

# **LHCの物理** 2007年実験開始にむけて

田中純一 東大ICEPP

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬



# 内容

- はじめに
- LHC加速器
- ・ 検出器(ちょっとだけ)
  - ATLAS検出器
  - CMS検出器
- Higgs粒子
  - 標準理論
  - MSSM
- SUSY (超対称性理論)
- Extra Dimensions (余次元理論)
- QCDの物理
- まとめ、案内、最後に





# はじめに





© S.Asai

2005年2月23日

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬

# What is the LHC?

#### 陽子·陽子衝突型加速器

- 重心系のエネルギー14TeV
  - 7 TeV + 7 TeV
  - 実質2TeV程度
- バンチ間隔
  - 40MHz (25ns)
- 1232 superconducting dipoles with B = 8.3 T working at 1.9 Kelvin



2つの汎用検出器(実験グループ)
 ATLAS vs CMS

2005年2月23日





#### 14m x 1232







# Large Hadron Collider





# Why is the LHC?



#### High luminosity

- Higgsの発見 ~ 20世紀からの宿題
- TeV領域の新しい物理の発見



SLHC~?

			)	
Process	Event rate at 2×10 <sup>33</sup>	2007 L=10fb <sup>-1</sup>	Comparison (estimation at 2007)	
tt	1.6 Hz	10 <sup>7</sup>	10 <sup>4</sup> Tevatron-2	
bb: P <sub>T</sub> >10GeV	200 KHz (HLT 10Hz)	2×10 <sup>12</sup> ( <b>10</b> <sup>8</sup> inc. di-μ)	5x10 <sup>8</sup> Belle	
Higgs (130GeV)	200/h	5×10⁵		
SUSY (1TeV)	20/h	5×104		

**け**じめの一  $f(I - 10 fb^{-1})$ 

LHC = Top & B-factory (初のTop工場)



LHC = Higgs & SUSY factory !!!

# **Time Schedule of LHC**



- 2007年4月: first beam, commissioning
- 2007年9月:7 months with L=2 x 10<sup>33</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> "Low luminosity" run
- Physics : L=10fb<sup>-1</sup> -> Higgs/SUSY?
- 2007~2009 : Low luminosity run
- $\sim 2009$  : L=10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> "High luminosity" run

ただし、ハドロンコライダーの場合、単純にルミノシティーが高ければいいとは限らない。





# High Luminosityがベストか?

- L=10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>って?
  - pp非弾性散乱 70mb。 40MHzの衝突では、 70 x 10<sup>-3</sup> x 10<sup>-24</sup> x 10<sup>34</sup> = 7 x 10<sup>8</sup> s<sup>-1</sup> = 17.5 x 40 MHz、つまり、1回のバンチ衝 突で17.5回のpp衝突が起 こる。(より詳細な計算では 約23回)
  - ハードな衝突に多くのケチな 衝突が重なる。(主に Pt<2GeV)</li>
- 10<sup>33</sup>なら約2回
- 10<sup>35</sup>なら約200回
  - 現実的かどうかは。。。







Muon spectrometer : air-core troidal magnet

2005年2月23日









第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬



## CMS (Compact Muon Solenoid)





# Higgs

質量の起源: 標準理論で最も重要 な粒子 -> EWSB

標準理論で唯一観測 されていない粒子





# **Higgs発見に向けて**



- 粒子との結合を考えて、Higgsの"生成"と"崩壊"をうまく組み合わせる。
  - 言われてみれば当たり前
  - 結合定数をうまく引き出す。









# SM Higgsに関する研究のまとめ(ATLAS)

生成過程	崩壊過程	質量の領域とその目的		
Gluon Fusion	Η -> γγ	110-140GeV	Mass	
	H -> ZZ-> 4 I	140- <b>1000</b> GeV	Discovery, Mass, spin, coupling	
	H -> WW	130-170 GeV	Discovery	
Vector Boson Fusion	Η -> ττ	110-140GeV	Discovery, Mass, coupling	
	H -> WW	130-200GeV	Discovery, W coupling	
	Η -> γγ	110-140GeV	Discovery, Mass	
	H -> bb	110-140GeV	Yb coupling (study of trigger)	
ttH	H -> bb	110-130GeV	Yt coupling	
	Η -> ττ	110-130GeV		
	H -> WW	130-180GeV		
WH	H -> WW	140-170GeV	Discovery,W coupling	









# $M_T$ Distribution of H->WW

 $M_{H} = 160 \text{GeV}$  $W^{+}W^{-} \rightarrow \ell \, \nu \ell \, \nu$ 



残念ながらピークは見えない。

•ヤコビアンピーク。

・シグナルの形はBGの形に似ているが、十分な数がある。 (BGに比べて5倍以上。)



### SM Higgsの発見能力





M <sub>H</sub> < 200GeV: - 軽い場合: VBF tt - 重い場合: VBF WW - 複数のモードで発見可能。
M <sub>H</sub> >200GeV: - H->ZZ->4lepton by >20σ

L=10fb<sup>-1</sup>、つまり、1年で Higgsが発見可能  $(M_{H} > ~ 120 GeV)$ 













一番大きな誤差原因は、
backgroundの評価!
これを10-40%にしている。
--> 将来改善!
急速にQCD/MCの理解が進んでいる。



TopとtauはOK。 Bottom Couplingの測定が必須。 -> 新しいアイデアが必要。 例) WHjj, γHjj

# Higgs自己結合



ヒッグスセルフポテンシャル



$$V = \lambda v^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$M_{H} = \sqrt{2\lambda}v$$

trilinear coupling

quadrilinear coupling  $\lambda_{\text{HHHH}}^{\text{SM}} = 3 \frac{M_{H}^{2}}{m^{2}}$ 

2005年2月23日

#### 3点すら非常に困難。

SLHC High Luminosity Upgrade L=10<sup>35</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>

 $gg \rightarrow HH \rightarrow WWWW \rightarrow lvjj lvjj$  (like-sign dilepton)  $V = \lambda \left( \left| \varphi \right|^2 - \frac{1}{2} v^2 \right)^2 \qquad \textbf{L=6 ab^{-1} !} \Rightarrow \text{Significance 5.3(3.8) for } M_{\text{H}} = 170(200) \text{GeV}$ 

 $\Delta \lambda_{\text{HHH}} / \lambda_{\text{HHH}} (\text{stat.}) = \pm 19(25)\%$ 



MSSM Higgs Sensitivity for  $5\sigma$ -discovery









# SUSYの間接的な証拠?





2005年2月23日

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬

は、宇宙のコールド・ダークマターの候補。

その気にさせてくれる。。。





- ・ スピンが1/2違う粒子が存在。
- 同じ質量の粒子は発見されていない。-> SUSYの破れ

S=0	charged scalar lepton: e, scalar neutrino: v, v, v scalar quark: ũ, d, c, s,	μ,τ~ ĩ, ồ
S=1/2	Bino∶ B̃º Wino∶ Ŵ≁, Ŵº gluino: ĝ	(M <sub>1</sub> ) (M <sub>2</sub> ) (M <sub>3</sub> )
S=1/2	Higgsino: $\widetilde{H}_{1}^{0}, \widetilde{H}_{2}^{0}, \widetilde{H}^{+}$	(µ)
S=3/2	gravitino: Ĝ	

4.5個のパラメター(mSugra):  $m_0, m_{1/2}, \tan\beta, A_0, sign(\mu)$ (mass @GUT) (VEV) (scalar 3点) (Higgsino mass) GUT scale(2\*10<sup>16</sup>GeV)で、共通の質量、3点結合 ヒッグスセクターもsfermion, gauginoと同じ  $M_1: M_2: M_3 = 0.4m_{1/2}: 0.8m_{1/2}: 2.8m_{1/2}$ Higgsino mass (IµI) > 0.8m<sub>1/2</sub>(Wino) (m<sub>0</sub>>>m<sub>1/2</sub>の場合以外)  $\tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0, \tilde{\chi}_1^{\pm} \approx \tilde{W}^{\pm}, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^{\pm} \approx \tilde{H}$ 



# LHCにおけるSUSYの生成

主に"strong interaction"で生成







 $\widetilde{q}\widetilde{q}$ 



 $\widetilde{g}\widetilde{q}$ 









In case of  $tan\beta >> 1$ ,  $\tilde{\tau}_1$  becomes lighter, and then Br( $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\tau}_1^{\pm} \tau^{\mp}$ ) becomes larger.

2005年2月23日

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬

# SUSYイベントの特徴(Event topology)







#### mSUGRAの発見能力







...,パジウム@白馬 ちゃんと理解するにはLCが必要36



## SUSYパラメータの測定における問題点

![](_page_37_Figure_1.jpeg)

![](_page_38_Picture_0.jpeg)

# mSugra with WMAP

![](_page_38_Figure_2.jpeg)

![](_page_39_Picture_0.jpeg)

# Extra Dimension

階層問題解決への 別のアプローチ

EWスケールだけが 真実。 Large Extra Dimensions TeV<sup>-1</sup> Extra Dimensions Randall-Sundrum Model

String theory naturally requires Extra Dimensions.

![](_page_39_Picture_6.jpeg)

![](_page_40_Figure_0.jpeg)

### **Black Hole**

2005年2月23日

In case of Planck scale ~ TeV: When impact parameter of initial partons is smaller than Rs, a BH can be produced.

![](_page_41_Picture_2.jpeg)

![](_page_41_Figure_3.jpeg)

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬

![](_page_42_Figure_0.jpeg)

![](_page_43_Figure_0.jpeg)

### LO->NLO->NNLO

![](_page_44_Picture_1.jpeg)

Physically Natural One  $\mu_R \simeq \mu_F \simeq Q(M_H)$ Check Stability with  $Q/2 \le \mu_R = \mu_F \le 2Q$ 

![](_page_44_Figure_3.jpeg)

![](_page_45_Figure_0.jpeg)

PDF

![](_page_45_Picture_2.jpeg)

 既存の実験から求めた分 布をDGLAP方程式でQ方 向に発展させる。

> HERA-LHC Workshop (2004-2005) http://www.desy.de/~heralhc/

![](_page_46_Figure_0.jpeg)

### ME vs PS

![](_page_47_Picture_1.jpeg)

![](_page_47_Figure_2.jpeg)

# まとめ

- ・ LHCは2007年秋に実験(Physics run)を開始する。
  - スケジュールが最優先事項。
- Higgs
  - SM Higgsは実験開始1年以内に発見可能。
  - MSSM Higgs: 多くの領域で2つ以上のHiggsが発見可能。
- SUSY
  - 兆候は容易に発見可能。
  - SUSYの証明をするのは大変。
  - パラメータの測定は大変。
- Other New Physics
  - 十分な発見能力がある。

![](_page_48_Picture_12.jpeg)

- Top, W, b:精密測定を目指す。
- QCD
  - 非常に大変で地味だが、実験開始に向けて精力的に研究が進んでいる。
     (重要な証拠)

![](_page_48_Picture_16.jpeg)

![](_page_48_Picture_17.jpeg)

![](_page_48_Picture_18.jpeg)

案内

![](_page_49_Picture_1.jpeg)

# 大学院学生・若手研究者向け「LHC物理解析研究会」 世話人:浅井(東大ICEPP)、神前(KEK)、田中(東大ICEPP)

http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/lhcwg/Main.html

- 次回3月11日(金)13時から「SUSYの話題が中心」
- 次々回4月の予定「QCDと標準理論の話題が中心」
- 4月から7月の土曜日(合計10回)
  - ・LHC検出器、実験の講義と議論(岡山大田中(礼)さん中心)
  - KEK 萩原さんによるQCDの講義

![](_page_49_Picture_9.jpeg)

### 最後に

![](_page_50_Picture_1.jpeg)

- LHC実験 = HiggsやTeV領域における新しい物理の発見に 携わることのできる唯一の実験
- ATLAS実験
  - ATLAS日本グループ
  - ATLASは2000人弱のAuthor listの超大規模の実験グループ
  - 2006年後半に「Physics Readiness Report」を出版予定
  - 2008年の夏には。。。(希望)
- 多くの若手研究者の参加を期待しています。

![](_page_50_Picture_9.jpeg)

![](_page_50_Picture_10.jpeg)

第11回東大ICEPPシンポジウム@白馬

![](_page_50_Picture_12.jpeg)