具有区别于唯象或其它近似方法之最大优点是,它从第一原理出发来处理非微扰问题,没有 QCD 以外的任意参数或假设.

格点规范理论的基本思想是:把连续时空用离散晶格来代替,如图 1 所示. 夸克坐落在格点上,它们之间由规范场链联系起来. Wilson 提出把 Yang-Mills 胶子作用量

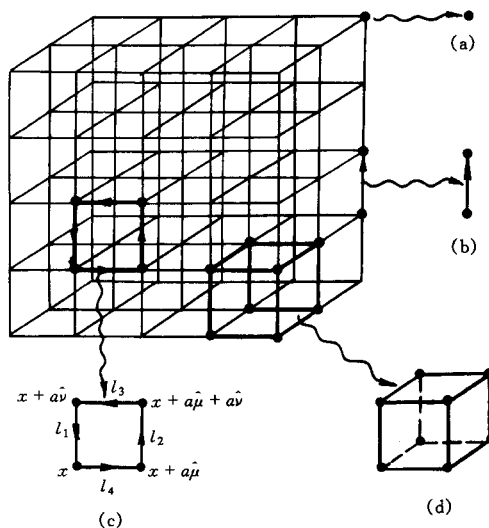


图 1 格点规范理论的基本元素

- (a) 格点; (b) 规范场链;
(c) 方块; (d) 最小立方晶格.

1998-05-18收稿

* 国家杰出青年科学基金,国家自然科学基金、理论物理专款、国家教委留学回国人员基金和博士点专项基金、国家科委攀登计划,中山大学、香港中山大学高等学术研究中心基金会资助

$$S_{\text{gluon}}^{\text{Cont}} = -\frac{1}{4} \int d^4 x F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a$$

用欧氏空间方块作用量

$$S_{\text{gluon}}^{\text{Latt}} = -\frac{1}{g^2} \sum_{x,\mu,\nu} \text{Tr}(U_\mu + U_\nu - 2)$$

近似, 而夸克作用量

$$S_{\text{quark}}^{\text{Cont}} = - \int d^4 x \bar{\psi} (\gamma_\mu D_\mu + m) \psi$$

用下面的差分来近似

$$S_{\text{quark}}^{\text{Latt}} = \frac{1}{2a} \sum_{x, \pm\mu} \bar{\psi}(x) (r + \gamma_\mu) U_\mu(x) \psi(x + \mu a) + m \sum_x \bar{\psi}(x) \psi(x).$$

上面式子中 a 是格距, 而

$$U_\mu(x) = P \exp\left(ig \int_x^{x+\mu a} A_\mu \cdot dx_\mu\right), \quad U_P = U_\mu(x) U_\nu(x + \mu a) U_\mu^+(x + \nu a) U_\nu^+(x)$$

分别代表规范场链和方块变量. 易证 Wilson 作用量在 $a \rightarrow 0$ 和 $g \rightarrow 0$ 时回复到连续理论.

在这样的晶格系统中, 可以用统计物理(拉氏形式下作 Monte Carlo 模拟)或量子力学(哈密顿形式下解薛定谔方程)等方法计算各种物理量, 并外推到 $a \rightarrow 0$ 和体积 $V \rightarrow \infty$, 从而对强作用非微扰物理现象作出解释或预言.

但是, Wilson 提出的格点理论有以下缺点:

1) 按经典场论的观点, 胶子作用量与连续理论的误差是 $O(a^2)$, 而夸克作用量的误差更大, 是 $O(a)$;

2) 当规范场链 $U_\mu(x)$ 展开为 $1 + igaA_\mu(x) - [gaA_\mu(x)]^2/2 + \dots$ 时, 由于量子效应(称为 Tadpole), 规范势 $A_\mu(x)$ 之间有 Wick 收缩: $\underline{A_\mu A_\mu} \propto 1/a^2$, 使格点与连续理论之差为 $O(g^2)$.

如果格距 a 和 g 足够小, 这些误差可以忽略不计, 但 V 必须足够大, 才能保证物理量不出现明显的体积效应. 问题是大部分计算最多只能使 $a > 0.1\text{fm}$ 或 $g^2 > 0.9$, 所造成的误差与有限体积效应一起, 严重影响计算精度. 这就是过去格点 QCD 进展十分缓慢的主要原因.

2 格点 QCD 的改进和近年发展简介

减小格距误差最有效的办法是 Symanzik 的改进格点 QCD 方案, 即在 Wilson 作用量中加入定域、近邻或次近邻相互作用项, 使格距误差变成 a 的高次幂. 关于胶子相互作用理论, LePage^[1] 和罗向前、郭硕鸿、Kroger、Schutte^[2] 分别提出压低 Tadpole 和格距效应的

改进作用量和哈密顿量,使误差减小到 $O(a^4)$. 关于夸克相互作用, Hamber、吴济民^[3]和罗向前、陈启洲、许国材、江俊勤^[4]分别提出次近邻改进作用量和哈密顿量,使误差减小到 $O(a^2)$; Sheikholeslami 和 Wohlert 提出的 Clover(树叶型)夸克改进作用量^[5],其特点是保持相互作用的近邻性,易于数值计算,近来倍受关注. 罗向前^[6]首先探索 Clover 作用量的海夸克算法,在此基础上, Jansen、刘川^[7]和美国著名 MILC 组作数值模拟^[8]. 以上对格点 QCD 的改进方案的一大优点是,即使点阵很小 $O(10^4)$,所计算的物理量也不会出现明显的格距效应和体积效应,因此用中、小型计算机作运算也可达到较高的精度.

近十年来,超级专用计算机的建造、特别是新解析方法的建立和改进作用量、哈氏量的广泛应用,使格点规范理论有突破性的新进展,实现了从定性分析到定量计算的转变. 如今,高温和高密度 QCD、低维规范理论在凝聚态高温超导的应用、胶球性质、K 介子非轻子衰变研究、重味物理等课题的格点研究成果,不但成为了各种理论研究方法的基准,而且给高能物理实验提供重要的依据. 由于篇幅有限,本文只讨论胶球、K 介子衰变和重味物理的最新进展和国内的研究现状. 其它内容可参考文献 [9].

3 胶球研究的最新进展

QCD 的一个重要预言是:必存在由胶子通过强作用耦合成的束缚态,称为胶球. 研究胶球意义十分重大,胶球若存在,将是新型的强子. 胶球性质研究对实验上确认这种新强子、理论上检验 QCD 正确与否起决定作用. 由于胶球是以前从未发现过的新的物质形态,需要理论提供更可靠的信息,目前只有用格点 QCD 才有希望准确给出胶球质量.

Wilson 建立格点规范理论 20 多年来,研究者一直把它作为最热门的课题. 格点 QCD 估算的各种 J^{PC} 量子数胶球在 1000 至 4000MeV 范围. 在这一能区,实验上有 $i(1440)$ 、 $f_0(1500)$ 、 $\theta/f_J(1710)$ 、 $\xi(2230)$ 等胶球候选者. 1996 年前的实验没有准确给出 $f_J(1710)$ 的自旋及其性质. 过去由于计算条件和技术限制,1993 年前的格点结果也很不精确,有明显的体积、格距效应. 最有争议的是最轻的胶球 0^{++} ,究竟是 $f_0(1500)$ 还是 $f_J(1710)$,格点外的唯象理论方法上有各种猜测,部分人认为 $f_0(1500)$ 的主要成分是胶球,而 $f_J(1710)$ 的主要成分是夸克偶素 $q\bar{q}$ ^[10,11]. 也有与之完全相反的意见^[12,13].

近年来,由于大型专用机的建成和计算方法的创新,使胶球质量的格点计算日趋成熟. 目前有三组有代表性的 0^{++} 胶球质量结果,由表 1 给出:

表1 关于 0^{++} 胶球的几组有代表性的结果

UKQCD ^[14]	IBM(GF11) ^[15]	中山大学 ^[16]
1625±92MeV	1710±63MeV	1710±50MeV
Wilson作用量、MC模拟、 $V=32^4$ 、约3000组态	Wilson作用量、MC模拟、 $V=$ $30 \times 32^3 \times 40$ 、约30000组态	Kogut-Susskind哈密顿量,解本 征方程

这里用的是未改进的 Wilson 格点 QCD 理论. 其中 IBM 的 MC 模拟统计事例比 UKQCD 高 10 倍,因此数据应更可信些. 中山大学罗向前等人^[16]所用的是哈密顿形式格点 QCD,在连续极限下与作用量形式完全等价. 关键是独创了一套保持正确连续极限的本征方程

法, 克服了 MC 模拟中普遍存在的、由格距误差引起的标度破坏的困难. 另外, 这个方法的显著特点是能得到真空和胶球波函数, 而其它数值模拟法则很难做到这一点. 有了胶球波函数, 就能计算胶球的产生和衰变过程, 给实验提供更多有用的信息. 值得一提的是, 由于结果收敛迅速, 中山大学的计算基本上是在奔腾机和工作站上进行. 这些工作受到国内外理论和实验工作者的广泛关注和引用, 被列为标准文献之一, 国际权威 Kogut 认为这是该领域的最新进展^[17].

除了质量谱外, IBM 组还计算 0^{++} 胶球的衰变宽度^[18], 得出与实验测出的 $f_J(1710)$ 的衰变宽度相近的结果. 最近他们对 $J^{PC} = 0^{++}$ 的夸克偶素的质量谱进行计算^[15], 结果是 $M(\bar{S}\bar{S}) \leq 1500\text{MeV}$, 否定了 $f_J(1710)$ 单纯由 $\bar{S}\bar{S}$ 组成的猜想^[10]. 当然, 由于 $f_0(1390)$ 、 $f_0(1500)$ 和 $f_0(1710)$ 的自旋量子数相同, 且质量相近, 不能排除观察到这些粒子态是夸克偶素与胶球混合态的可能性. 为此, IBM 组还计算胶球与夸克偶素的混合能^[15], 他们的结果倾向于 $f_0(1710)$ 的主要成分是胶球, 而 $f_0(1390)$ 和 $f_0(1500)$ 的主要成分是夸克偶素^[12, 13].

最近 Morningstar 和 M. Peardon^[19] 用 Tadpole 改进作用量在不对称的格点 ($\xi = a_s/a_t > 1$, 其中 a_s 和 a_t 分别为空间方向格距和时间方向格距) 上做 MC 模拟. $\xi \gg 1$ 的好处是大大增加质量谱计算中的信噪比. 图 2 是 0^{++} 胶球的结果. r_0 是用来确定标度的参数, 可以由重夸克势的计算中获得. 标度行为要求 $r_0 M_G$ 应不依赖于 $(a_s/r_0)^2$. 由图 2 可见, 虽然他们的结果还不很完美, 但标度行为比 Wilson 作用量有明显的改善. 关于其它量子数的胶球, 他们则得到较好的标度行为, 输入 $1/r_0 = 410(20)\text{MeV}$, 初步结果是 $M(2^{++}) = 2390 \pm 120\text{MeV}$, $M(0^{-+}) = 2590 \pm 130\text{MeV}$, $M(1^{+-}) = 2970 \pm 140\text{MeV}$, $M(2^{*+}) = 3070 \pm 150\text{MeV}$, $M(2^{*++}) = 3290 \pm 160\text{MeV}$, $M(3^{+-}) = 3540 \pm 170\text{MeV}$, $M(0^{*+-}) = 3640 \pm 180\text{MeV}$, $M(3^{++}) = 3690 \pm 180\text{MeV}$, $M(1^-) = 3850 \pm 180\text{MeV}$, $M(2^{*-}) = 4100 \pm 200\text{MeV}$. 其中 2^{++} 胶球质量在误差范围内与 $\xi(2230)$ 相符. 但这些结果的系统误差还需进一步减小.

实验中观察到质量为 1710MeV 附近的粒子只有 $f_J(1710)$, 如果其自旋为 $J=0$, 则它很可能是 0^{++} 胶球. 这个预言在最近北京正负电子对撞机 BES 组在 $J/\psi \rightarrow \gamma + f_J(1710)$ 辐射衰变实验中得到初步证实^[20]: 他们发现在 1710MeV 附近有两个共振峰, 高端的质量是 1781 , 自旋的确为 $J=0$, 它衰变到双胶子的分支比较大, 即有较大的胶球成分. SLAC 对 $f_0(1710)$ 的实验分析^[21] 也有类似结果. 这些实验结果对 0^{++} 胶球的确认有十分重要的意义.

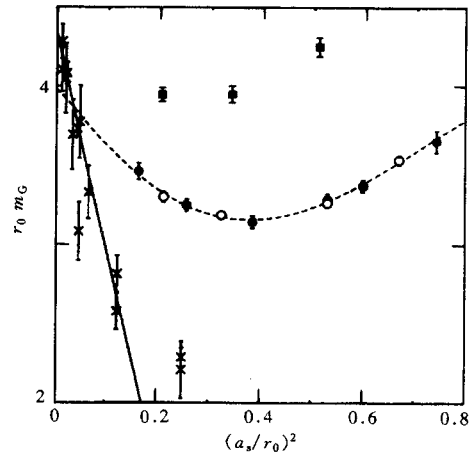


图 2 0^{++} 胶球质量的计算结果

- × Wilson 作用量的结果;
- $\xi = 3$ 的改进作用量的结果;
- $\xi = 5$ 的改进作用量的结果;
- $\xi = 3$ 新的改进作用量的结果.

当然, BES 实验的统计事例还很低. 另外, 目前大部分格点计算基本上用的是淬火近似, 即忽略海夸克的影响. 对于由夸克组成的强子, 其质量谱误差可控制在 6% 以内. 但是对于由胶子组成的强子, 淬火近似与完整 QCD 理论的差别目前还不很清楚. 要最终对胶球质量和性质作出精确的预言和判断, 理论和实验双方都要作出更大的努力.

4 K 介子非轻子衰变

K 介子弱衰变中的 $\Delta I = 1/2$ 规则和 CP 破坏的起源、中性介子的混合机制, 是弱电统一标准模型长期未得到完满解释的重大难题. 夸克间的强作用非微扰效应可能在其中起关键作用, 但有关的弱作用矩阵元很难用格点以外的方法精确计算. 中山大学粒子组在八十年代中、后期曾在格点哈氏形式下用强耦合展开计算弱矩阵元, 得到一些有意义的结果^[22]. 近几年, 大型计算机的建造、改进作用量的使用, 克服了很多技术困难, 数值计算精度大为提高. 在这里简单总结一些比较突出的成果.

B_K 是中性 K 介子系统混合的重要物理量, 与 $\Delta S = 2$ 过程的 CP 破坏参数 ϵ 直接相关. LANL 用的是 Kogut-Susskind 夸克^[23]、ROME 组用 Clover 夸克^[24], 他们在淬火近似下计算 B_K , 结果分别为 $0.93 \pm 0.16 \pm 0.01$ 和 $0.86 \pm 0.03 \pm 0.03$.

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ 是 $\Delta I = 3/2$ 过程, 10 年前 UCLA 组的格点结果^[25] 是实验值的 2 倍, 这使他们迷惑不解而没有再研究下去. Golterman 和 Leung^[26] 最近终于找出格点数据与实验差别的原因: 问题是由于 UCLA 把格点数据与实验比较时, 用了树图近似下的手征微扰论而导致的. 加入单圈修正后, 格点的数据与实验值一致. $\Delta I = 3/2$ 弱矩阵元准确计算的意义很重要, 这是在解释 $\Delta I = 1/2$ 规则的艰难道路上迈进了一步.

5 重味夸克物理

重味夸克物理(包含重夸克 c、b、t)是当今最活跃的前沿课题之一. 人们从重夸克对称性出发导出重夸克有效场论, 研究 B 介子和 D 介子各种衰变模式, 这对确定弱电统一模型中 KM 矩阵元 V_{cb} 值意义重大. 国内的理论工作者在这方面作出了重要的贡献.

近年, 格点 QCD 应用于重味夸克物理的研究取得了重要的进展, $1/M_0$ 修正和改进 QCD 使系统误差不断减小, 计算了许多与实验直接相关的物理量, 例如: 重介子衰变常数、重介子质量谱、重介子衰变常数、重介子衰变矩阵元和形状因子(Isgur-Wise 函数)等. B 和 D 介子衰变常数分别^[27] 为 $f_B = 150 \sim 200 \text{MeV}$ 和 $f_D = 180 \sim 220 \text{MeV}$.

6 国内格点研究近况和未来展望

国内在八十年代初就开始格点场论的研究, 比较活跃的有高能所、北京大学、南开大学、四川联合大学、浙江大学和中山大学等研究组. 这里简单总结一些研究近况.

1) 四川联大郑希特等^[28] 发展了变分累积展开的高阶算法, 并对 $SU(N)$ 规范理论和有限温度 $U(1)$ 场论的相结构进行解析研究.

2) 高能所吴济民和赵佩英^[29]用累积展开变分法研究 $U(1)$ 规范理论的相结构, 得到与 MC 模拟相近的结果.

3) 南开大学陈天仑和李红用累积展开变分法研究 Symanzik 的改进格点 QCD 方案.

4) 北京大学朱允伦、陈莹和任学藻^[30]对变分累积展开的计算机符号算法进行了系统探索, 研究了 Higgs 模型的非微扰物理现象和带费米子有限温度和密度 QED; 刘川研究了费米子数值模拟算法.

5) 浙江大学张剑波、金敏和季达人用 Tadpole 改进作用量计算的 $SU(2)$ 纯规范理论的质量谱. 应和平与 Dong 和 Liu 一起研究了费米子矩阵的数值解法^[31].

6) 中山大学罗向前、郭硕鸿、陈启洲、刘金明、方锡岩、梅仲豪、刘锦江、江俊勤(广东教育学院)开展了胶球质量和波函数、强子弱作用、改进 QCD 和哈氏形式新的计算方法方面的研究, 部分工作前面已经提到; 罗向前还用独创的费米子数值模拟法研究带海夸克 QCD 的真空性质^[32].

目前国内几个单位正尝试用改进格点 QCD 计算胶球质量, 这是十分有意义的工作. 从国际现状看来, 胶球质量已经有比较准确的结果, 把误差进一步减小值得一做, 但更重要的任务是探索胶球衰变、胶球与介子的混合. 为此必须计算胶球波函数和各种量子数胶球的跃迁矩阵元, 并估算淬火近似的误差. 将来可开展有限温度和密度 QCD 研究, 探索新的物质形态. 我们虽然没有大型计算机, 但有中国特色的计算方法, 相信中国人也能在这些前沿课题上大有作为.

作者与(按拼音顺序)陈启洲、方锡岩、郭硕鸿、江俊勤、刘金明、刘锦江、刘良钢、梅仲豪合作, 并与陈天仑、戴元本、杜东生、何景棠、胡敬亮、黄涛、季达人、李文铸、刘川、沈奇兴、沈肖雁、吴济民、应和平、张剑波、张肇西、赵光达、郑希特、郑志鹏、朱允伦、朱重远、祝玉灿、邹冰松作过十分有益的讨论. 在此向他们表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Lepage P. "Redesigning Lattice QCD", 1996
- 2 Luo X Q, Guo S H, Kroger H et al. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:931; Phys. Rev., 1998, **D**:in press
- 3 Hamber H, Wu C M. Phys. Lett., 1983, **B133**:251
- 4 Luo X Q, Chen Q, Xu G et al. Phys. Rev., 1994, **D50**:501
- 5 Sheikholeslami S, Wohlert R. Nucl. Phys., 1985, **B259**:572
- 6 Luo X Q. Computer Phys. Commun., 1996, **94**:119
- 7 Jansen K. Nucl. Phys., **B(P.S.) 53**:1997, 127; Jansen K, Liu C. Computer Phys. Commun., 1997, **99**:221
- 8 MILC Collaboration. Phys. Rev., 1997, **D56**:5584
- 9 Smit J, Van Baal P. Nucl. Phys., 1993, **B(Proc. Suppl.)30**; Daper T et al. Nucl. Phys., 1994, **B(Proc. Suppl.)34**; Karsch F et al. Nucl. Phys., 1995, **B(Proc. Suppl.)42**; Kieu T, McKellar B, Guttmann A. Nucl. Phys., 1996, **B(Proc. Suppl.)47**; Bernard C et al. Nucl. Phys., 1997, **B(Proc. Suppl.)53**; Davies C et al. Nucl. Phys., 1998, **B(Proc. Suppl.)63**
- 10 Amsler C, Close F. Phys. Rev., 1996, **D53**:295
- 11 Wu Jimin, High Energy Phys. and Nucl., 1999, 23:135
(吴济民. 高能物理与核物理, 1999, **23**: 135)

- 12 Weingarten D. Nucl. Phys., **B(P.S.) 53**:1997, 232
- 13 Burakovsky L, Goldman T. Nucl. Phys., 1998, **A628**:87
- 14 UKQCD Collaboration. Phys. Lett., 1993, **B309**:378
- 15 Lee W, Weingarten D. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:194
- 16 Luo X Q, Chen Q. Mod. Phys. Lett., 1996, **A11**:2435; Luo X Q et al. Nucl. Phys, 1997, **B(P.S.)53**:243
- 17 Kogut J et al. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:439
- 18 Sexton J, Vaccarino A, Weingarten D. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:4563
- 19 Morningstar C, Peardon M. Phys. Rev., 1997, **D56**:4043. Peardon M. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:22
- 20 BES Collaboration. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3959; 祝玉灿, CCAST-WL Workshop series, **76**:39
- 21 Dunwoodie W. SLAC-PUB-7163
- 22 Luo X Q, Guo S. in Weak Interactions and CP Violation, World Scientific. (1990)156
- 23 Gupta R. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:278
- 24 Conti L. et al. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:880
- 25 Bernard C, Soni A. Nucl. Phys., 1989, **B(P.S.)9**:155
- 26 Golterman M, Leung K. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:296
- 27 Onogi T. Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:59
- 28 Zheng X T et al. Chinese Phys. Lett., 1996, **13**:337, Commun. Theor. Phys. 1996, **25**:335
- 29 Zhao P Y, Wu J M. Nucl. Phys., 1997, **B(P.S.)53**:719
- 30 Ren X Z, Zhu Y L, Chen Y. Phys. Lett., 1997, **B407**:303; Commun. Theor. Phys., 1997, **28**:241
- 31 Zhang Jianbo, Jin Min, Ji Daren. Zhejiang University Proprint; Ying H P, Dong S J, Liu K F. Nucl. Phys., 1997, **B(P.S.)53**:993
(张剑波、金敏、季达人, 浙大预印本)
- 32 Luo X Q. Phys. Rev., 1995, **D52**:6493; Nucl. Phys., 1998, **B(P.S.)63A-C**:835

Recent Advances in Lattice QCD*

Luo Xiangqian

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

Abstract Lattice QCD is the most reliable non-perturbative method in quantum field theory, and one of the frontiers of particle physics. It has widely been applied to its overlapping fields, and has greatly influenced the development of physics and other sciences. This paper reviews some recent progress which is of great theoretical and experimental interest.

Key words QCD, lattice gauge theory, non-perturbative methods

Received 18 May 1998

* Supported by the National Science Fund for Outstanding Young Scientists, National Natural Science Foundation, Special Fund for Theoretical Physics, Fund for Returned Overseas Chinese Scholar and Doctoral Fund of National Education Committee, the National Chlimb Plan, the Zhongshan University Administrations and Hong Kong Foundation of the Zhongshan University Advanced Research Center.