组织的TeV物理证验

李重生 (北京大学理论物理研究所)

Outline

- 一. 队伍的历史和现状
- 二. 目前研究领域
- 三、对未来的一些初步设想
- 四. 小结

一. 队伍的历史和现状

- 1. 上世纪七十年代末到九十年代初,北大物理系理论物理教研室部分教师及研究生曾率先在国内开展大统一模型、超对称场论和超对称大统一模型以及超对称阶化李代数的研究。当时从事这方面研究的教师主要有曹昌祺教授、韩其智教授、宋行长教授、赵志泳教授、章德海副教授等。
- 2. 目前在TeV能区开展研究工作的队伍状况如下:

李重生教授朱守华教授张大新副教授博士生7人硕士生10人

二. 研究领域

曾在如下领域开展了比较深入系统的研究,发表 论文超过100篇,它们绝大部分发表在国际著名学 术刊物上,被他人引用超过1000次。

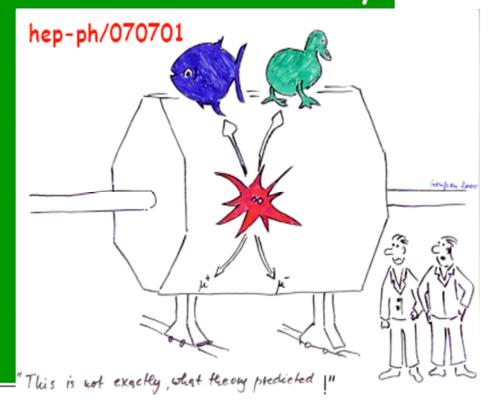
- Top 夸克物理
- Higgs 物理
- SUSY 唯象学及其在电弱能标和B物理中的量子 效应
- Extra Dimensions 和 Little Higgs 模型唯象学
- · 各种高能过程的 Fleetroweak 修正及 □ □ □ 修正

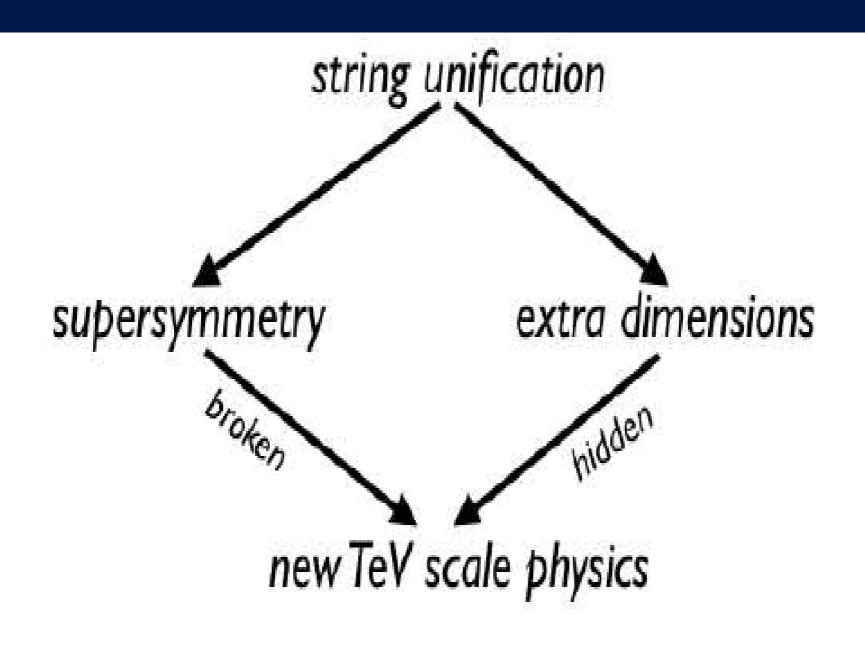
- In 2 years from now, particle physics will enter a new epoch, hopefully the most glorious and fruitful of its history.
- Indeed, the hierarchy problem motivates strongly New Physics at the TeV scale

· The LHC will explore this scale in detail with direct discovery

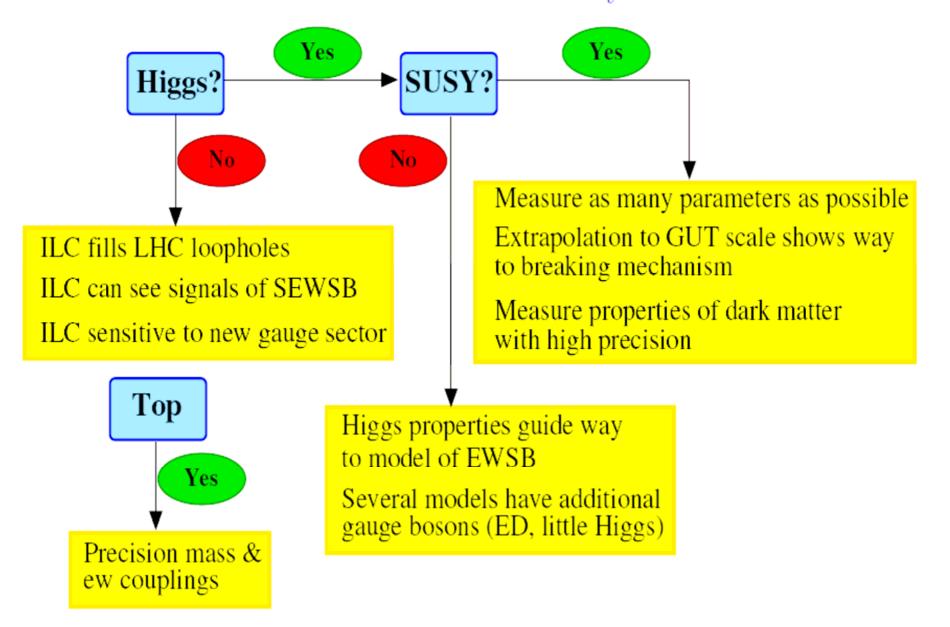
potential up to m ≈ 5-6 TeV

- → if New Physics is there, the LHC will find it
- → it will say final word about many TeV-scale predictions
- → it will tell us which are the right questions to ask, and how to go on





We need the ILC in addition to the LHC in any case:



Higgs Physics and Electroweak Symmetry Breaking

- If a roughly SM like Higgs exists LHC will find it
- However ILC has still a lot to do to figure out the exact model and to measure its parameters



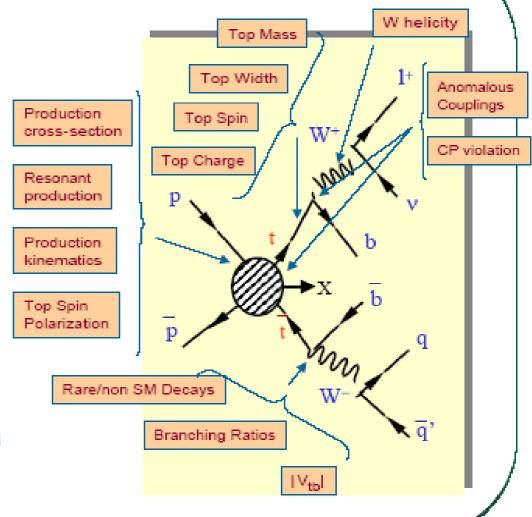
三. 对未来工作的某些初步设想

1. Top夸克物理

ullet Top夸克和Higgs的Yukawa耦合 $\lambda_r = \sqrt{2}m_r/v \square 1$,所以Top夸克有可能在电弱对称性破缺中扮演了非常重要的角色,或者成为探索新物理的窗口,同时也检验着我们对标准模型的认识。

Outlining the Top Quark Profile

- Precision measurements of top quark properties crucial in order to unveil its true nature.
- Experimental information from:
 - Indirect constraints from precision measurements (b→s_γ, electroweak observables);
 - Direct searches for non-SM production mechanisms (LEP, HERA);
 - Direct measurements at present (Tevatron) and future (LHC, LC) accelerators.
- Tevatron: currently world's only source of top quarks.
- Large top samples in Run II allow the Tevatron experiments to make the transition from the discovery phase to a phase of precision measurements of top quark properties.



●进一步针对LHC和ILC上与top夸克有关的各种观测量,深入研究标准模型的精确预言以及新物理的高阶量子效应。

Many New Models...Hot Area of Research

- Supersymmetry
 - Trusty standard
 - NMSSM, MSSM with CP violation....
- Little Higgs
 - Higgs is pseudo Goldstone boson
- Fat Higgs, Composite Higgs.....
- Extra dimensions
 - Higgs is component of gauge field in extra dimension
 - Higgsless: Symmetry breaking from boundary conditions
- Strong electroweak symmetry breaking
 - Technicolor, top-color

–

2. Higgs 物理

- ●标准模型中的Higgs玻色子对于电弱对称自发破缺以及费米子质量的起源至关重要。
- 在标准模型之外,许多新物理模型含有不同的 Higgs Sector,如2HDM,3HDM,三重态, SUSY Higgs,little Higgs以及Fat Higgs等等。 然而,它们都没有被观测到。
- ○发现 Higgs 粒子是 LHC 的最主要的目标。

我们的工作重点

- 在各种对撞机上寻找发现产生Higgs粒子的最佳过程;研究在不同质量区域Higgs粒子的寻找方式及其信噪比。
- 研究Higgs粒子的间接效应,如我们已经研究过的中性Higgs粒子带来的贡献对Bs →mu+mu以及对B的半轻衰变分支比的放大效应。
- ●研究各种不同模型(如NMSSM, CP破坏的MSSM, Higgs与radion混合的额外维模型)中

的Higgs的特征,寻找区分标准模型预言的 Higgs粒子和各种新物理模型预言的Higgs粒子的某些较好的判据。

- ●对一些重要的Higgs产生和衰变过程,我们将给出高阶电弱或QCD修正,并考虑相应的软胶子效应的Resummation。
- ●研究W散射的物理,如通过vv→tt 探索电弱破缺机制。

3. SUSY唯象学

- 对于MSSM,人们在各种受限制的框架(如最小超引力们mSUGRA,规范传递SUSY破缺,反常传递SUSY破缺等)下,已经做了大量的工作。但对于MSSM的理论预言,采用SPA Convention结合 SPS1a'参考点的系统研究还有待进一步深入。
- 在一般的MSSM框架下研究SUSY诱导的FCNC 过程,以及MSSM拉氏量中某些参数的复数结构 对各种可观测量的影响,例如CP破坏起源的新 的机制等,也值得继续关注。

- 此外,R-宇称破坏的SUSY唯象学,例如,在各个能区深入研究R-宇称破坏所诱导的新的物理过程以及对现有精确观测量的影响,同样值得继续予以重视。
- 在R-宇称守恒条件下,研究各种SUSY模型和早期宇宙学的关系。例如,这些模型中最轻的粒子 (neutralino, ...,?) 作为暗物质的候选者的可能性及其在宇宙及其超对称唯象学自身的深层次的意义。事实上,宇宙学的日益精确的实验结果已经为我们提供了加速器实验以外的对SUSY模型参数的限制(例如 mSUGRA的 m 和 m_{1/2})。

- 继续研究Split SUSY唯象学。我们曾研究过在 ILC上Split SUSY 的Charginos的产生。 这个 结果可用来检验该模型中是否除一个Higgs 粒 子外,所有标量粒子都很重。
- 研究MSSM with explicit CP violation 唯象学
- 研究 NMSSM 唯象学

Explicit CP Violation in the MSSM

• The neutral component of two Higgs doublet $H_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_1 + ia_1); \qquad H_2^0 = \frac{e^{i\xi}}{\sqrt{2}} (\phi_2 + ia_2).$

The Higgs effective potential:

$$V_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} m_1^2 \left(\phi_1^2 + a_1^2 \right) + \frac{1}{2} m_2^2 \left(\phi_2^2 + a_2^2 \right)$$

$$- \left| m_{12}^2 \right| \left(\phi_1 \phi_2 - a_1 a_2 \right) \cos(\xi + \theta_{12})$$

$$- \left| m_{12}^2 \right| \left(\phi_1 a_2 + \phi_2 a_1 \right) \sin(\xi + \theta_{12}) + \frac{\hat{g}^2}{8} \mathcal{D}^2$$

$$+ \frac{1}{64\pi^2} \text{Str} \left[\mathcal{M}^4 \left(\log \frac{\mathcal{M}^2}{Q_\mu^2} - \frac{3}{2} \right) \right].$$

•
$$m_{12}^2 = |m_{12}^2| e^{i\theta_{12}};$$
 $\mathcal{D} = \phi_2^2 + a_2^2 - \phi_1^2 - a_1^2;$ $\hat{g}^2 = \frac{g_2^2 + g_1^2}{4}.$

Explicit CP Violation in the MSSM

. . . continued

 Through the Yukawa couplings, the masses of the top and bottom quarks:

$$m_b^2 = \frac{1}{2} |h_b|^2 (\phi_1^2 + a_1^2); \qquad m_t^2 = \frac{1}{2} |h_t|^2 (\phi_2^2 + a_2^2).$$

The squark masses matrices are

$$\mathcal{M}_{\tilde{t}}^{2} = \begin{pmatrix} m_{\widetilde{Q}}^{2} + m_{t}^{2} - \frac{1}{8} \left(g^{2} - \frac{g^{\prime 2}}{3} \right) \mathcal{D} & -h_{t}^{*} \left[A_{t}^{*} \left(H_{2}^{0} \right)^{*} + \mu H_{1}^{0} \right] \\ -h_{t} \left[A_{t} H_{2}^{0} + \mu^{*} \left(H_{1}^{0} \right)^{*} \right] & m_{\widetilde{U}}^{2} + m_{t}^{2} - \frac{g^{\prime 2}}{6} \mathcal{D} \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{\tilde{b}}^{2} = \begin{pmatrix} m_{\widetilde{Q}}^{2} + m_{b}^{2} + \frac{1}{8} \left(g^{2} + \frac{g^{\prime 2}}{3} \right) \mathcal{D} & -h_{b}^{*} \left[A_{b}^{*} \left(H_{1}^{0} \right)^{*} + \mu H_{2}^{0} \right] \\ -h_{b} \left[A_{b} H_{1}^{0} + \mu^{*} \left(H_{2}^{0} \right)^{*} \right] & m_{\widetilde{D}}^{2} + m_{b}^{2} + \frac{g^{\prime 2}}{12} \mathcal{D} \end{pmatrix}$$

• The mass matrices can be diagonalized by the unitary matrices $\mathcal{R}^{\tilde{q}}$ for specific flavor:

$$\mathcal{R}^{\tilde{q}}\mathcal{M}_{\tilde{q}}^{2}(\mathcal{R}^{\tilde{q}})^{\dagger} = \begin{pmatrix} m_{\tilde{q}_{1}}^{2} & 0\\ 0 & m_{\tilde{q}_{2}}^{2} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Then we can solve the mass eigenvalues.

- Through the first and the second derivatives of the potential, we can express m₁², m₂² and m₁₂² sin(ξ + θ₁₂) as the function of the vacuum expectation values.
- We find that the state $G^0 = a_1 \cos \beta a_2 \sin \beta$ is massless. The squared mass matrix \mathcal{M}_H^2 is left for the three states $a = a_1 \sin \beta + a_2 \cos \beta$, ϕ_1 and ϕ_2 .

The a-a element of the squared mass matrix is

$$\begin{split} \mathcal{M}_{H}^{2}\big|_{aa} &= m_{A}^{2} + \frac{3}{8\pi^{2}} \left\{ \frac{|h_{t}|^{2} m_{t}^{2}}{\sin^{2}\beta} g(m_{\tilde{t}_{1}}^{2}, m_{\tilde{t}_{2}}^{2}) \Delta_{\tilde{t}}^{2} \right. \\ &\left. + \frac{|h_{b}|^{2} m_{b}^{2}}{\cos^{2}\beta} g(m_{\tilde{b}_{1}}^{2}, m_{\tilde{b}_{2}}^{2}) \Delta_{\tilde{b}}^{2} \right\}, \end{split}$$

where $\Delta_{\tilde{t}} = \frac{\Im m(A_t \mu e^{i\xi})}{m_{\tilde{t}_2}^2 - m_{\tilde{t}_1}^2}, \Delta_{\tilde{b}} = \frac{\Im m(A_b \mu e^{i\xi})}{m_{\tilde{b}_2}^2 - m_{\tilde{b}_1}^2}.$

Other elements will not be shown here. Diagonalizing the squared mass matrix, we get the mass eigenstates of the Higgs bosons h_1 , h_2 and h_3 , satisfying $m_{h_1} \leq m_{h_2} \leq m_{h_3}$.

$$\mathcal{OM}_H^2 \mathcal{O}^{\dagger} = (m_{h_1}^2, m_{h_2}^2, m_{h_3}^2).$$

They are generally different from the CP eigenstates (h^0 , H^0 , A^0).

Through a rotation we can relate them

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} = \mathcal{O} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ a \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Finally because the loop corrections do not change the mixing relation between ϕ_1 and ϕ_2 , we can get

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} = \mathcal{O} \begin{pmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^0 \\ H^0 \\ A^0 \end{pmatrix}$$
(5)

Modifying the MSSM: NMSSM

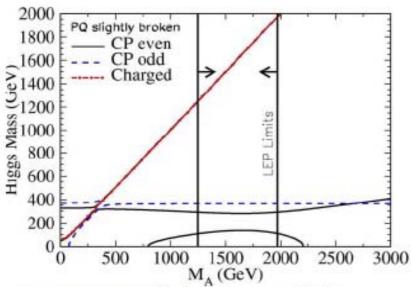
- Simplest modification of MSSM: add Higgs singlet S
- Superpotential $W = \lambda H_1 H_2 S + \frac{\kappa}{3} S^3$
 - $-\lambda < S > H_1H_2$ naturally generates μH_1H_2 term
- At tree level, lightest Higgs mass bound becomes:

$$M_H^2 \le M_Z^2 \cos^2 2\beta + v^2 \lambda^2 \sin^2 2\beta$$

- Assume couplings perturbative to M_{GUT}
 - $-M_{\rm H}$ < 150 GeV with singlet Higgs
- Phenomenology very different from MSSM

NMSSM Higgs Mass Spectrum

Typical Scenario:



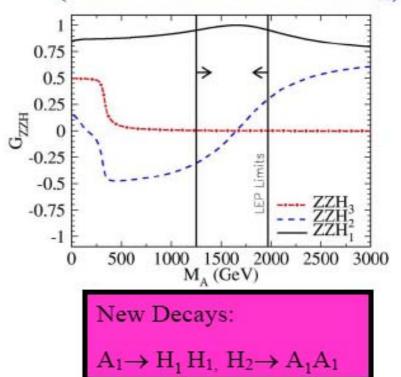
➤ Spectrum of light Higgs: 2 light scalars, 1 light pseudoscalar

► Heavy, roughly degenerate H₃, A₂, H[±]

Very different from MSSM!

ZZH couplings suppressed

(Evade LEP bounds on M_H)



Ellwanger, Gunion, Hugonie, hep-ph/0503203 Miller, Nevzorov, Zerwas, hep-ph/0304049 Choi, Miller, Zerwas, hep-ph/0407209

4. Extra Dimensions 唯象学

- ●Kaluza和Klein关于时空维度可以大于4的想法 在1990年代末期得到复活。额外维度的尺度可 以远大于普朗克尺度,利用这一点可以来解决 等级问题;
- •依照时空流形的拓扑,额外维模型可以如下分类:
 - 1. 平坦的(可因子化的)额外维

大额外维 (LED) (Arkani-Hamed et al.)

普适的额外维 (UED) (Appelquist et al.)

- Ⅱ 卷曲的(不可因子化的)额外维
 - Randall-Sundrum模型

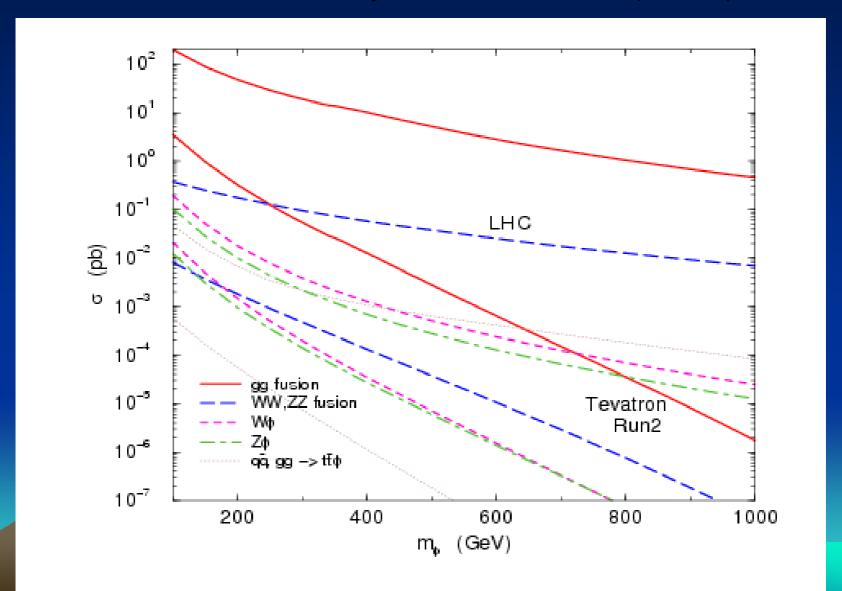
- ●LED 中引力子KK态的质量谱是近似连续的,每一个KK 态与标准模型场的耦合很小,大约为E/Mp(其中E为过程的特征能量),然而,在对KK态求和以后,这个小耦合变为E/Ms量级,其中Ms为紫外截断,为TeV量级。
- ●RS 模型中引力子KK态的质量谱是分立的,第一个KK态质量可以是几百GeV;每一个KK态与标准模型场的耦合为E/TeV量级;为了稳定额外维,必须引入一类标量类型的引力子,即

radion,它的性质类似于Higgs粒子,并且有可能混合。

●在UED中,除了引力子,SM的场也都有其对应的KK态;现有的唯象学分析指出SM KK 态可以轻到3、4百个GeV;在UED中,KK数是守恒的,每一个涉及KK态的作用顶点必须包含同样KK数的一对KK态,不过,也有研究指出,由于辐射修正,第二个KK态可以单独产生出来。

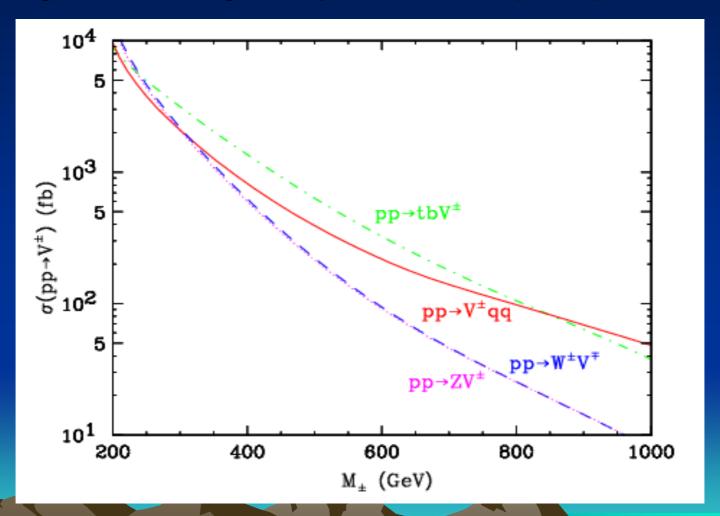
●另外,也存在一些利用边界条件来破缺电弱对称性以及SUSY的额外为模型,它们也有各自的唯象学的特点。如Higgsless模型中规范玻色子KK态的产生与耦合的研究。

Higgsless模型中规范玻色子KK态的产生 A. Birkedal, et al., Phys. Rev.Lett 94 (2005) 191803



RS模型中Radion的产生

Kingman Cheung, Phys. Rev. D63 (2001) 056007



我们的工作重点

- ●各种类型的KK态在对撞机上直接产生的信号 及其QCD修正;
- 各种类型的KK态作为中间传播子的量子效应, 特别是由于引力子的KK态其自旋为2,研究其 对末态粒子的极化性质、自旋关联等可观测 量的影响;
- ●额外维度物理中的FCNC过程以及CP破坏可能的机制;
- ●在各种额外维度模型中研究对各种Higgs观测量的影响。

5.PQCD在高能硬过程的应用

- 固定阶的计算
- 所有阶的计算
- 次领头阶(NLO)计算
- 次次领头阶(NNLO)计算
- 软胶子重求和(Soft Gluon Resummation)
- SCET框架下的(Resummation)
- SCET在高能硬散射过程中对Factorization 和Resumment 的应用

微扰QCD的应用无论是对SM的精确检验,还是对各种新物理模型做出比较可靠的唯象学预言,都具有极端的重要性。在高能硬散射过程中,微扰QCD的应用主要有两种:

- 1. 固定阶的计算
 - 。多jet过程的树图计算
 - 。对大多数过程的次领头阶(NLO)计算
 - ·某些重要过程的次次领头阶(NNLO)计算

2. 所有阶的计算

对软胶子效应在每一阶产生的大对数项进行重求和。

次领头阶 (NLO)计算

对于 $2 \rightarrow n$ 的过程,次领头阶的计算涉及 $2 \rightarrow n$ 的一圈图和 $2 \rightarrow n+1$ 的树图以及某种抽取两部分的红外发散并相互抵消的方法。

- ●目前 $,n \le 2$ 的过程已经被很好的理解,没有什么困难。
- ●对于2→3的过程,原则上是可以计算的,但是仍然非常复杂。典型的例子是对LHC上tth联合产生的计算。
- ○对于π>3的过程,现在还没有很好的办法。

- 已经有一些人尝试将次领头阶的计算完全 自动化,但是仍然处于初级阶段。
- ●由于树图计算的进展,也有人尝试把树图 "拼"成圈图并利用MHV技术来进行计算, 但这一方法目前仅仅对于 N=4 SUSY-QCD 有较好的结果。

次次领头阶(NNLO)计算

- ●由于NNLO计算的复杂性,目前的结果通常局限于初末态只有两个带色粒子的过程,例如DIS, Drell-Yan以及Higgs产生等。
- 最近几年比较值得一提的是Moch, Vermaseren和Vogt得到了NNLO DGLAP劈裂 函数,对于分布函数的演化和下面要提到的软 胶子重求和有重要的意义。
- •对于更多带色粒子的过程,其主要的困难在于

两圈图的计算和系统的消除红外发散的方法。近年来,在这两方面都有了很多的进展,但仍有很多问题需要解决。

软胶子重求和(Resummation)

在阈的邻域和相空间边缘,由于软胶子的效应,在微扰计算的每一阶都会出现大的对数项。为了预言的可靠性,需要将所有阶的对数项求和起来,这就是软胶子重求和技术。目前,重求和技术已经被应用到很多重要的过程中,例如

- ●DIS, Drell-Yan过程和Top夸克对产生的阈重 求和(Threshold Resummation)。
- Orell-Yan和Higgs产生过程的小横动量重求和。
- O Drell-Yan和Higgs产生过程的联合重求和。

○许多其他标准模型和新物理模型中的过程.

现在计算的精度一般是在次领头对数(NLL)级别,对于一些重要的过程已经有了次次领头对数(NNLL)的预言。

SCET框架下的Resummation

●有效理论

将两个在不同能量标度 ($Q >> \Lambda$) 的相互作用自然地分离,并能利用重整化群方程的跑动对出现的大对数项 α_s " $\ln^n(Q^2/\Lambda^2)(n \leq 2m)$ 进行重求和。

●软共线有效理论(SCET)

对应于微扰量子色动力学分析的有效拉氏量和算符,以简化基于分析Feynman图的繁复办法,处理软和共线粒子相互作用的有力工具,首先出现和应用于一个子衰变领域,后

又被应用于证明高能硬散射过程中的因子化定理,并被逐渐系统化为处理无质量夸克或者重夸克和胶子相互作用的框架。

SCET在高能硬散射过程中对因子化 和重求和的应用

通过有效理论和完整理论之间的匹配可以 自动地实现对一个物理过程的因子化,把与过 程有关的高能部分吸收到有效算符的Wilson系 数当中,再加入对有效算符的重整化群跑动使 得强子矩阵元作为真正的低能普适量从实验数 据提取出来。这样就完成了对任何涉及到软和 共线粒子硬散射过程的因子化和重求和。

近来这方面的工作如下:

- ●Bauer等第一次应用SCET对各种硬散射过程在一些特定区域的因子化形式给出了证明[PRD66,014017(2002)];
- Bauer等首先在SCET框架下分析了e⁺e通过 Z 玻色子湮灭成两束喷注时的阀值重求和方法和非微扰形状因子效应[PRL.91, 122001(2003)和PRD70,034014(2004)];

- Idilbi 等 [PRD72,054016(2005)] 得到了Drell-Yan 散射过程中的阀值重求和公式;
- ●Gao, Li & Liu[hep-ph/0501229, to appear in PRD72]提出了在SCET框架下在b空间进行小横动量重求和以及联合重求和的方法,并与传统pQCD结果作了比较,并给出了在 ②空间中的DDT公式的适用范围;
- ●Gao, Li & Yang等正在应用SCET讨论经FCNC 耦合的single top 夸克产生过程中的软胶子效应。

四. 小结

归纳起来,我们将着重研究如下问题:

- 在各种对撞机上寻找发现产生Higgs粒子的最佳过程;研究在不同质量区域Higgs粒子的寻找方式及其信噪比;探索区分不同模型所预言的Higgs的途径。
- 研究包括了高阶辐射(特别是QCD)效应的信号、背景的模拟(Simulation),强调这方面同实验的联系。这方面研究主要涉及到Higgs粒子和HIGEX 粒子的寻找。

- O对LHC上的 Extra Dimensions 的某些重要过程,至少给出 QCD-NLO 水平的预言。
- ○对SM的某些精确可观测量和新物理模型的一些重要过程,给出其Two-Loop水平的结果。
- •对LHC 的某些重要的过程,探索正确的对大的软胶子效应做Resummation的方法(包括在SCET框架下)

· 至少在单图和QCD-NLO水平上继续深入研究各种SUSY模型的唯象学预言。

• 进一步深入研究 B 物理中的各种新物理的量子效应。

• SCET现在多是在 2 的领头阶对原来的结果给出新的证明和简化,但它也提供了一种对超出领头阶的可因子化和不可因子化的幂次修正项进行分类并参数化的便捷方法。关于这方面的问题值得进一步研究。

谢谢!