ＬＨＣ前夜の素粒子論

2007年3月25日

日本物理学会2007年春季大会

萩原 薫 (KEK,総研大)

1961		SU(2)$\times$U(1)[Glashow]
1964	CP violation	
1967		[Weinberg-Salam]
1971	DIS scaling	[GIM], Renormalization
1972		Kobayashi-Maskawa
1973	Neutral Current	Asymptotic Freedom, SU(5) $\star$
1974	J/ψ	Supersymmetry, GUT[GQW] $\star$
1975	e^+e^- jets, τ	
1976	Υ, the SM	
1977		
1978		
1979	pol. ep $\rightarrow$ eX	SM of elementary particles
1980		
1981		Hierarchy [Technicolor vs SUSY]
1982	W, Z	Supergravity models
1983	gluon jets	
1984		
1985		Radiative EWSB $\star$
1986	$B^0\overline{B}^0$ oscillation	D=10 Superstring
1987		

1988		gauge mediation models
1989		
1990	N_ν=3	
1991	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ in MSSM $\star$	
1992		
1993	EW precision physics $\star$	
1994	top	
1995		
1996		D=11 M theory, brane $\star$
1997		anomaly mediation
1998	neutrino oscillation	large EXD [ADD]
1999		large EXD [RS]
2000		
2001		
2002		Little Higgs models
2003		Higgsless models, [KKLT]
2004		
2005	muon g-2 [BNL] $\star$	
2006		
2007	LHC collision	
2008	LHC physics !	

標準模型の基本粒子 (第１世代)

属称	素粒子	ゲージ量子数			スピン
		SU(3)	SU(2)	$U(1)_Y$	
クォーク	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	3	2	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$
	u_R u_R u_R	3	1	$\frac{2}{3}$	
	d_R d_R d_R	3	1	$-\frac{1}{3}$	
レプトン	$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	1	2	$-\frac{1}{2}$	
	e_R	1	1	-1	
	ν_R	1	1	0	
ゲージ粒子	$(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8)$	8	1	0	1
	(W_1, W_2, W_3)	1	3	0	
	B	1	1	0	
ヒッグス粒子	$\begin{pmatrix} h^0 \\ h^- \end{pmatrix}$	1	2	$-\frac{1}{2}$	0
重力子	G	1	1	0	2

標準模型の基本粒子の相互作用は、$SU(3)_{color}$、$SU(2)_L$、$U(1)_Y$、それぞれの量子数によって定まるのですが、

- 何故、(3,2,1/6)、(3,1,2/3)、(3,1,-1/3) の３種類のクォークと、(1,2,-1/2)、(1,1,-1)、(1,1,0) の３種類のレプトンがあるのか。
- 何故、SU(2) 二重項は左巻きで、一重項は右巻きなのか。
- 何故、３回の繰り返しがあるのか。
- 質量と混合はどのようにして定まるのか。

等の疑問が湧きます。さらに、

- 何故、SU(3)、SU(2)、U(1)、のゲージ相互作用があるのか。
- ゲージ結合定数、α_s、α_W、α_Y はどの様にして定まるのか。

も気になります。これらの疑問に対する満足の行く答えを我々は知りませんが、1970 年代の前半に、

- 何故、電荷は量子化されているのか。
- 何故、$\alpha_s > \alpha_W > \alpha_Y$ なのか。

という二つの疑問に対する (私が）満足できる答えが見つかりました。
これが、大統一理論 (GUT）です。

まず、右巻き粒子の反粒子は左巻きであることを用いて、全てのクォークとレプトンの超電荷を左巻き成分で表します。

		SU(3)	SU(2)	Y	Y^3	$I_3^2 Y$
クォーク	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	3	2	$\frac{1}{6}$	$(\frac{1}{6})^3 \times 6$	$(\frac{1}{2})^2(\frac{1}{6}) \times 6$
	u_R^c	3^*	1	$-\frac{2}{3}$	$(-\frac{2}{3})^3 \times 3$	0
	d_R^c	3^*	1	$\frac{1}{3}$	$(\frac{1}{3})^3 \times 3$	0
レプトン	$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	1	2	$-\frac{1}{2}$	$(-\frac{1}{2})^3 \times 2$	$(\frac{1}{2})^2(-\frac{1}{2}) \times 2$
	e_R^c	1	1	1	$1^3 \times 1$	0
	ν_R^c	1	1	0	0	0
総和					0	0

ゲージボソンの３点関数に現れるアノマリーが一世代毎にキャンセルすること、それも、クォークとレプトン、更に左巻き粒子と右巻き粒子(左巻き反粒子）とが対になって始めてキャンセルすることが分かります。

クォークとレプトンは実は同じ粒子の異なる成分なのではないか、右巻き粒子の反粒子と左巻き粒子も、実は同じ粒子の異なる成分なのではないか、と思わされます。このアイデアをSU(5)というゲージ群で実現して見せたのが Georgi と Glashow (1973) です。

SU(5) 理論では、一世代の 16 個の基本フェルミ粒子を、$\underline{5}^*$、$\underline{10}$、$\underline{1}$、で

$$\underline{5}^* = \begin{pmatrix} d_R^c \\ d_R^c \\ d_R^c \\ -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \qquad \underline{10} = \begin{pmatrix} 0 & u_R^c & -u_R^c & u_L & d_L \\ & 0 & u_R^c & u_L & d_L \\ & & 0 & u_L & d_L \\ & & & 0 & e_R^c \\ & & & & 0 \end{pmatrix} \qquad \underline{1} = \nu_R^c$$

ゲージボソンは (5 × 5 − 1 =)24 個、その内の 1 個が $\mathrm{U}(1)_\mathrm{Y}$ のゲージボソン B で、超電荷の量子化が得られます。

$$\underline{24} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} & & & X^- & Y^- \\ & 8 & \text{gluons} & X^- & Y^- \\ & & & X^- & Y^- \\ X^+ & X^+ & X^+ & W^3/\sqrt{2} & W^+ \\ Y^+ & Y^+ & Y^+ & W^- & -W^3/\sqrt{2} \end{pmatrix} + \frac{B}{2\sqrt{15}} \begin{pmatrix} -2 & & & & \\ & -2 & & & \\ & & -2 & & \\ & & & 3 & \\ & & & & 3 \end{pmatrix}$$

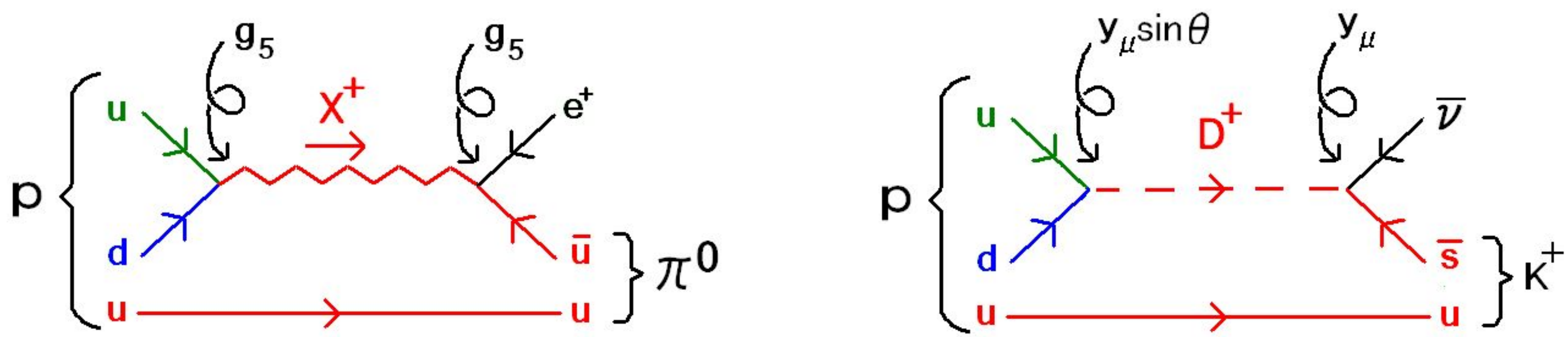
ヒッグスボソンは $\underline{24}$ と、$\underline{5}$ と $\underline{5}^*$ の 3 組用意します。

$$\underline{24}_\mathrm{H} = \Sigma \qquad \underline{5}^*_\mathrm{H} = \begin{pmatrix} D^+ \\ D^+ \\ D^+ \\ H_d^- \\ H_d^0 \end{pmatrix} \qquad \underline{5}_\mathrm{H} = \begin{pmatrix} D^- \\ D^- \\ D^- \\ H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix}$$

この様にして、SU(5) 理論は、電荷の量子化を実現し、部分的ではありますが、何故、クォークの電荷が電子の電荷の 1/3 の単位でなければならないのかを説明します。クォークとレプトンは最早、別々の粒子とは考えられません。でも、この模型は二つの大問題を抱えていました。

- $\alpha_s = \alpha_{\mathrm{W}} = \frac{5}{3}\alpha_{\mathrm{Y}}$
- 陽子崩壊

まず、陽子崩壊は、次のような過程で起ります。



自由陽子や、核内中性子が充分安定であるためには、

$$m_{\mathrm{X}} = m_{\mathrm{Y}} \gtrsim 10^{15}\mathrm{GeV} \qquad m_{\mathrm{D}} \gtrsim 10^{13}\mathrm{GeV}$$

が必要です。その結果、24 個のゲージボソンは、重い X と Y の 12 重項と、軽い、グルオン (8)、W(3)、B(1) とに分かれ、ヒッグス 5 重項は、重い D の 3 重項と、軽いヒッグス 2 重項に分解しなければなりません。

重い粒子は、その質量スケール以下の場の量子論の輻射補正には寄与しません。軽い粒子だけが、量子補正に寄与します。その結果、SU(5) の唯一のゲージ結合定数は、X、Y、D、粒子の質量以下では、生き残ったゲージ群毎に、異なる量子補正を受けます。この事実は、SU(5) 模型が発表された翌年に Georgi、Quinn、Weinber によって発見されました。

３ゲージ結合に対する繰り込み群方程式の LO の解は次のようになります。

$$
\begin{array}{lcl}
\frac{\pi}{\alpha_1(m_Z)} & = & \frac{\pi}{\alpha_5(m_X)} - b_1 \ln(\frac{m_X}{m_Z}) \\
\frac{\pi}{\alpha_2(m_Z)} & = & \frac{\pi}{\alpha_5(m_X)} - b_2 \ln(\frac{m_X}{m_Z}) \\
\frac{\pi}{\alpha_3(m_Z)} & = & \frac{\pi}{\alpha_5(m_X)} - b_3 \ln(\frac{m_X}{m_Z})
\end{array}
\qquad
\begin{array}{lclll}
b_1 & = & 0 & -\frac{1}{20}\mathrm{H} & -\frac{2}{3}\mathrm{N_{gen}} \\
b_2 & = & \frac{11}{3} & -\frac{1}{12}\mathrm{H} & -\frac{2}{3}\mathrm{N_{gen}} \\
b_3 & = & \frac{11}{2} & 0 & -\frac{2}{3}\mathrm{N_{gen}}
\end{array}
$$

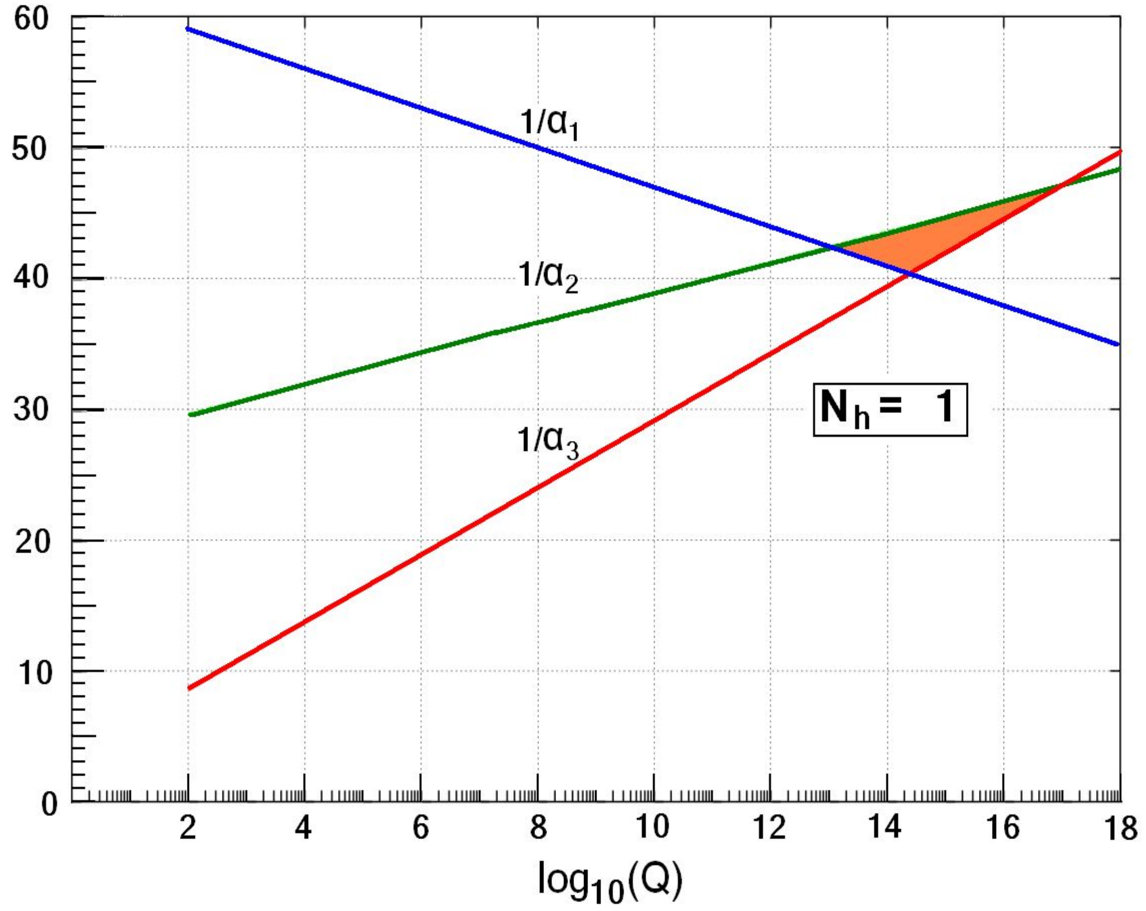
ここで、b_1、b_2、b_3、は U(1)、SU(2)、SU(3)、各々のゲージボソンと結合する軽い粒子の寄与の和として表され、標準模型では、最初の項が、ゲージボソンの自己結合、第二項がヒッグス二重項の数、第三項が、クォーク、レプトンの世代数です。一世代毎、全てのゲージ結合に全く同じように寄与しています。これは、一世代が、SU(5) の反５重項と 10 重項の全てを含むからです。

３個の方程式で m_X と $\alpha_5(m_X)$ が未知ですから、b_1、b_2、b_3、を既知とすれば、Z のスケールでのゲージ結合定数を用いて、ゲージ結合の大統一の仮説をテストすることができます。一番便利な標識は、

$$
\sin^2\theta_W(m_Z) = \frac{3(b_3-b_2)+5(b_2-b_1)\alpha(m_Z)/\alpha_3(m_Z)}{3(b_3-b_2)+5(b_3-b_1)}
$$

クォーク、レプトンは、一世代が揃っている限り、寄与しないことが分かります。

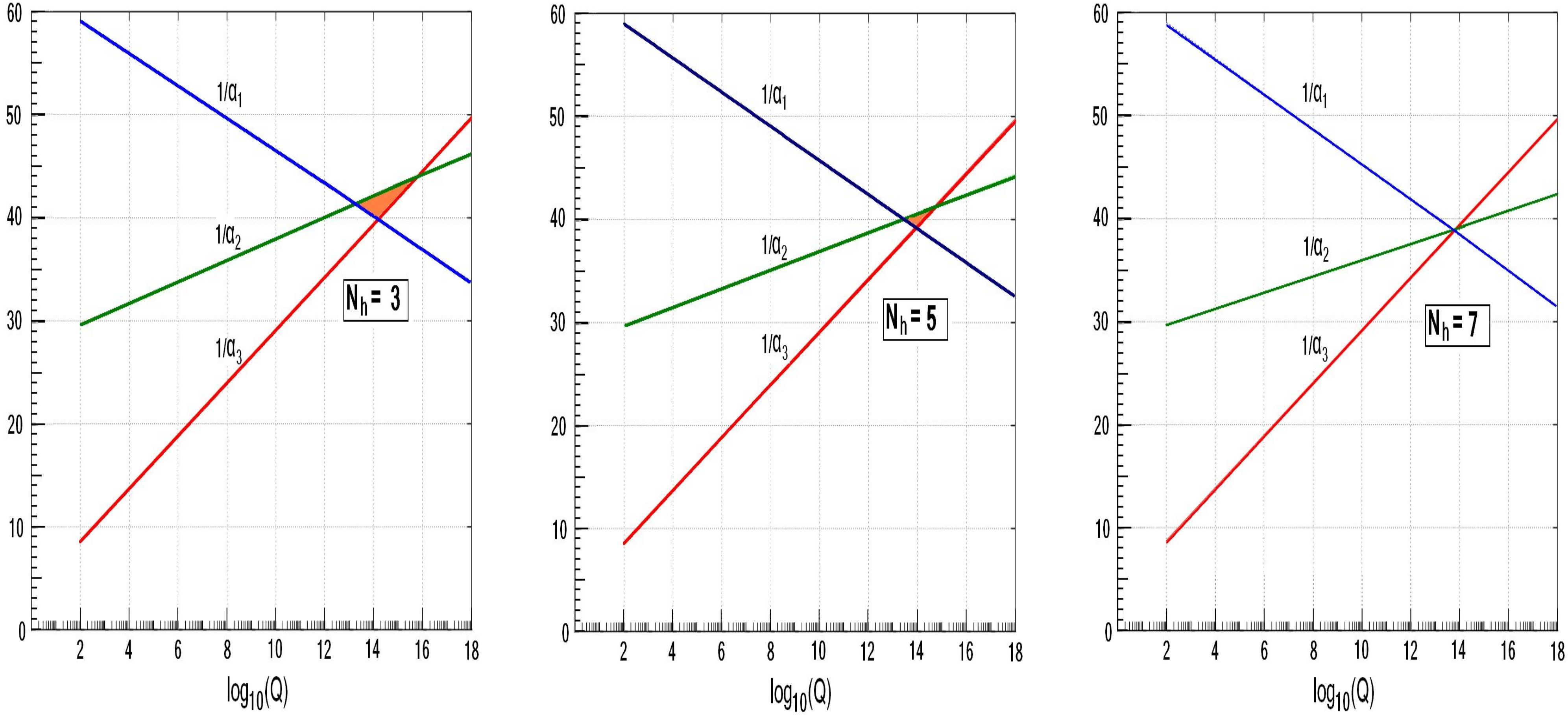
現在のデータをもとにして計算すると、次のようになります。



drown by K.Senda

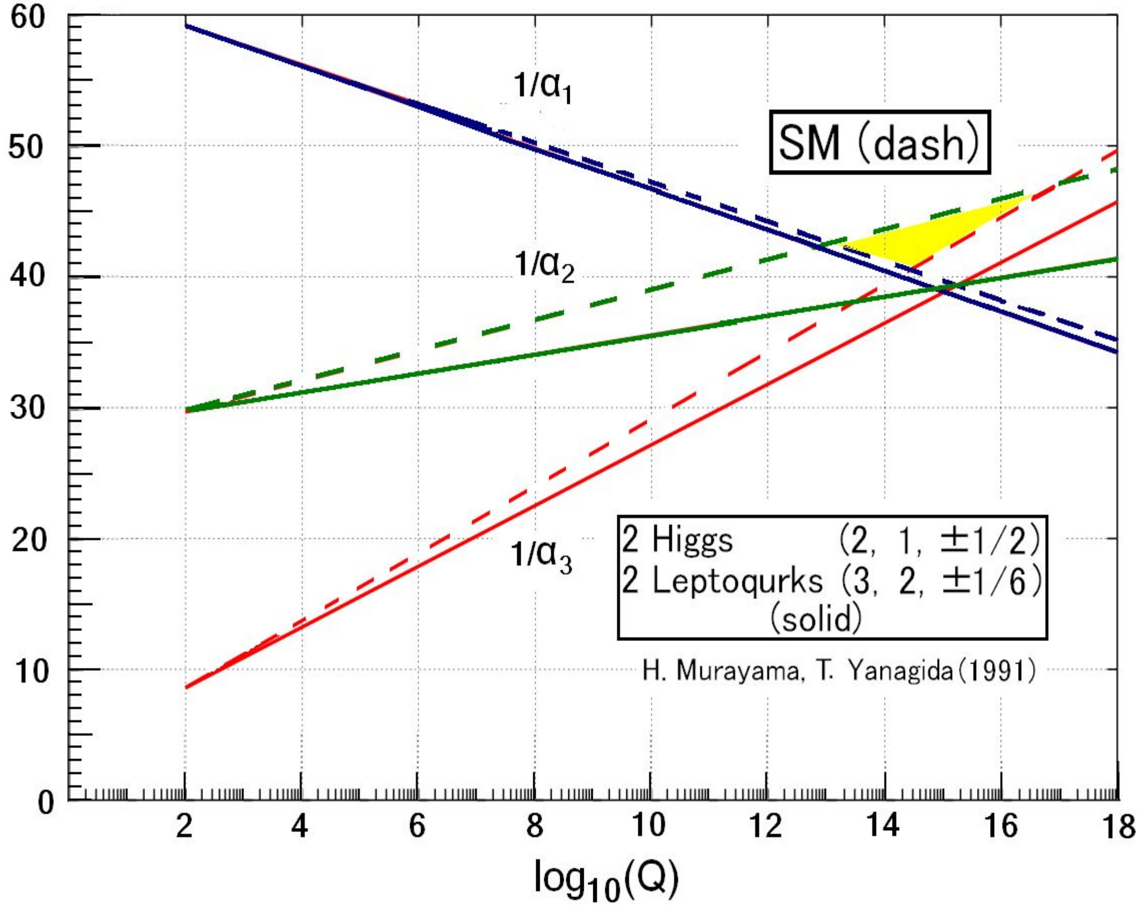
最小標準模型では、大統一は正確には起らないことがわかります。でも、Georgi、Quinn、Weinberg、の発見があった1974年に、強い相互作用が、何故強く、電磁気の相互作用が何故弱いのかが、理解されたのだ、と言って良いと思います。

大統一を数値的に正確にするのは簡単です。例えば、ヒッグス二重項の数 H を増やすと、



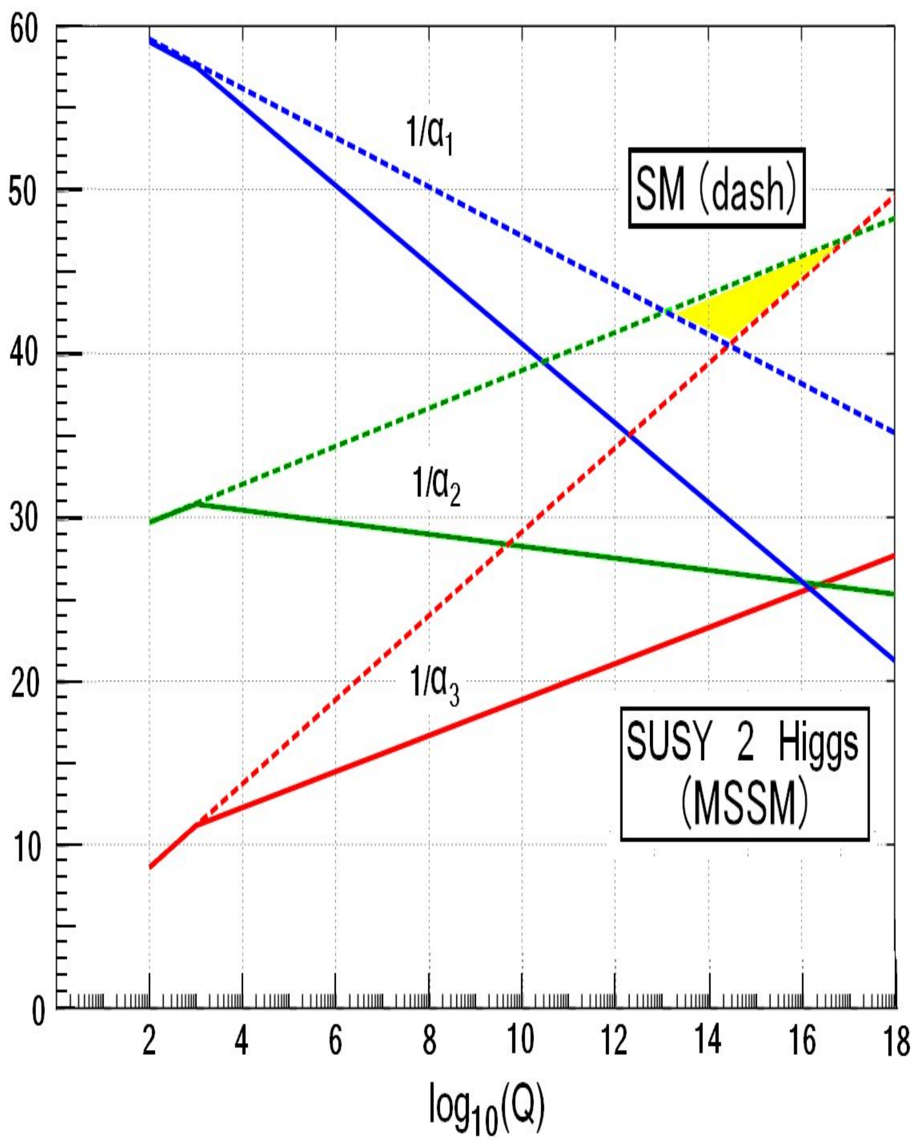
drown by K.Senda

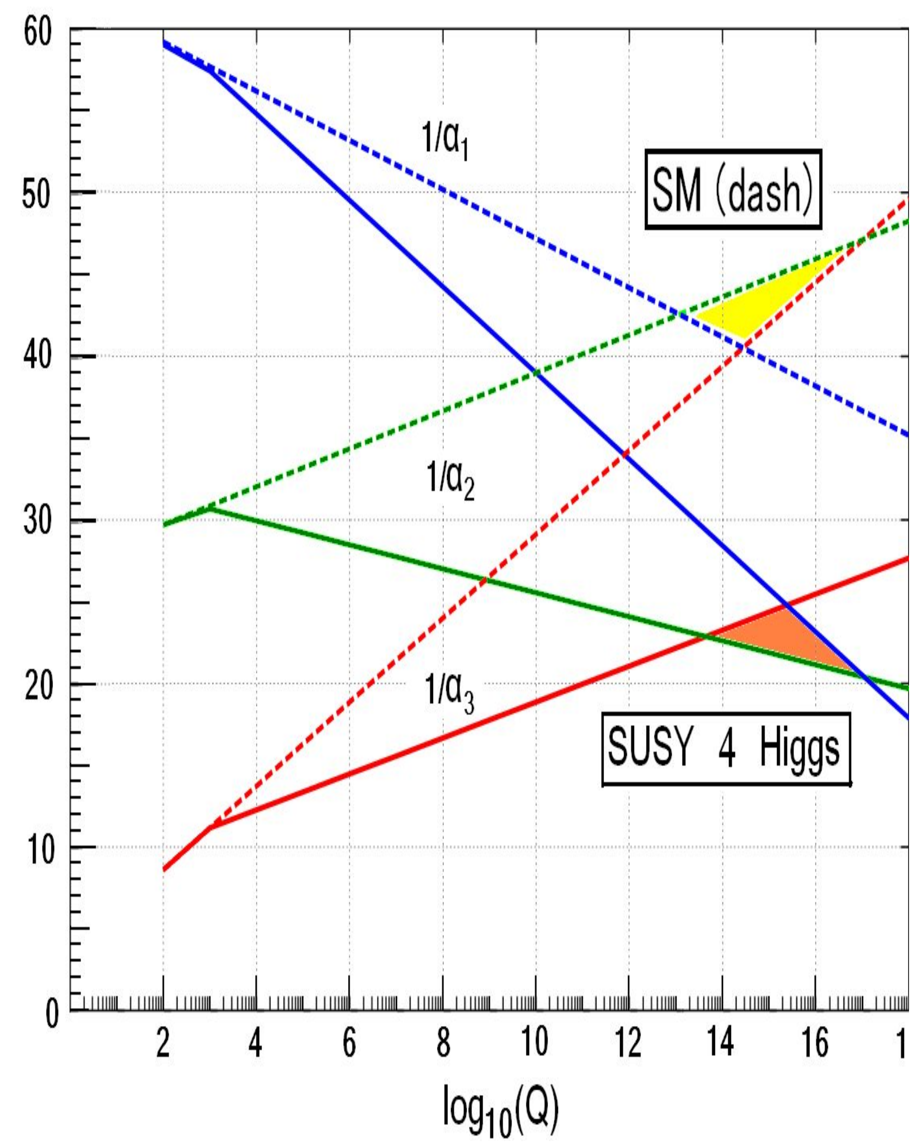
大統一スケールが小さくなって、陽子崩壊の実験データと矛盾します。これを避けるのも簡単です。
カラーを持った新粒子を導入して、$1/\alpha_3$ のスロープを緩やかにしてやれば良いのです。



drown by K.Senda

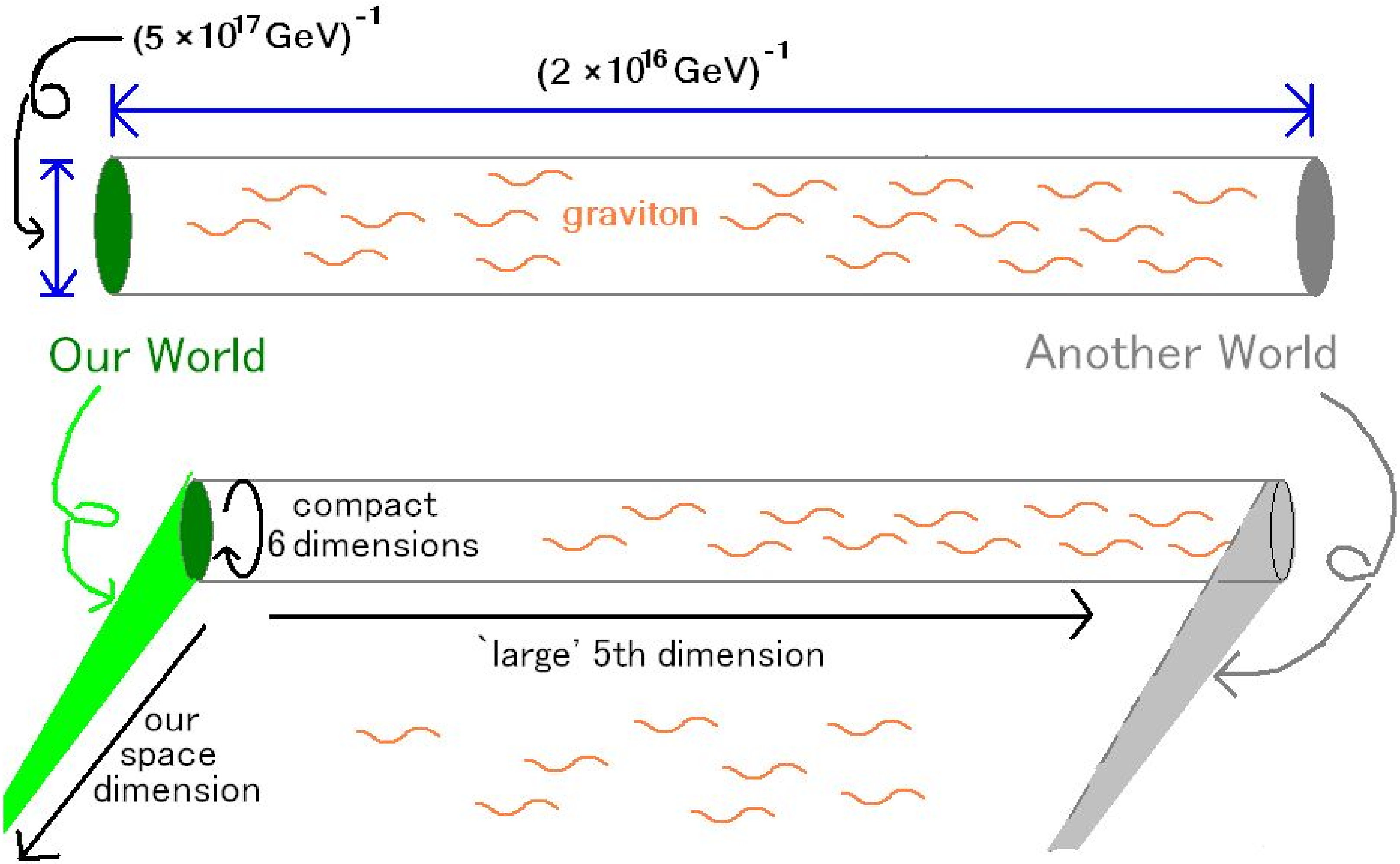
ゲージ結合の大統一と、陽子の安定性を共に満たすような素粒子の組みを見つけることは簡単です。中間スケールを許せばなおさらです。超対称性標準模型の場合はどうでしょうか？





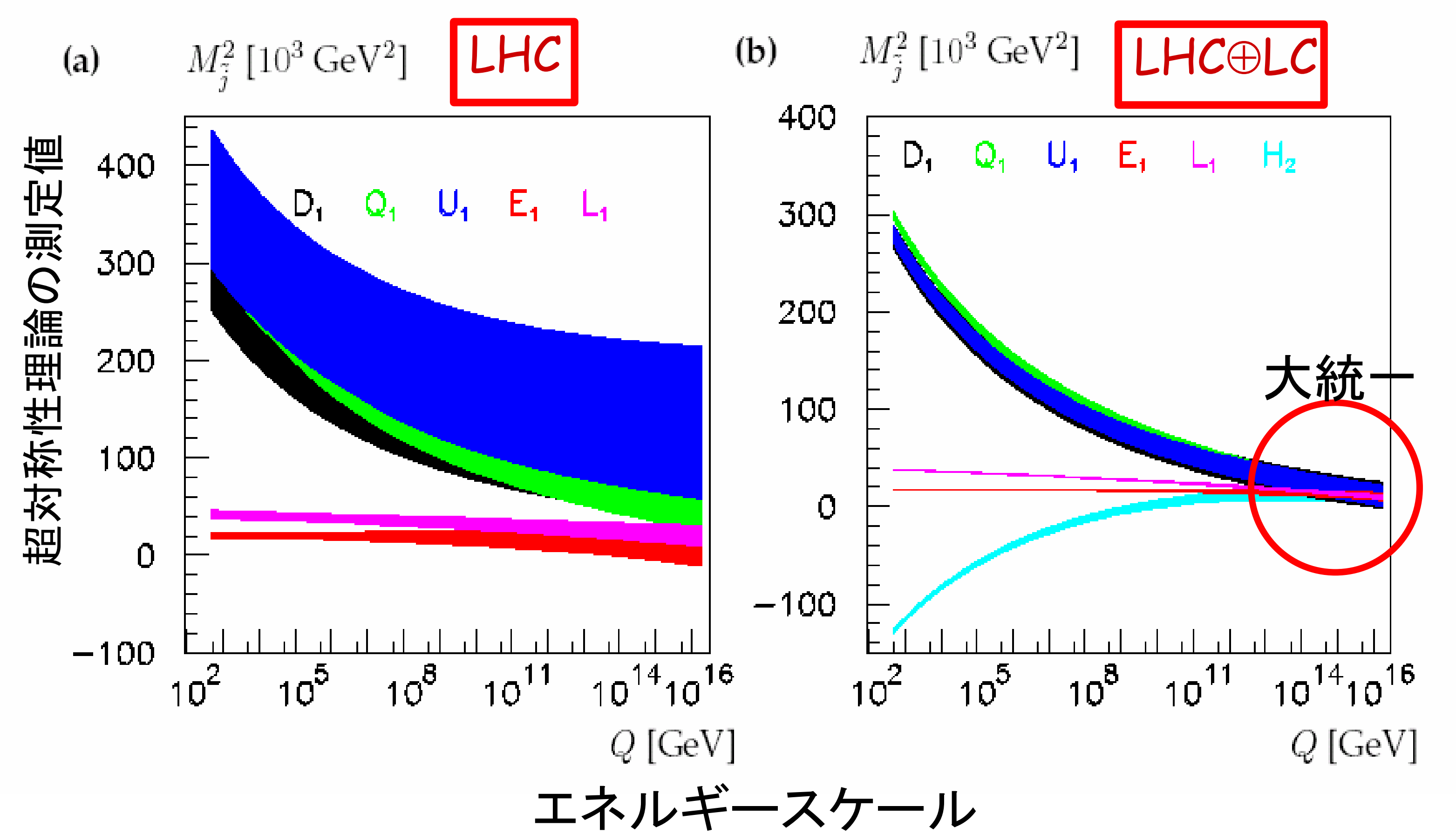
drown by K.Senda

大統一スケールとストリングスケールが 25 倍程度違うことが、11 次元理論、更には大きな余剰次元を持つ多くの素粒子模型を考える契機となりました。

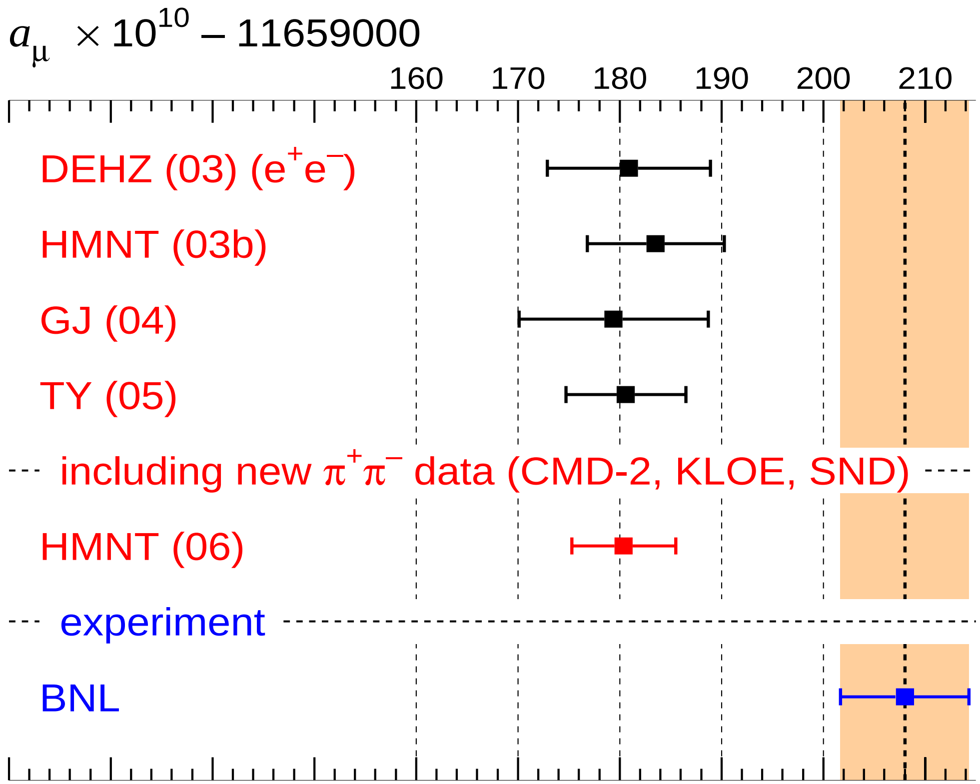


drown by K.Senda

超対称性粒子から宇宙初期・大統一理論を探る



from S.Yamashita's lecture at OHO2006

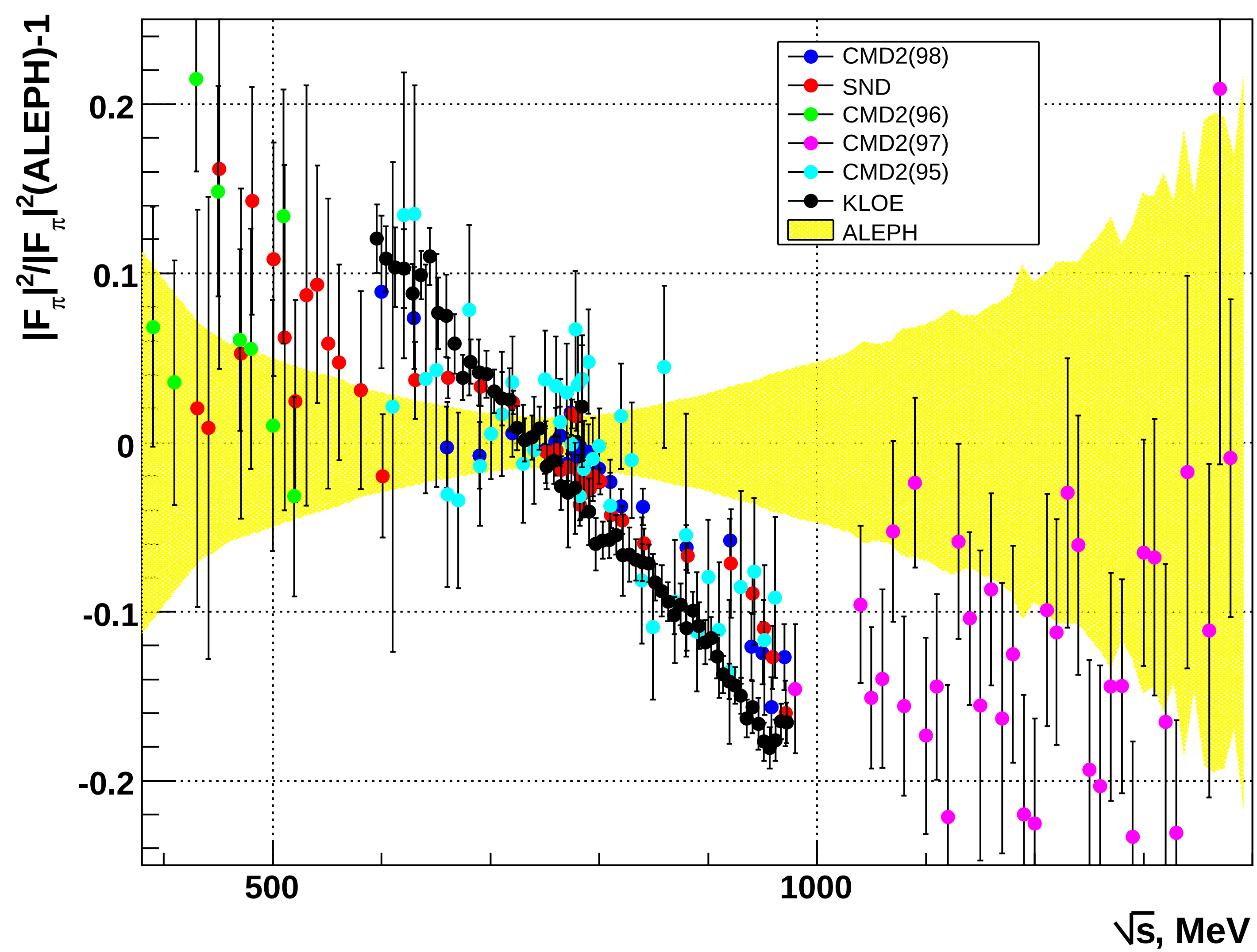


$$a_\mu^{SM} = 0.00116591804\ (51)$$

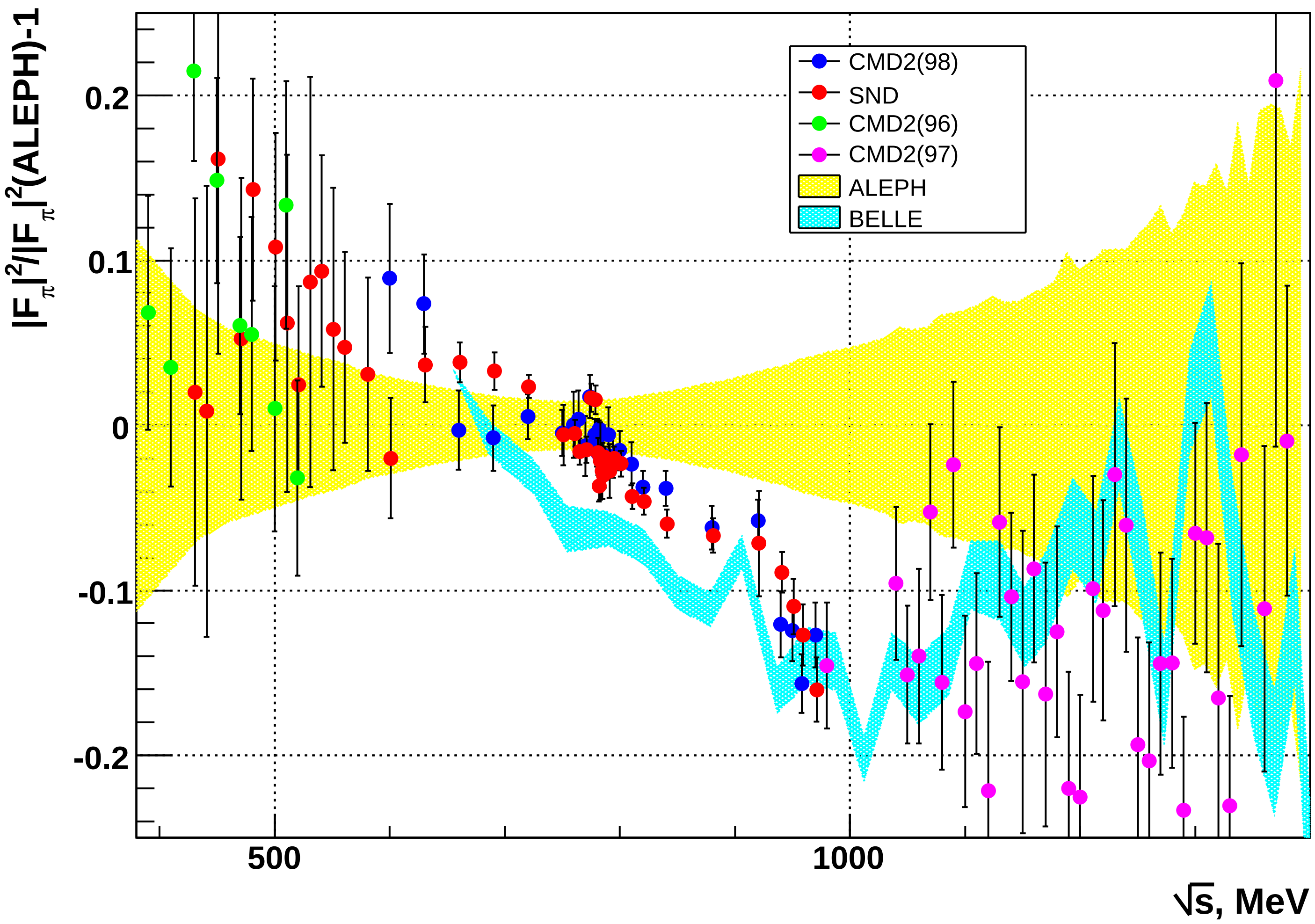
$$a_\mu^{exp} = 0.00116592080\ (63)$$

$$a_\mu^{exp} - a_\mu^{SM} = (276 \pm 81)\ \mathrm{X}\ 10^{-11} \quad [3.4\sigma]$$

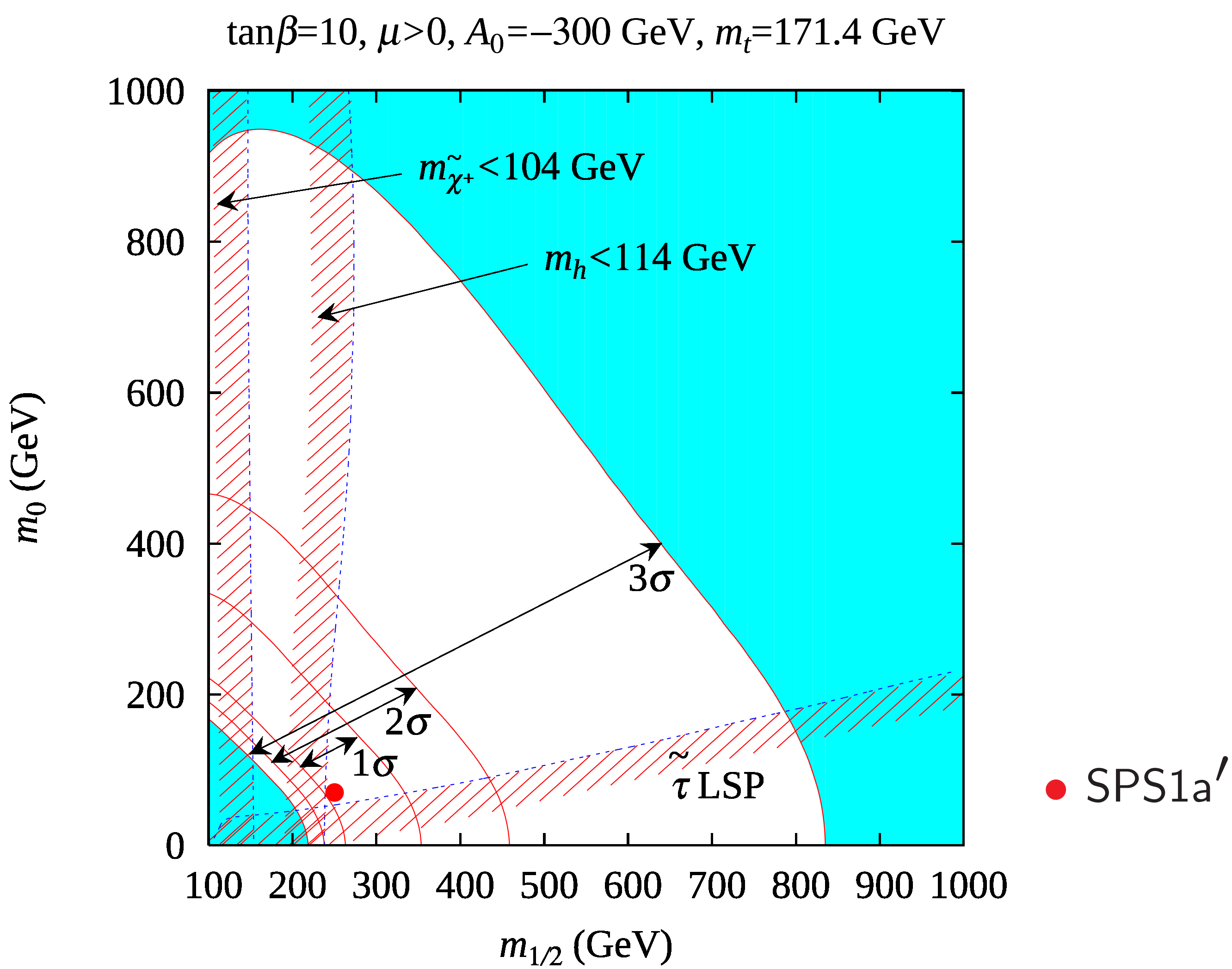
K.H., A.D.Marin, D.Nomura, T.Teubner, hep-ph/0611102



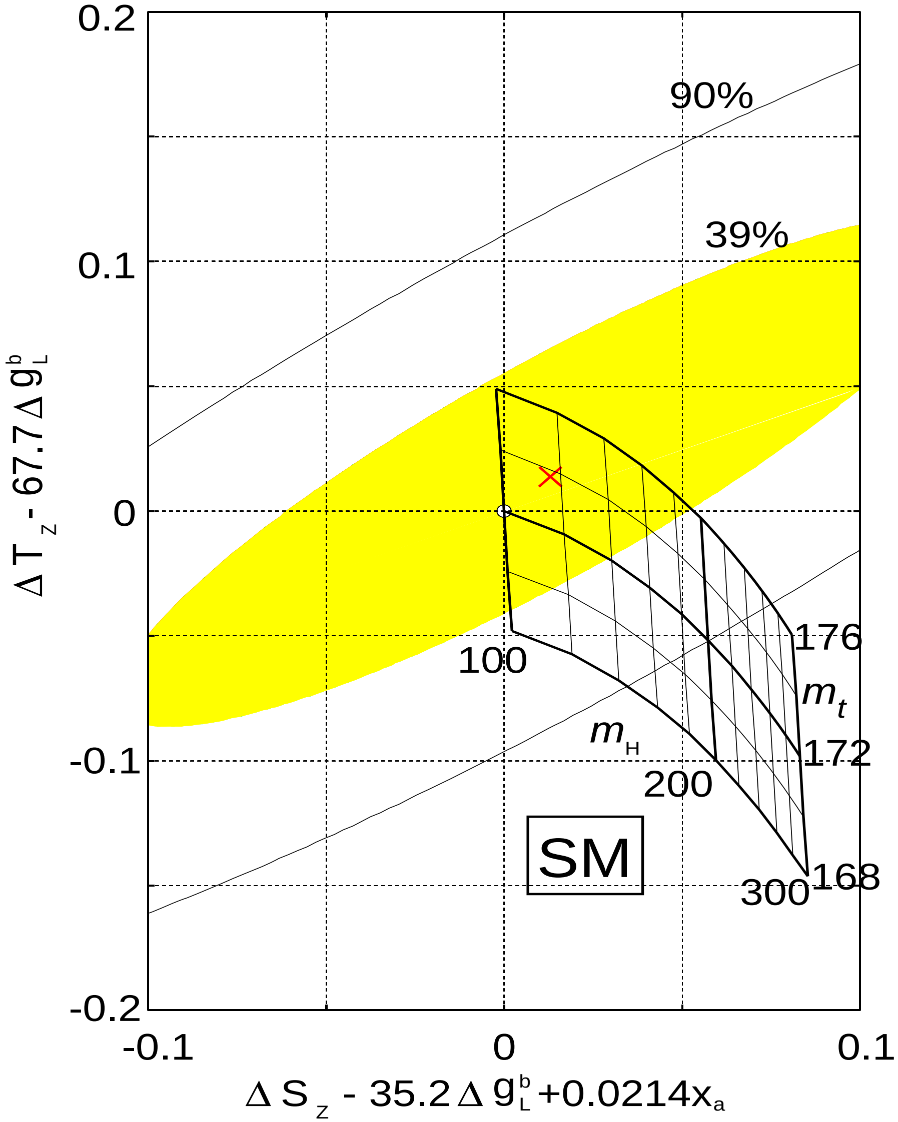
CMD2(98)
SND
CMD2(96)
CMD2(97)
CMD2(95)
KLOE
ALEPH
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
500
1000
$|F_\pi|^2/|F_\pi|^2(\text{ALEPH})-1$
$\sqrt{s}$, MeV

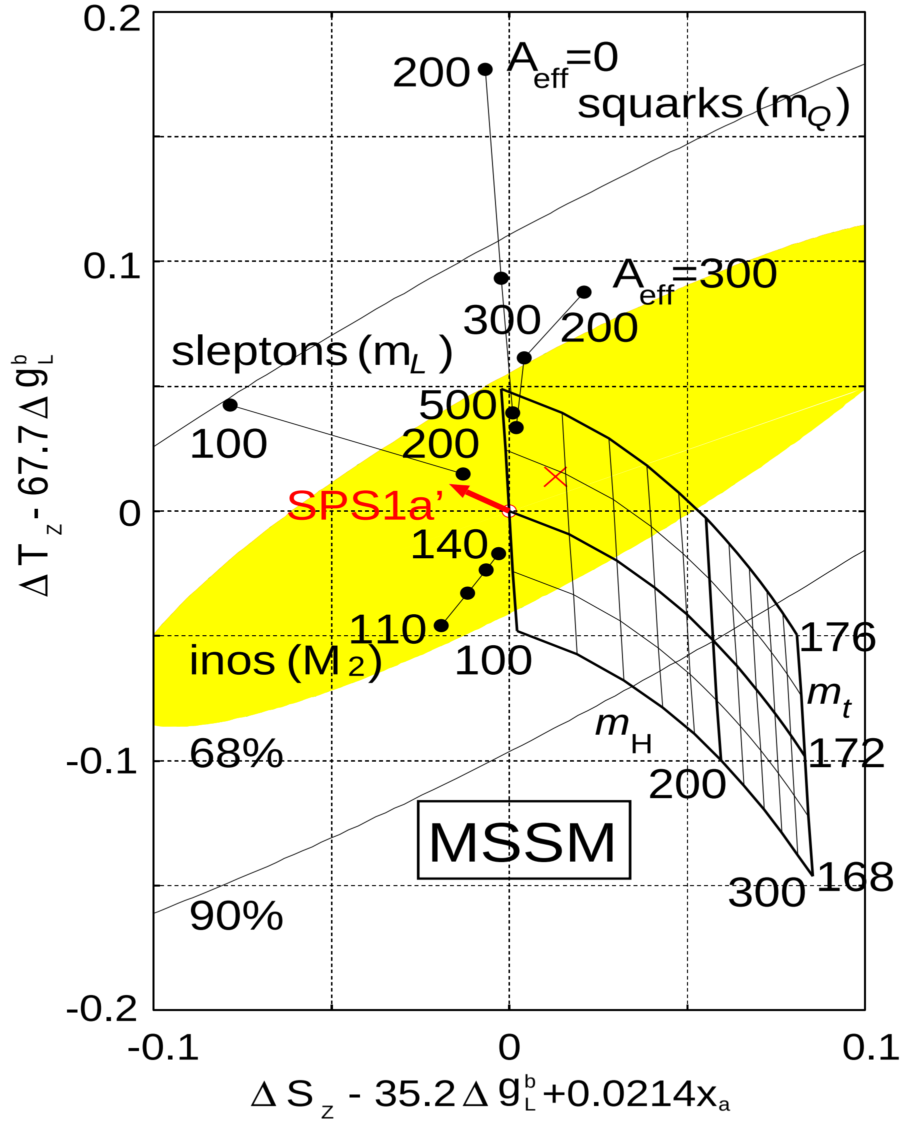


$|F_\pi|^2/|F_\pi|^2(\mathrm{ALEPH})-1$
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
500
1000
$\sqrt{s}$, MeV
CMD2(98)
SND
CMD2(96)
CMD2(97)
ALEPH
BELLE

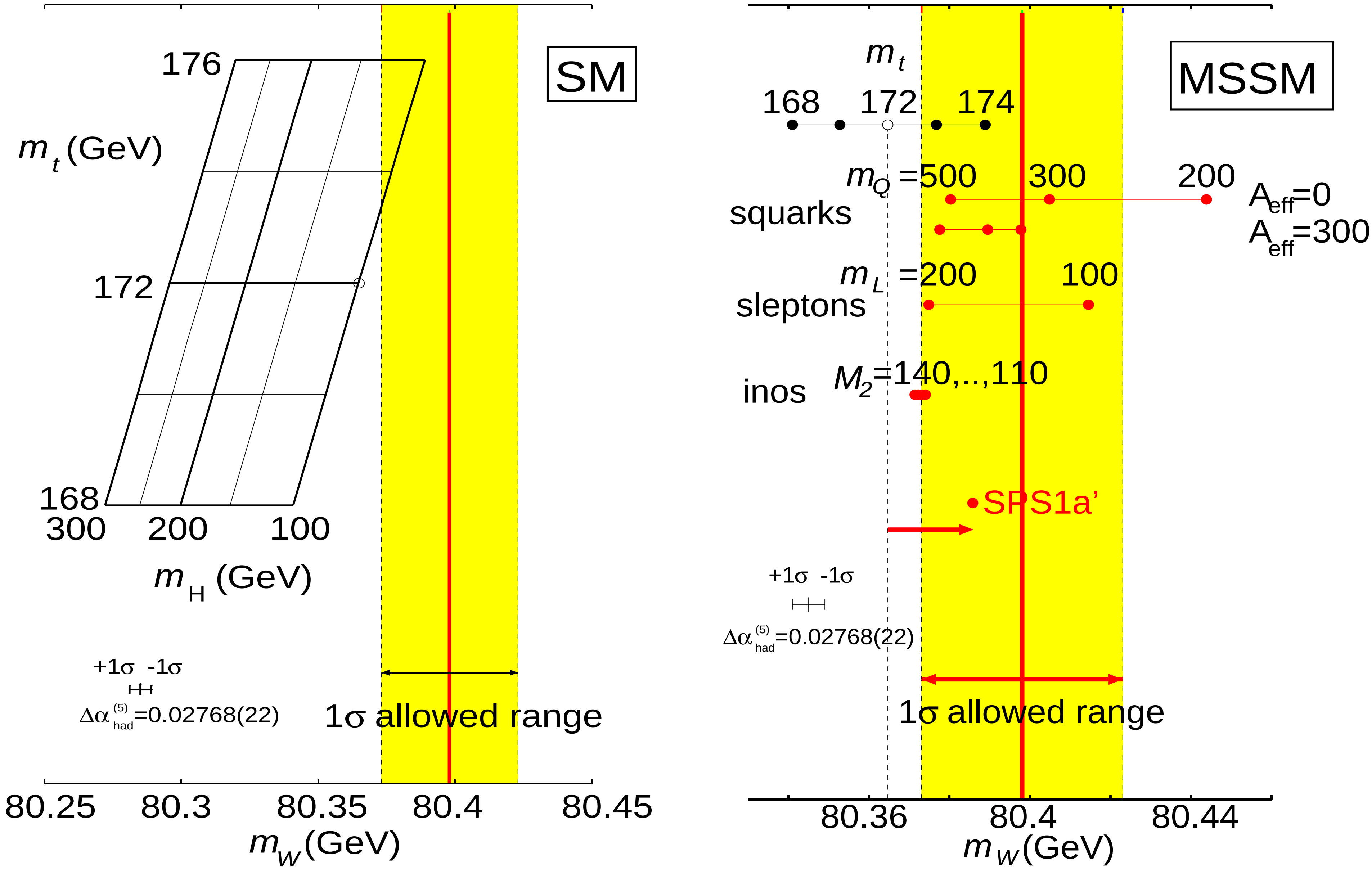


K.H., A.D.Marin, D.Nomura, T.Teubner, hep-ph/0611102



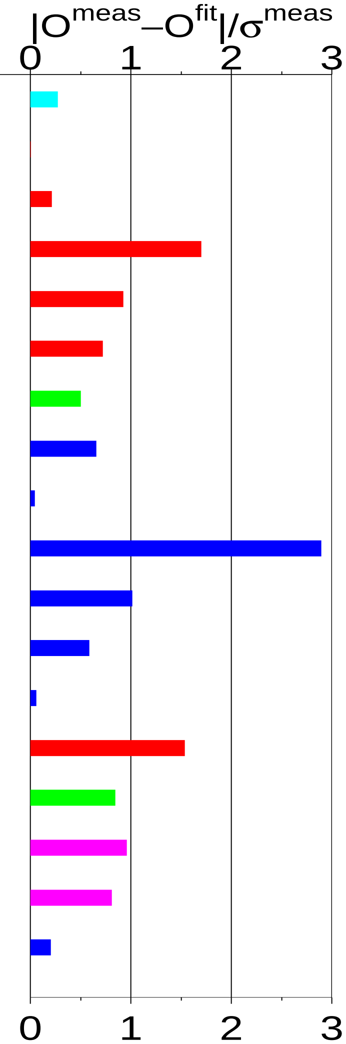


G.C.Cho, K.H., Y.Matsumoto, D.Nomura, in preparation

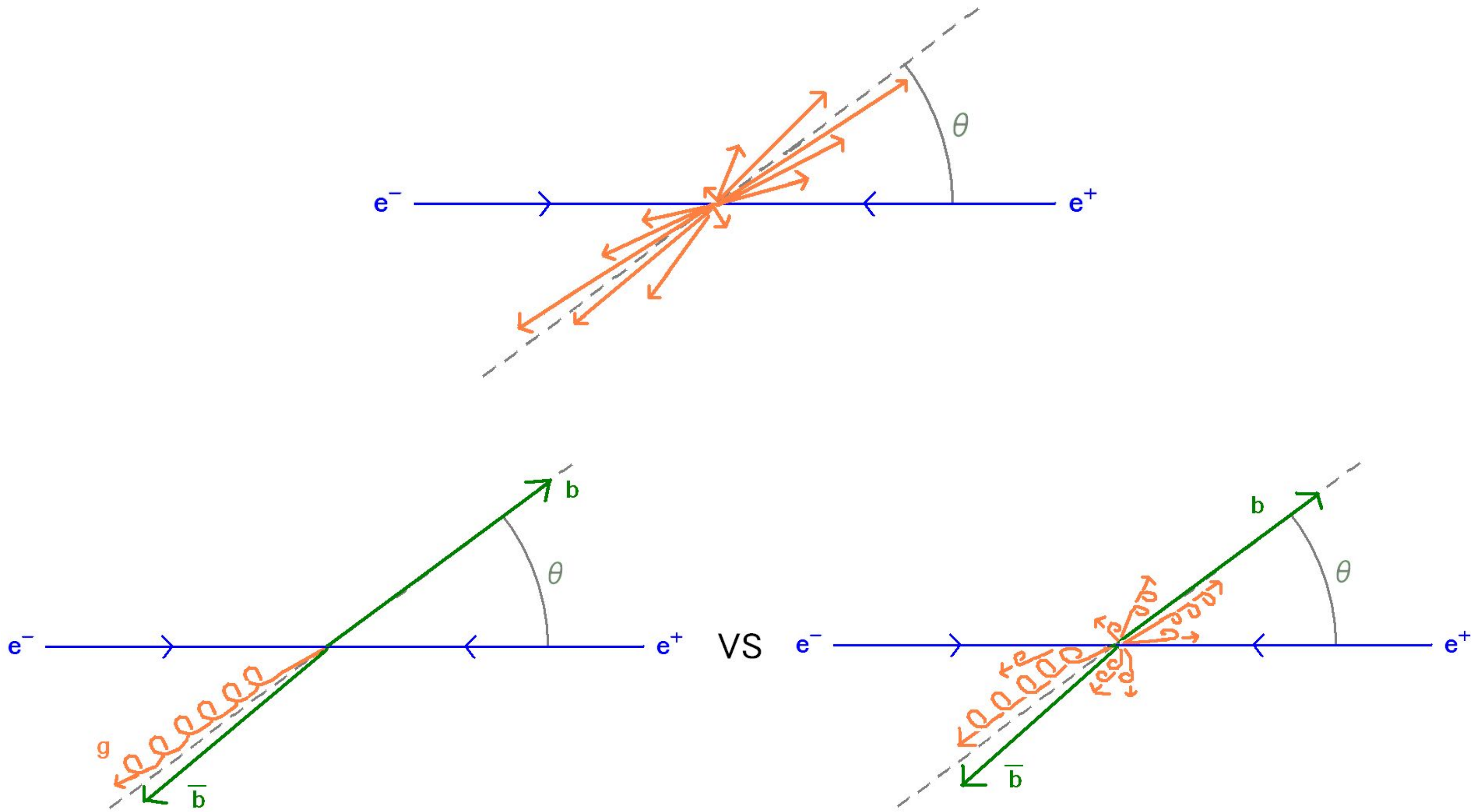


G.C.Cho, K.H., Y.Matsumoto, D.Nomura, in preparation

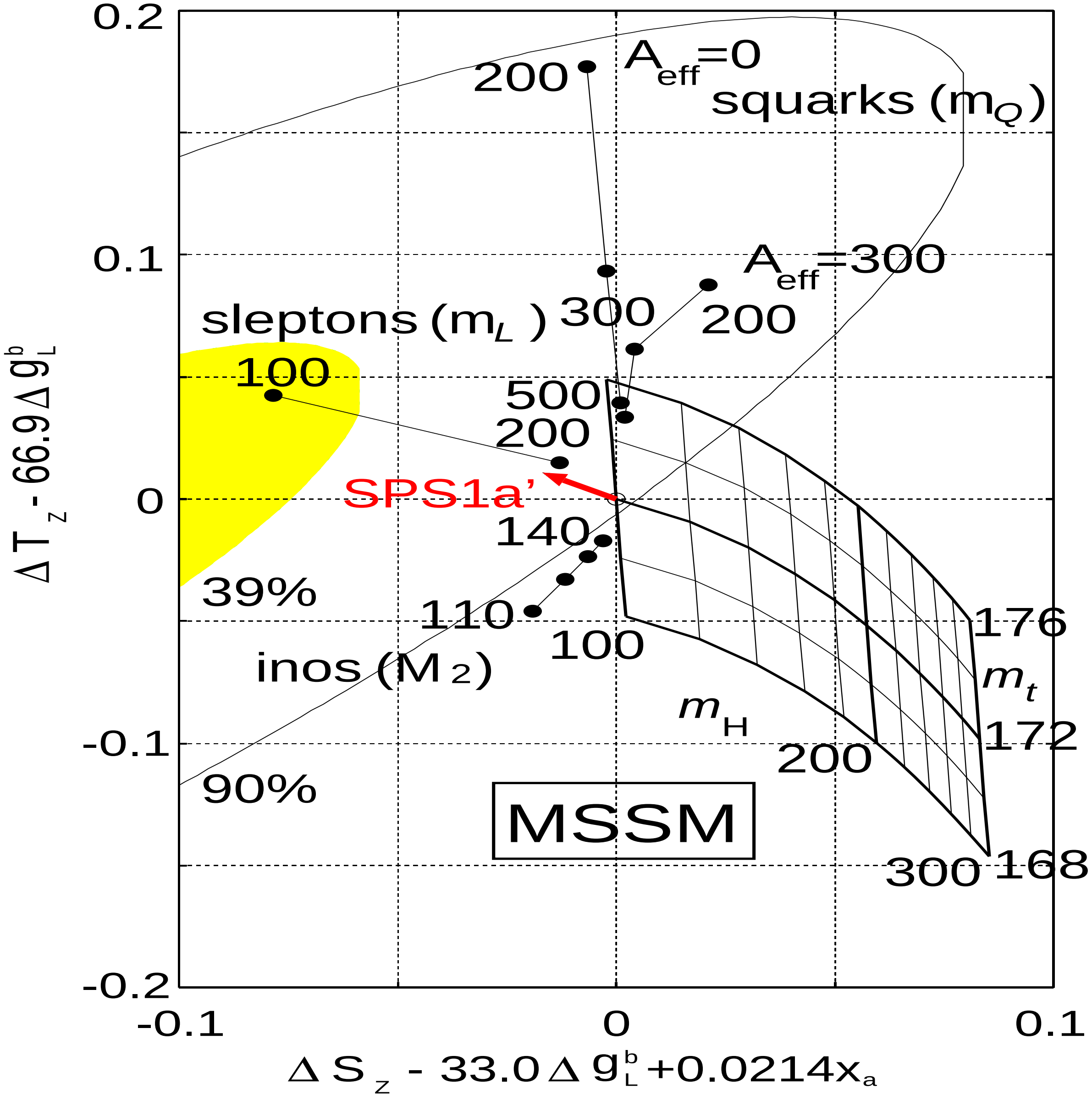
	Measurement	Fit
$\Delta\alpha_{had}^{(5)}(m_Z)$	0.02758 ± 0.00035	0.02768
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1875
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4957
σ_{had}^0 [nb]	41.540 ± 0.037	41.477
R_l	20.767 ± 0.025	20.744
$A_{fb}^{0,l}$	0.01714 ± 0.00095	0.01645
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1481
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21586
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1722
$A_{fb}^{0,b}$	0.0992 ± 0.0016	0.1038
$A_{fb}^{0,c}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742
A_b	0.923 ± 0.020	0.935
A_c	0.670 ± 0.027	0.668
A_l(SLD)	0.1513 ± 0.0021	0.1481
$\sin^2\theta_{eff}^{lept}(Q_{fb})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314
m_W [GeV]	80.398 ± 0.025	80.374
Γ_W [GeV]	2.140 ± 0.060	2.091
m_t [GeV]	170.9 ± 1.8	171.3



LEP EWWG Plots for the Winter 2007



θ
e⁻
e⁺
b
θ
e⁻
e⁺
g
b̄
VS
e⁻
b
θ
e⁺
b̄



G.C.Cho, K.H., Y.Matsumoto, D.Nomura, in preparation