

Q.V. HOCHENERGIE-PHYSIK: STATUS & PERSPEKTIVEN

1. EINFÜHRUNG

2. STATUS UND PERSPEKTIVEN

- Standard Modell
- Offene Probleme: ELW-SB ... Gravitation
- Maschinen-Ketten H, e, μ

3. LÖSUNGEN PHYS. FUND. PROBLEME

- Higgs-Mechanismus und ELW-SB
- Supersymmetrie und universelle Vereinigung
- Struktur der Raum-Zeit

4. SUMMA & PERSPECTUS

2.A STATUS: STANDARD-MODELL

1. Konstituenten der Materie

Thomson / Kaufman
... Gell-Mann / Zweig

Leptonen + Quarks in 3 Familien:

$\begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}_L$	u_R d_R	$\begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix}_L$	c_R s_R	$\begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix}_L$	t b
$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \end{bmatrix}_L$	ν_{eR} e^-_R	$\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{bmatrix}_L$	$\nu_{\mu R}$ μ^-_R	$\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{bmatrix}_L$	$\nu_{\tau R}$ τ^-_R

SM Spektrum kompl.

t : Existenz + Masse vorbestimmt

[PETRA, ARGUS, LEP]

$$m_t = 180 \pm 14 \parallel 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}$$

ν_τ : nachgewiesen Terahertz

3 Familien: $N_\nu = 2.984 \pm 0.008$

2. 4 Fundamentale Kräfte

Glashow, Salam, Weinberg
Feynman, Gell-Mann
Einstein

Elektromagnetismus
Schwache Wechselwirkung
Starke Wechselwirkung

isomorph: $J = 1$

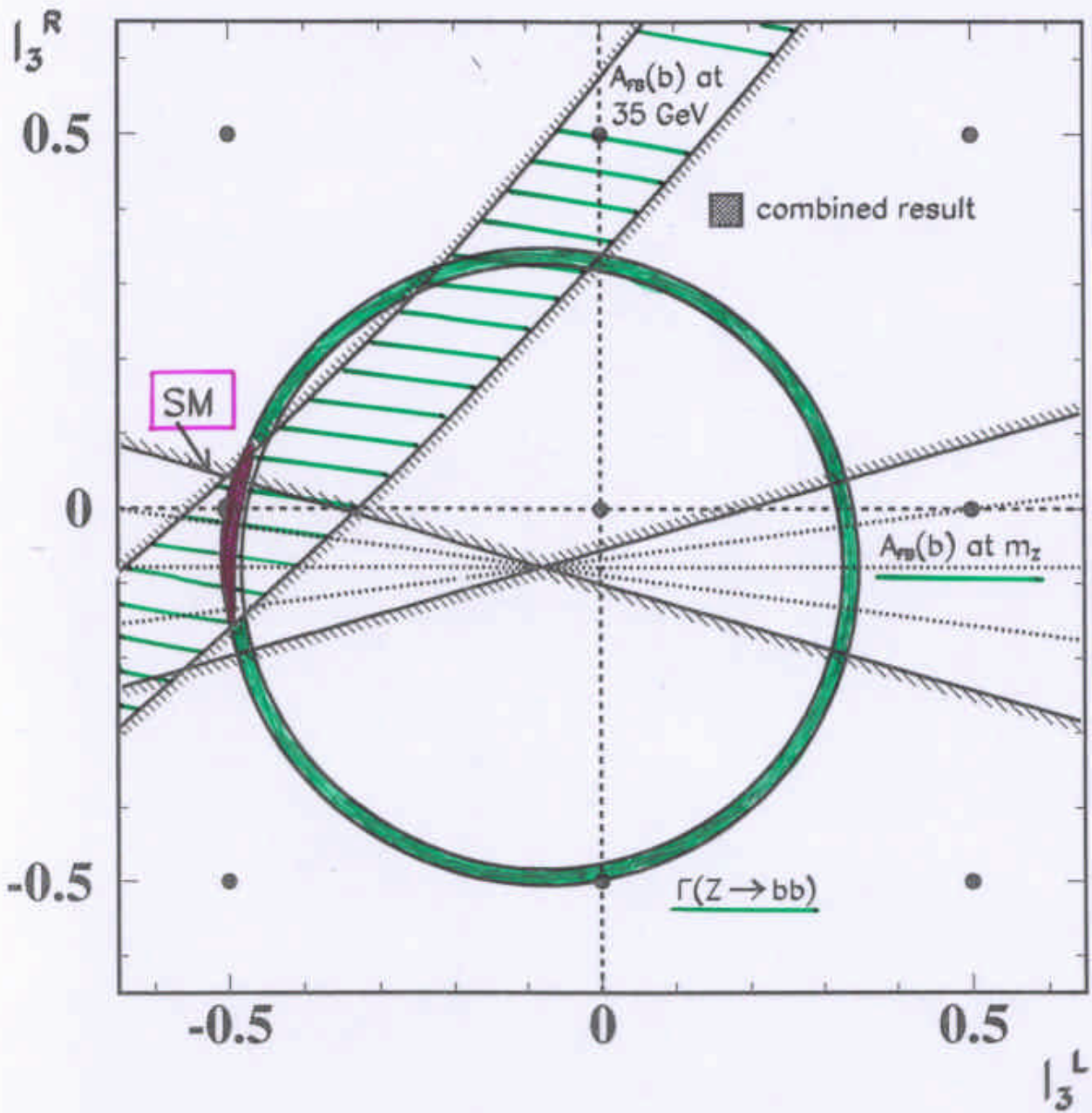
$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ Qu. Eichfelder

Gravitationswechselwirkung

klassische $J = 2$ FT

beigefügt ad hoc

Schäule
2.





stabil. in Teilchen $\sim 10^{-3}$

mod: $A_{FB}^b, M_W [NC]$



noch keine Präz.analyse

"nicht-abel'sche Sym."

$$M_Z = 91.1871(21) \text{ GeV}$$

$$M_W = 80.451(35) \text{ GeV}$$

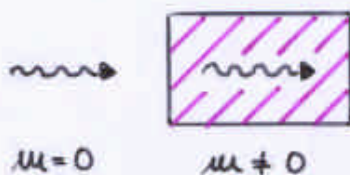
$$\sin^2 \theta_W = 0.2316(2)$$

$$\alpha_S = 0.1184(31)$$

Higgs, Kibble
Brout, Englert,
Hagen, Guralnik

3. Higgs-Mechanismus

eich-invariante Einführung von Masse:



fundam. Skalar:

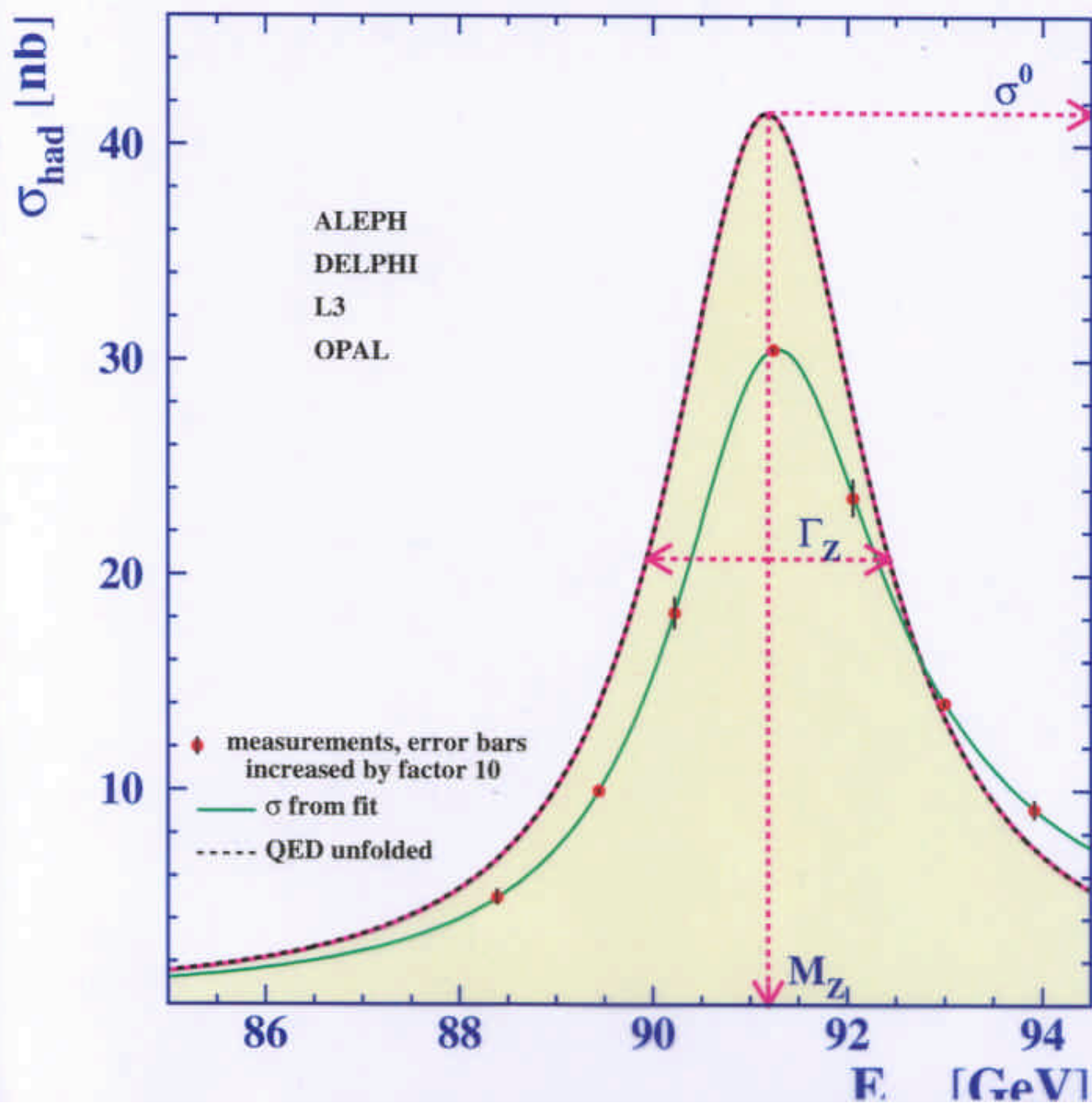
Selbst WW: $v \neq 0$

WW Energie = m

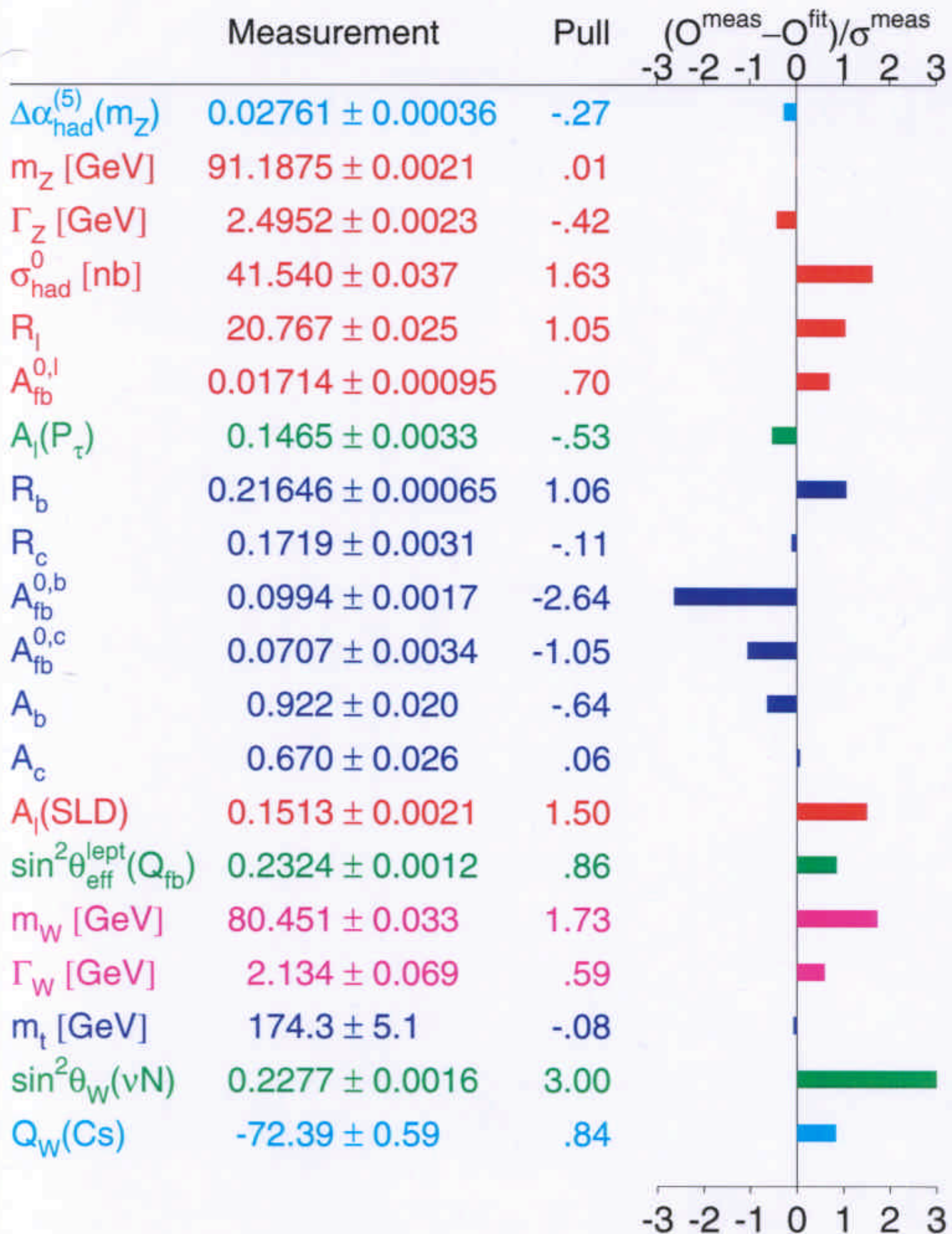


2.3 ZENTRALE PROBLEME

- 1) Higgs-Mechanismus für Erzeugung von Massen realisiert?
oder Alternative: Starke elektroschwache Sym. Brechung?
- 2) Große / Universelle Vereinigung: NE Supersymmetrie realisiert?
Proton-Zerfall?
Neutrino-Physik?
- 3) Struktur der Raum-Zeit: extra Raum-Dimensionen?
/ Gravitation ... bei Skalen $\Lambda_D \ll \Lambda_{4PL}$?

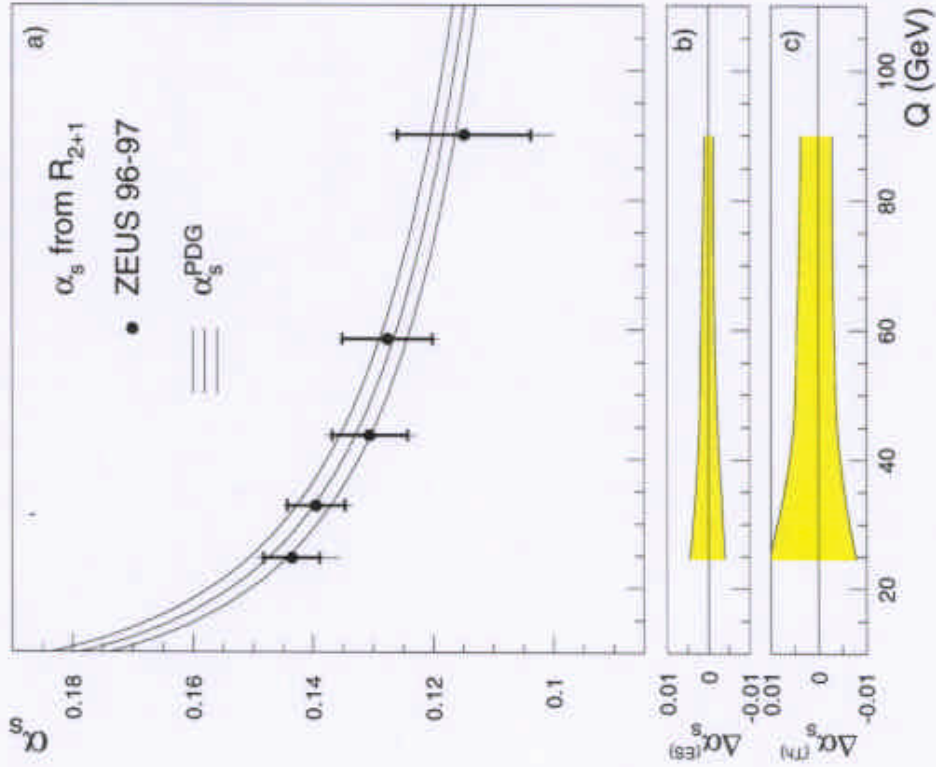
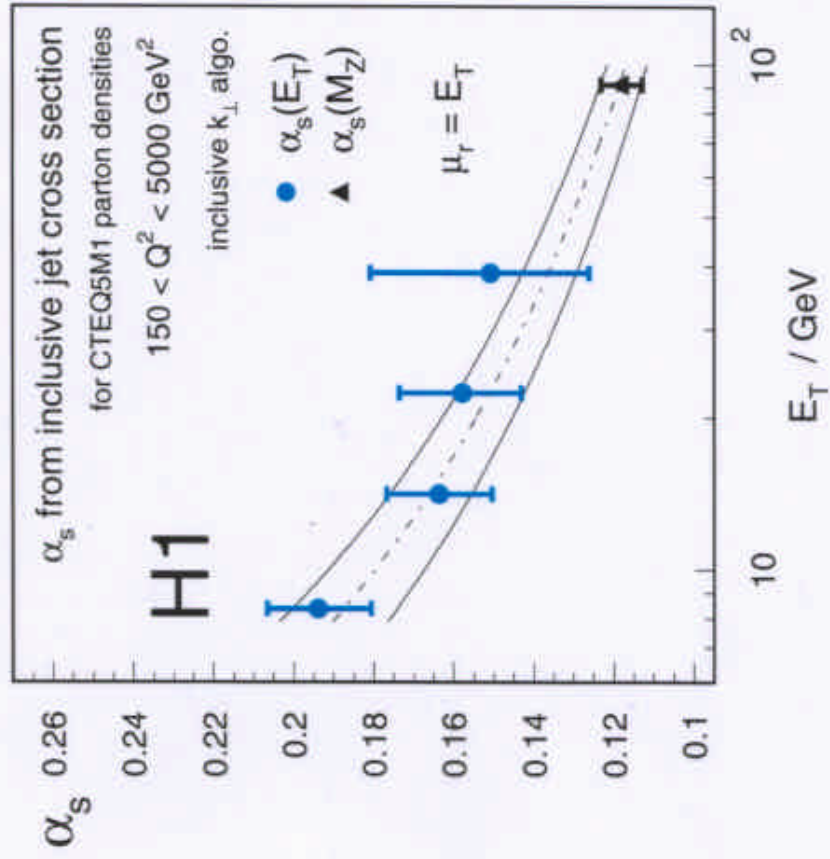


winter 2002



courtesy g. wolf

ZEUS

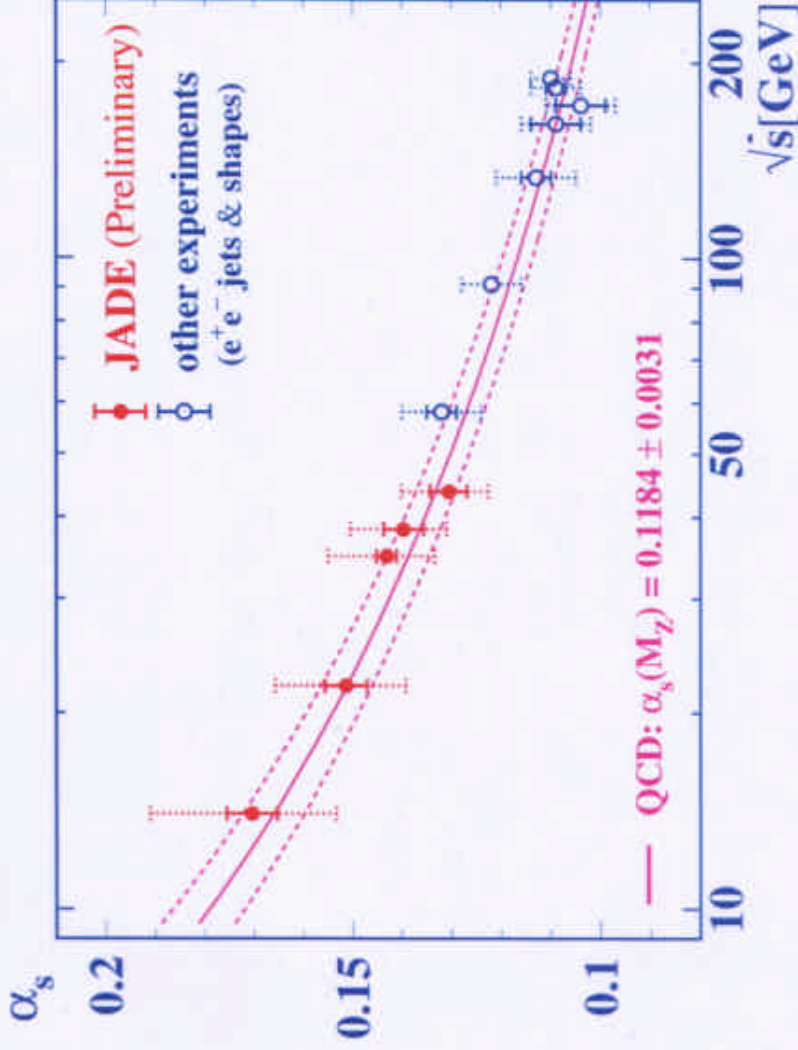


5. Summary and Conclusions

biebel ea

- Resurrection of JADE software:
e⁺e⁻ data at $\sqrt{s}=14-44$ GeV ready for state-of-the-art QCD studies
- Performance of LEP tuned hadronisation MC at PETRA energies:
Pythia o.k., Ariadne/Herwig moderate (need re-tune?), Cojets disfavoured
- Measurements of α_s : **Resummed NLO+NLLA reliable down to $\sqrt{s}=14$ GeV**

- First determinations at 14+22 GeV
- Much higher precision than in old PETRA publications
- Method consistent with LEP/SLC measurements
- **Hadronisation uncertainties at 14 GeV $\approx O(\Delta\alpha_s^{\text{ren.scale}})$**



Fit of QCD expectation:

$$\alpha_s = 0.1213 \pm 0.0006$$

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 8.3/11 \text{ (exp. errors)}$$

Fit of $\alpha_s = \text{const.}$:

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = 43/11 \text{ (tot. errors)}$$

$$P(\chi^2) \approx 10^{-5}$$

5

SM bei ew Skala

→ SUSY

GUT

→ Grav.

Planck

→ SM für 10 → GUT / Planck

→ N. Stk. WW [1 TeV]

→ TeV gravitation

2.2 ZUKÜNFTIGE BESCHLEUNIGER - PROGRAMME

19

TeV Skalen - Beschleuniger

⊕ Hochpräzisions - Analysen

H: E_{REAL} neue Expt

L: $E_{VIRT} \gg E_{REAL}$
virt. Expt

a)

H-Kette

■ LHC am CERN:

$$E = 14 \text{ TeV} \rightarrow E_{eff} \sim 1.4 \text{ TeV}$$



■ VLHC am Fermilab:

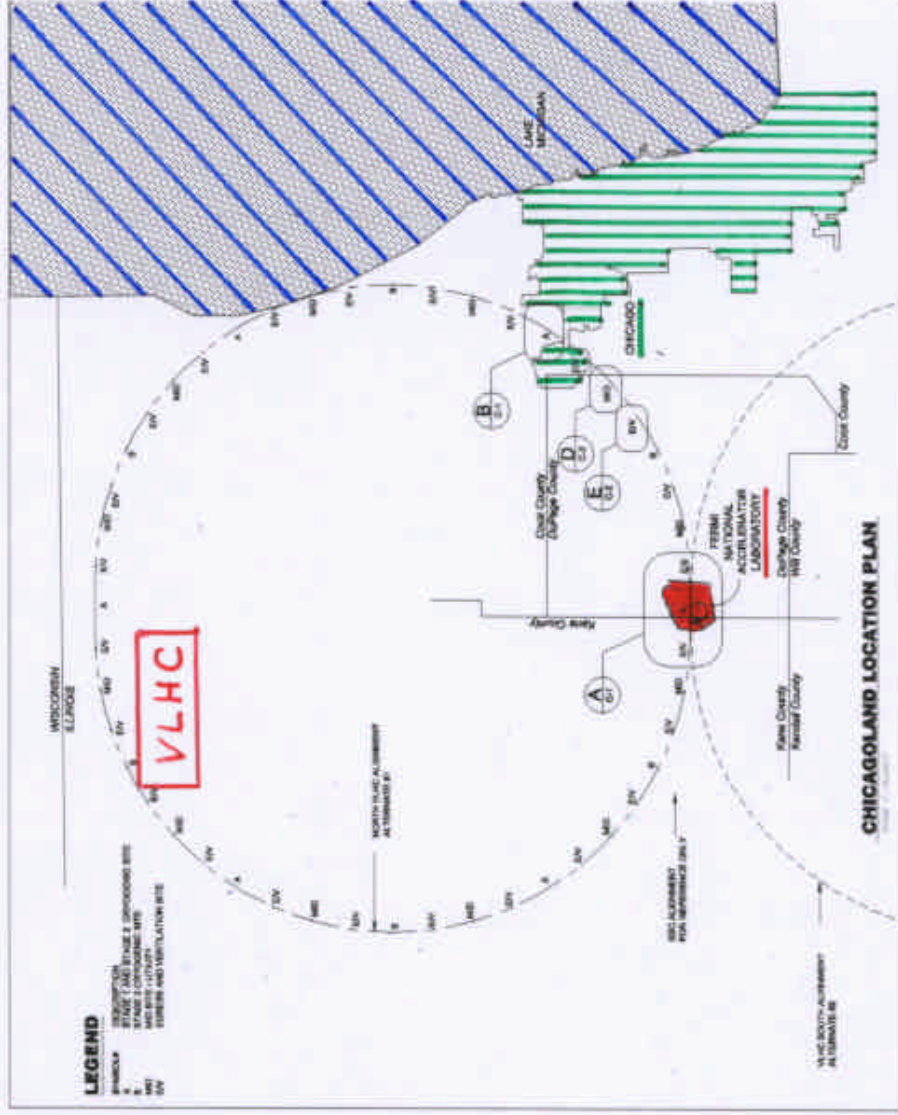
pp: Stage # 1: Superferische 2T Magnete: 40 TeV

Stage # 2: supraleitende 8T Magnete: 200 TeV

"no [machine-physics] show-stopper"

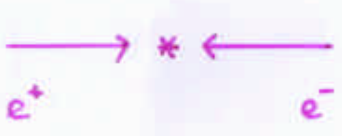
- possible location:

FNAL Machine Seminar



b) e-Kette

e⁺e⁻ linear collider : Energie in 1 Schuf : hohe Grad.



medv. Rep. frequenz : tu. Dui ~ atomar

PHASE I : convent. E design : NLC, JLC [-3 bis 4a]

TESLA : A) E = 500 gev $\int L = 300 fb^{-1}$

scdg B) 800 gev $500 fb^{-1}$

"project ready to go" : coll ~ 2012

PHASE II : Multi-TeV Anlage : 1 bis 3 bis 5 TeV

Studie : CLIC 2-Phase Beschleuniger
als 2te generations-Anlage

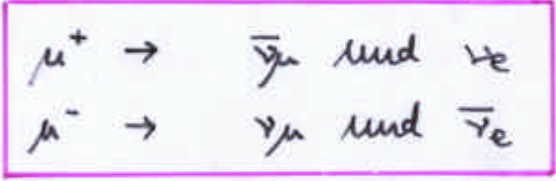
c) mu-Kette

Neutrino physik
Hochauflösung im multi-TeV Bereich }
}

■ Proton-Driver : 50 gev; 1 bis 4 MW }
HIPA ~ 2007 $P \rightarrow \pi \rightarrow \mu \rightarrow \nu's$

■ Neutrino-Fabrik :

μ Cooling
accelatg
Storage



$\sim 10^{20} \nu/a$

■ Muon-Collides : Flap ~ LC, doch : L reduz. zu 10^{-1} }
Cooling verfein. E Besol zu 10^{-5} }





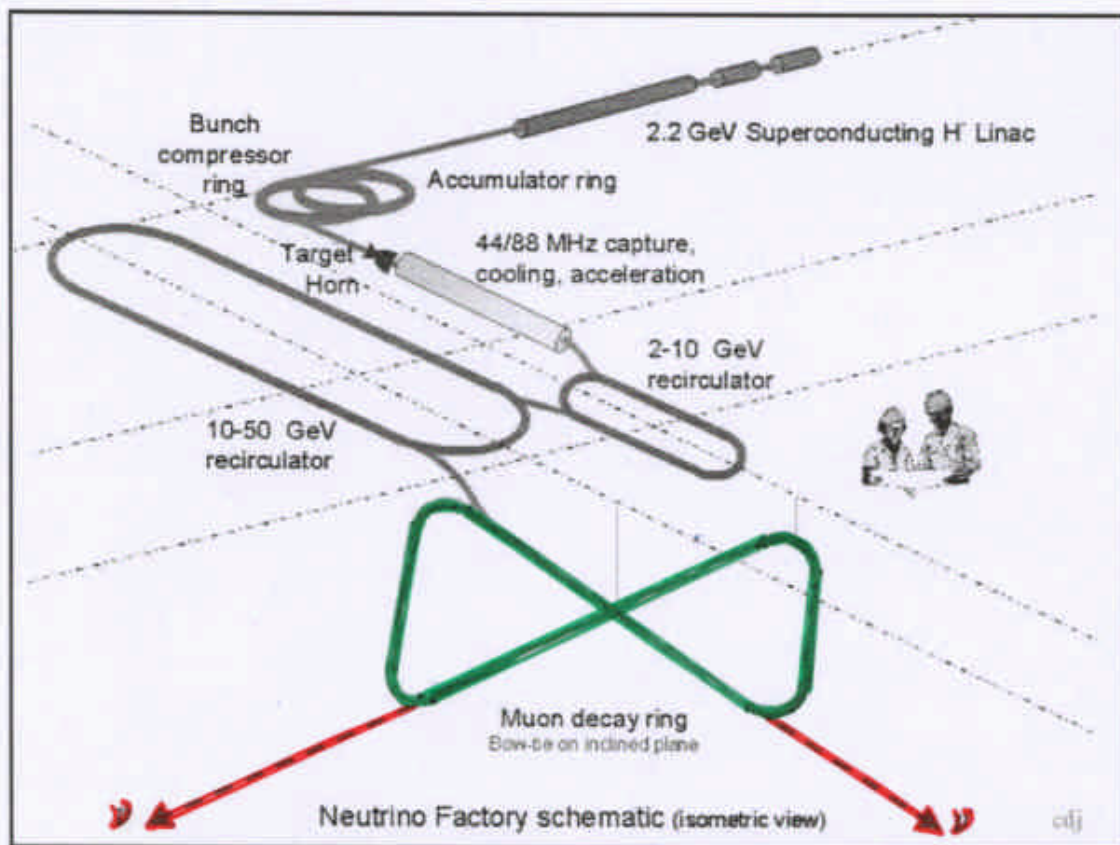
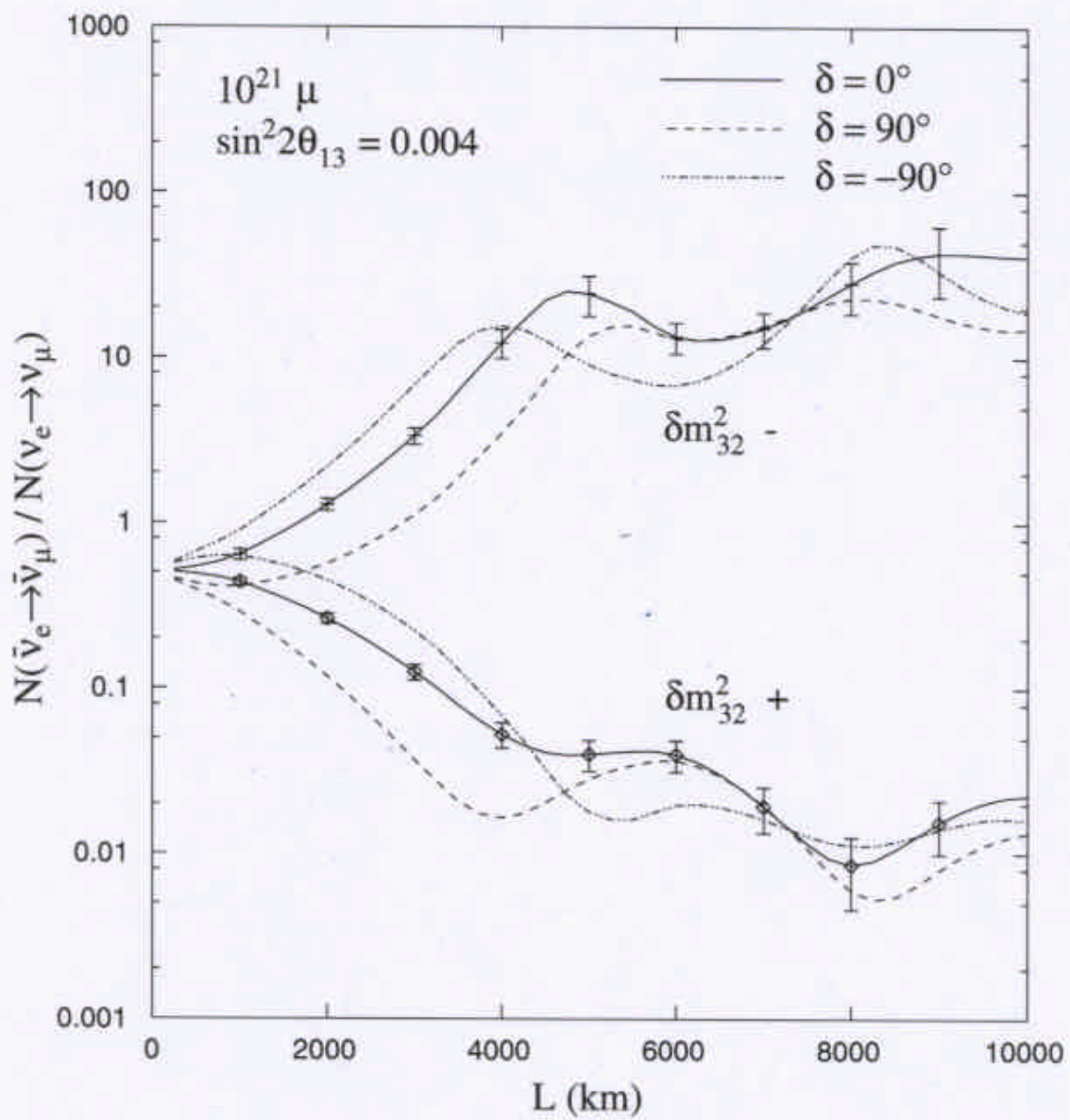


Figure 4: Conceptual layout of a neutrino factory at CERN, based on the SPL



potentielle Zeit-Skala : ~ 2010 bis ≈ 2020

alle Projekte real. in internat. Coop:

EU \sim USA \sim [Asien]

3. PHYSIKALISCHE LÖSUNGEN

A. HIGGS - MECHANISMUS

- Erzeugung von Massen fundamentaler Teilchen
- g.feld theoretischer, mathem. konsist. Abschluss des SM
- Öffnung neuer physikal. Perspektiven

MASSEN - ERZEUGUNG :



Mechanismus def. alle Kopplungen :

ALLE HIGGS-EIGENSCHAFTEN

BEKANNT -- AUSSER MASSE :

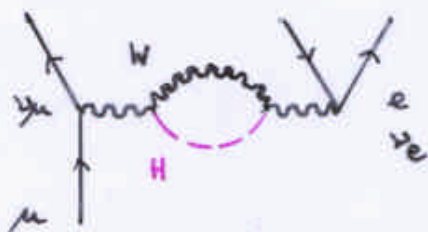
(a) obere Grenze : Higgs-SelbstWW steigt an undefiniert mit Sk

$V[H] < \infty$ bevor $Q < M_{PL}$:

$\sin^2 \theta_w \sim 0.2$

$M_H \lesssim 200 \text{ GeV}$

(b) SM abschließg :



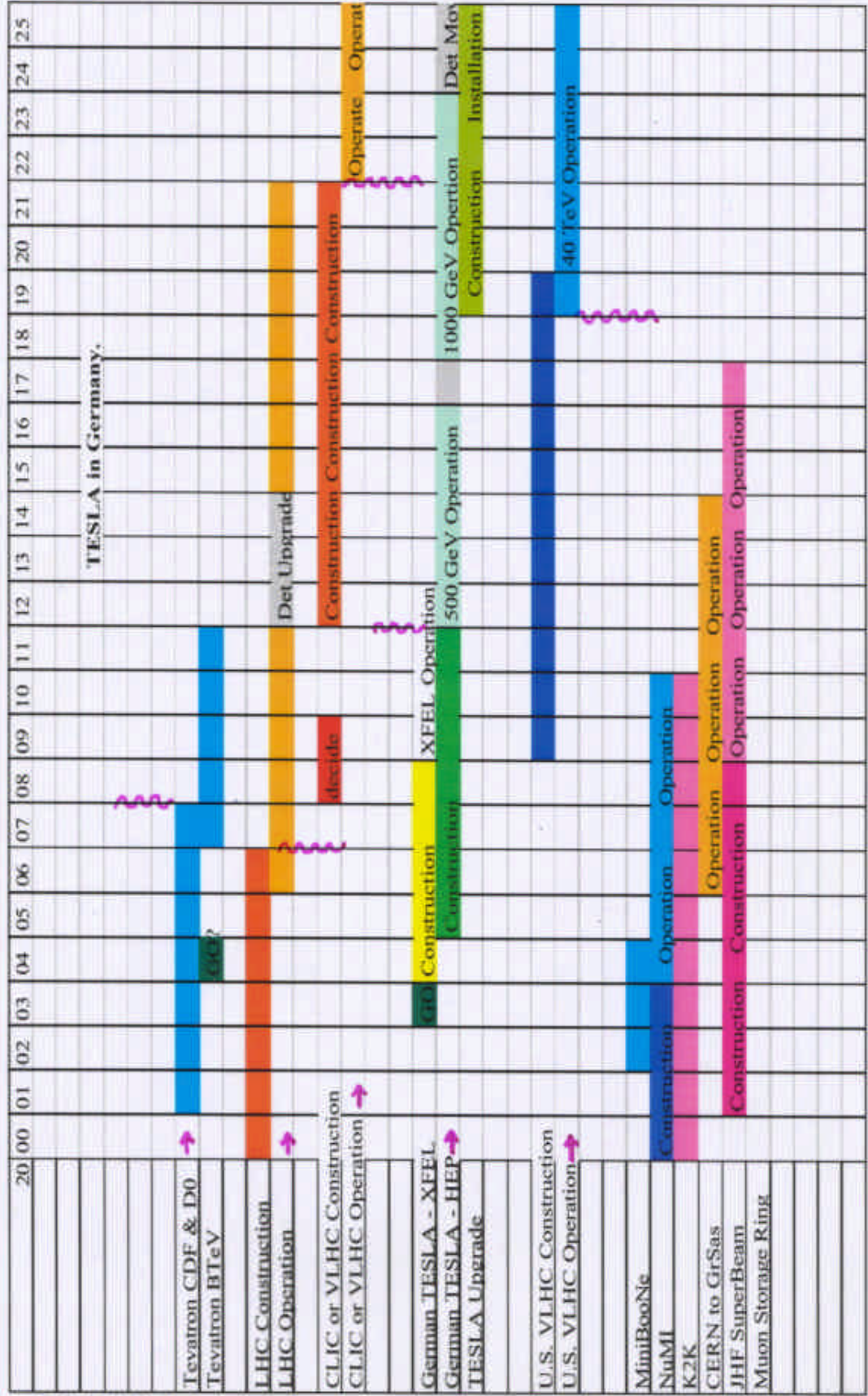
σ_F : $\Delta r_H \sim \alpha \log M_H^2 / M_W^2$

$M_H \approx 100 \text{ GeV} \pm 50\%$

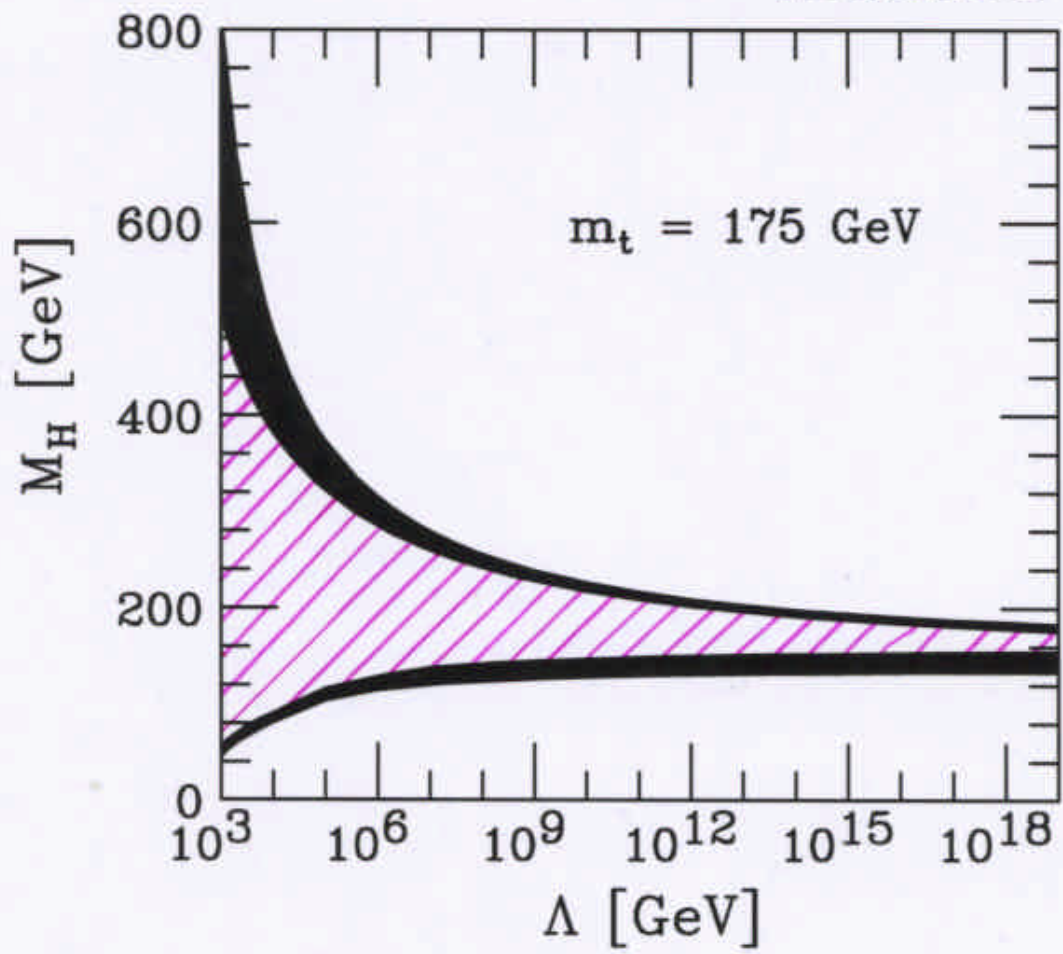
$\lesssim 200 \text{ GeV}$ at 95% CL



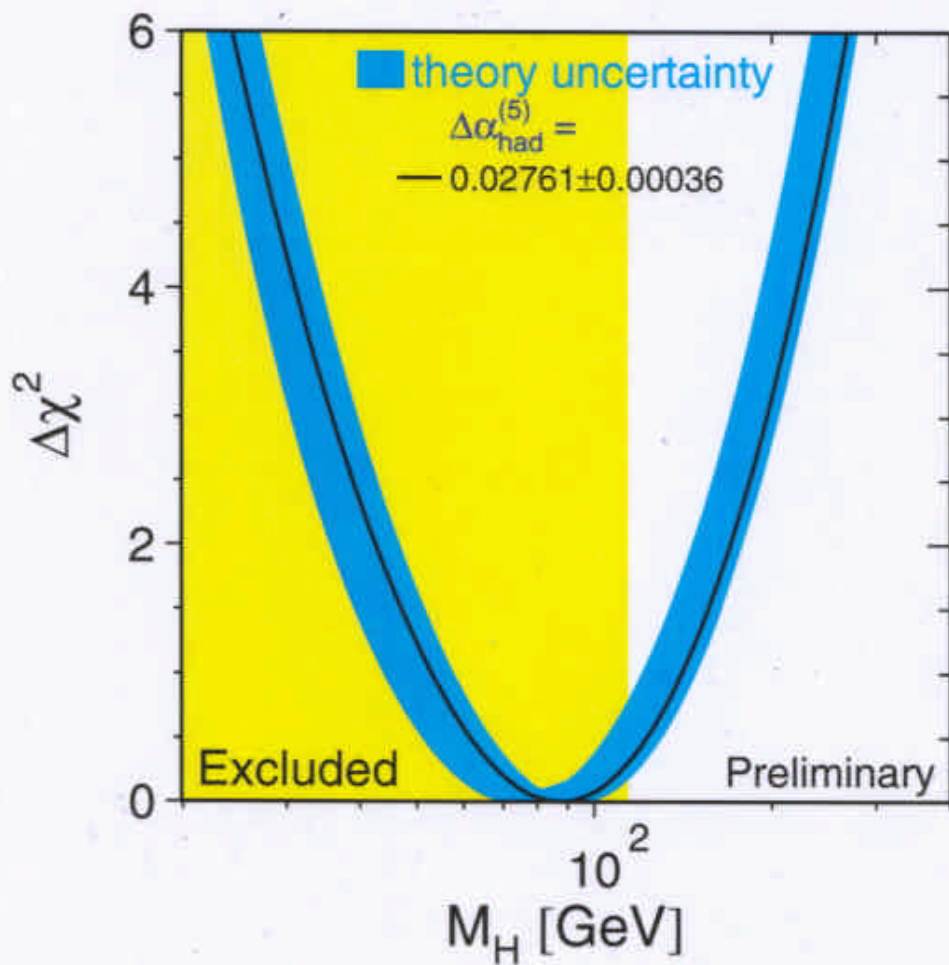
Very Large Hadron Collider



Riesseltmann



LEPEWWG
SNOWMASS + IGGS WG

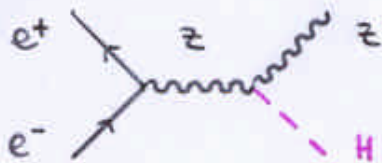


kein Theorem : S, T, U Parameter kompatibel gemacht mit schweren Higgs-Bosonen bei Zfügung NP:

- neue schwere ehw Vektor-Bosonen
- starke Higgs Interaktionen ...

: verfehlen Erklärung ehw Mix-Winkel

(c) LEP2 untere Grenze:



NOT SEEN

$$M_H \geq 114.1 \text{ GeV}$$

$$[2\sigma \text{ excl } 118 \sim 115.6]$$

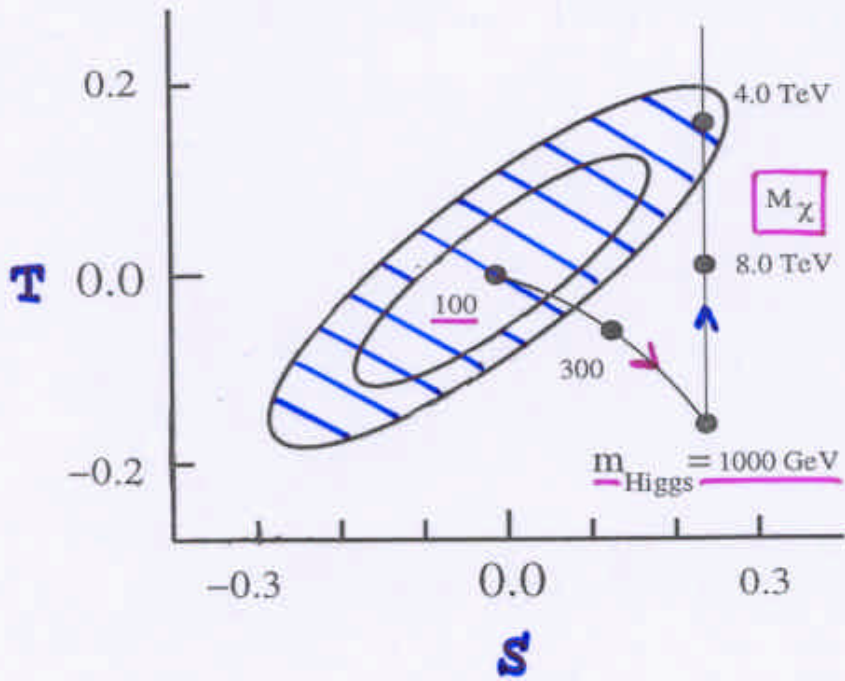
Natürliche Interpretation von Präzisions + Such-Daten weisen auf ein schmales Fenster hin: $M_H = 100 \dots 200 \text{ GeV}$ für Higgs Masse.

ETABL. HIGGS MECHANISMUS :

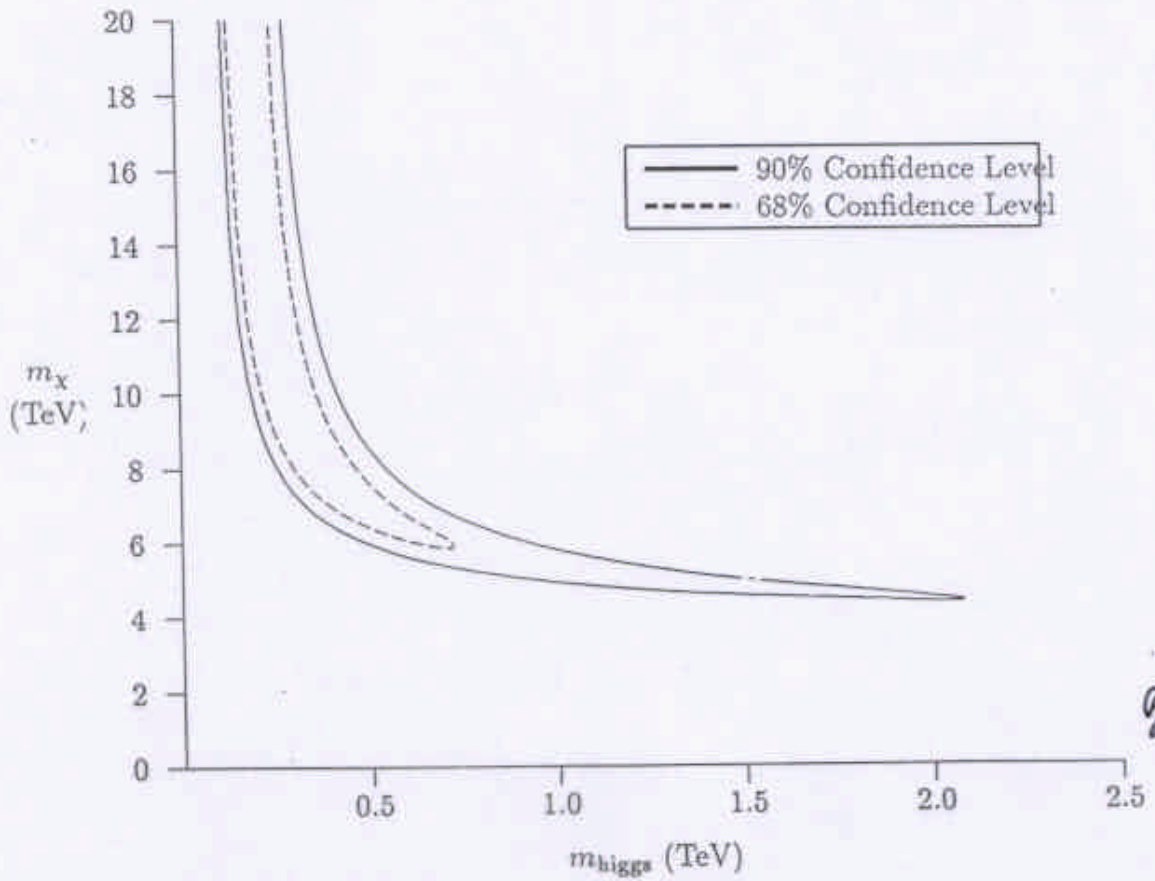
- [1] entdecke Higgs-Boson(en)
- [2] beweise: Kopplg \sim Masse
- [3] rekonstruiere Higgs Potential
 \sim ehw Sym.-brechung

$$V = \lambda [|\varphi|^2 - v^2]^2$$

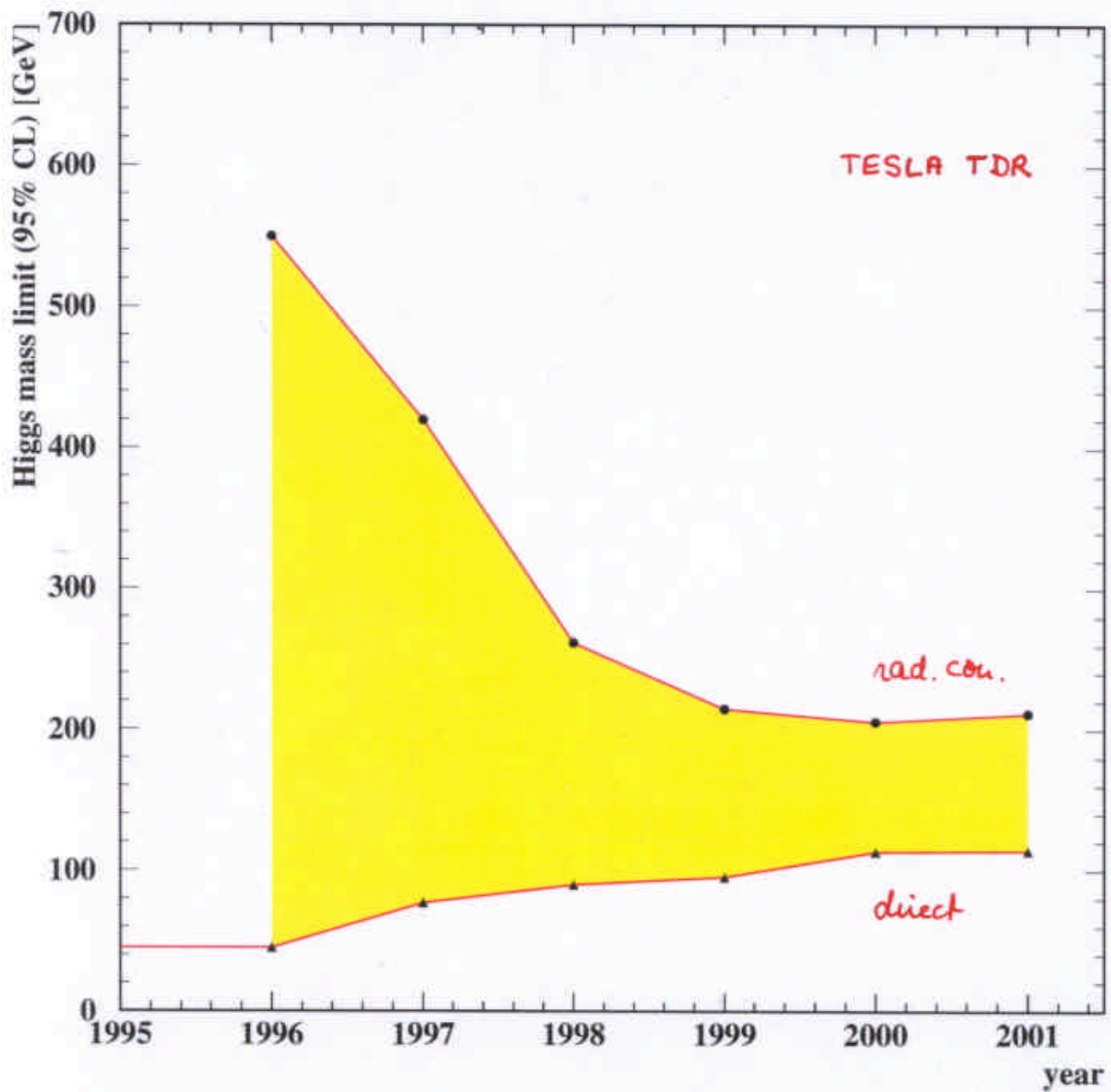




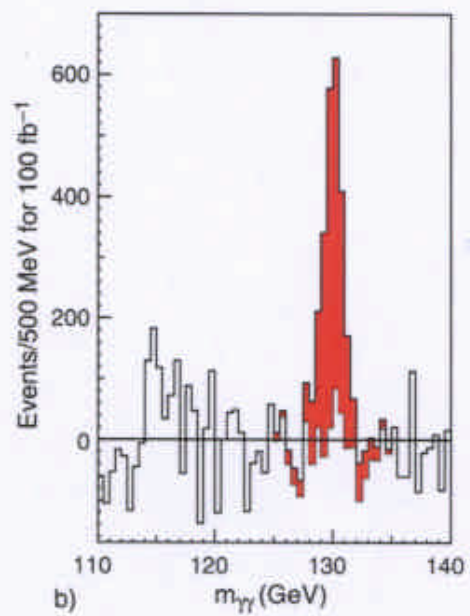
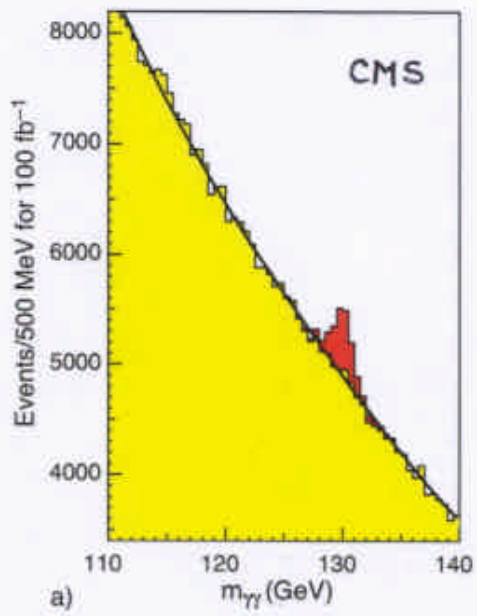
Hill ea



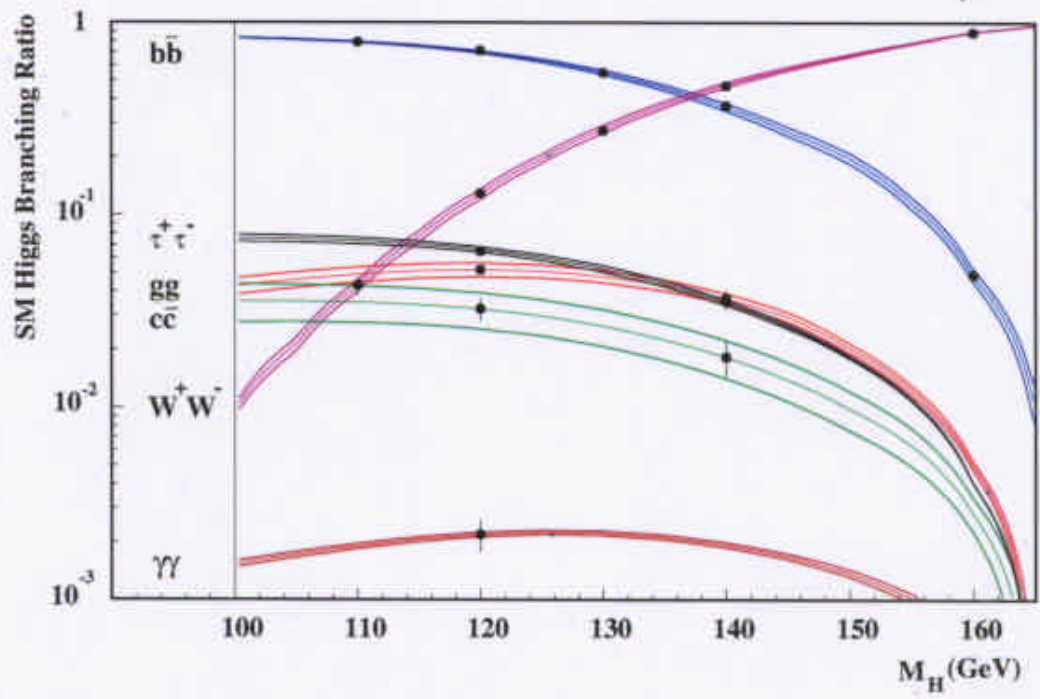
Georgi e



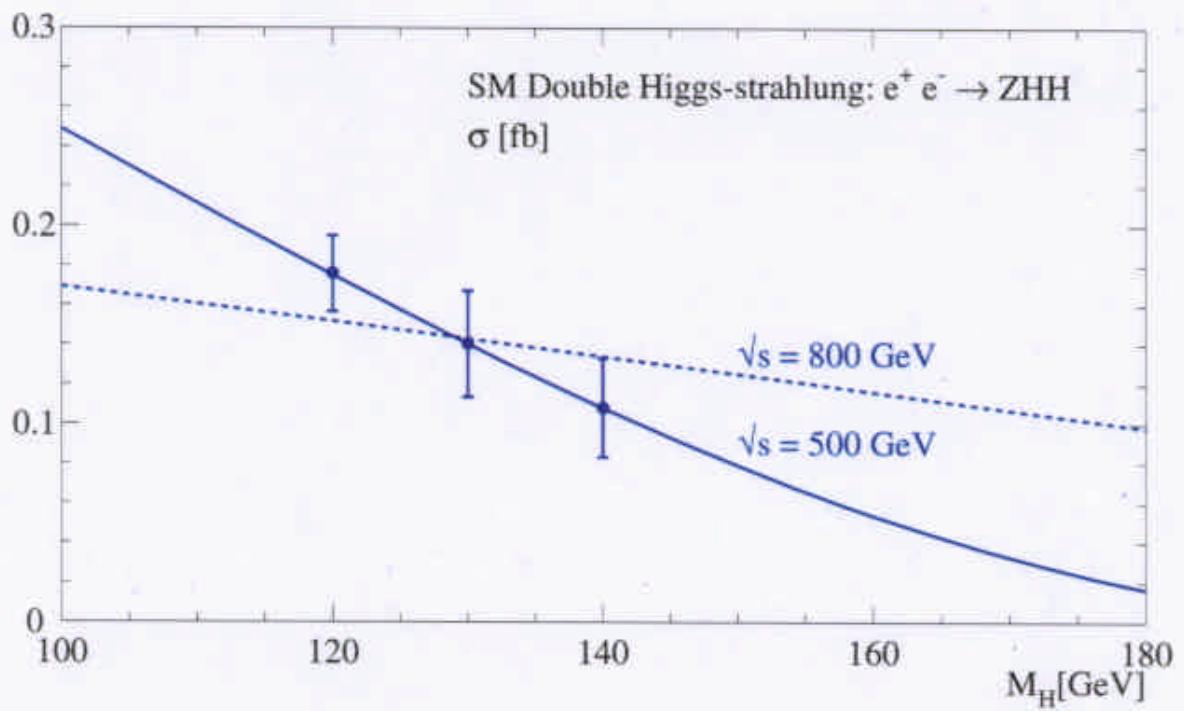
$pp \rightarrow H$
 $\quad \quad \quad \searrow$
 $\quad \quad \quad \gamma\gamma$



Battaglia



Mühlleitner,
Kilian, Z
gay ea



⇒ Theorie elegant im gauge Boson Sektor

⇒ sehr schwierig im Fermion Sektor:

a) technicolor: Skala für $m_t \sim O(\text{TeV})$
unkindliche FCNC $\sim O(\text{TeV})$ } ?

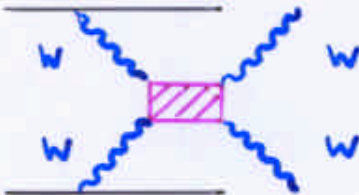
b) top-color: $H \sim [t_L \bar{t}_R]$: $m_t > 200 \text{ GeV}$

ptolemäische ~~Agg~~: $H \sim [t_L \bar{\chi}_R]$

$\chi \sim$ Isosinglet $\approx 10 \text{ TeV}$

AGNOST. EXPERIMENT. PROBE:

(a) starke WW Interaktionen ← TESLA, LHC



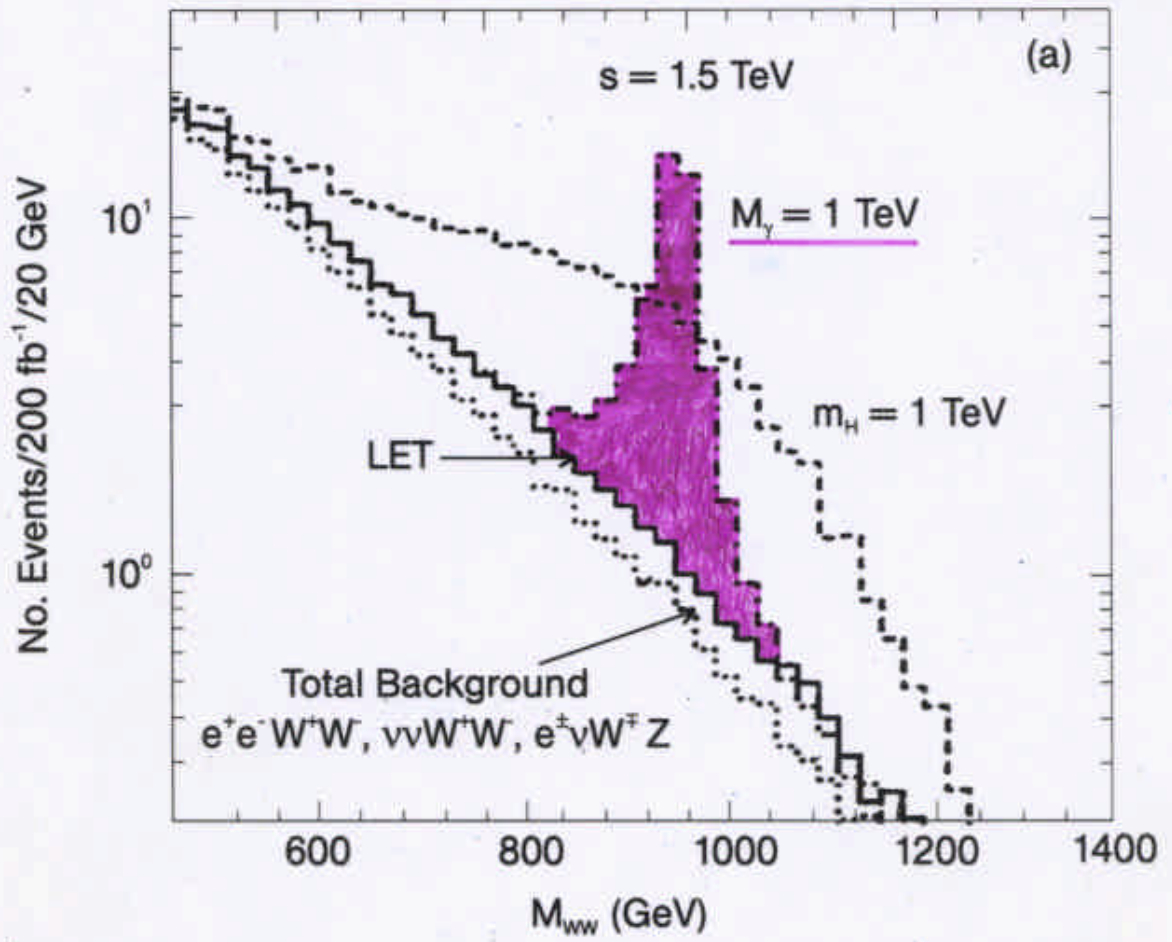
Sensitivität in gesamter
Schwellenregion $\Lambda_* \approx 3 \text{ TeV}$

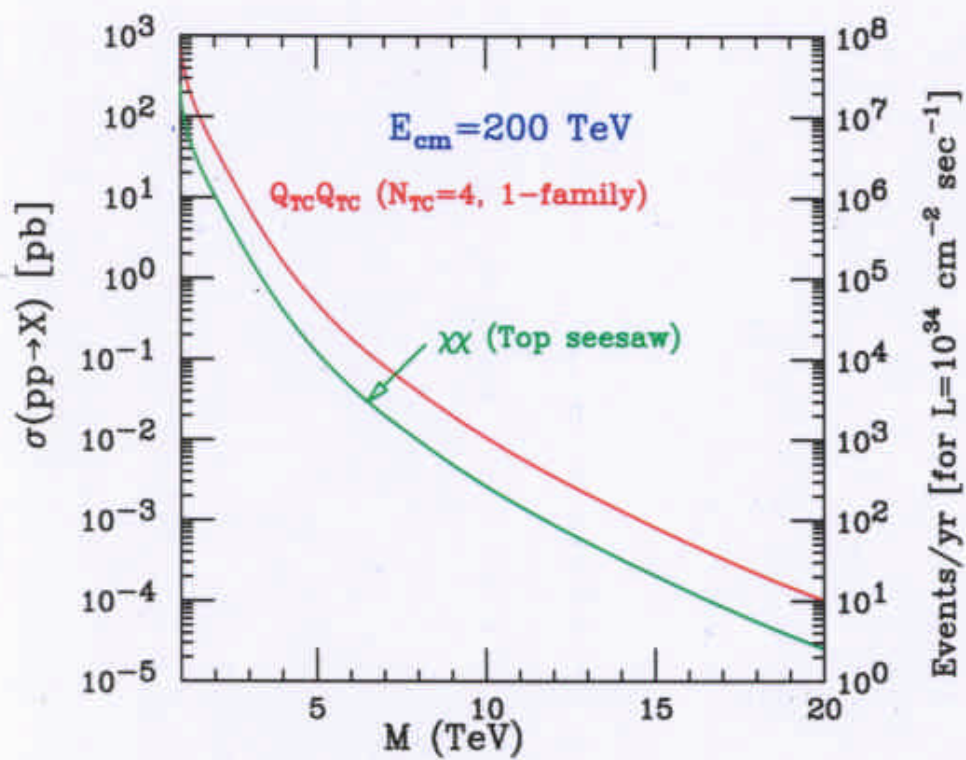
(b) neue WW Reson. $\sim 3 \text{ TeV}$ ← CLIC, VLHC

(c) Higgs Konstituenten $\chi \dots$ ← VLHC

Wenn starke eine Symmetrie-Brechung realisiert, dann
erfordert das mikroskop. Bild der neuent. Interaktionen
Beschleuniger von TeV zu Multi-TeV Region:

$$\Lambda_H \sim 10^4 \Lambda_{\text{QCD}}: \text{QCD} [1 \text{ GeV}] \rightarrow \text{SI} [10 \text{ TeV}]$$





Hill et al
 Han et al

B. SUPERSYMMETRIE

Essenz: Unifikation von Fermionen \leftrightarrow Bosonen

\Rightarrow eliminiere große Quantenfluktuationen \sim Pauli Prinzip

\Rightarrow Rational für Gravitation

TEILCHEN - SPEKTRUM [MSSM]

SM Teilchen			SUSY TEILCHEN		
Leptonen	l	F	Sleptonen	\tilde{l}	B
Quarks	q	F	Squarks	\tilde{q}	B
Photon	γ	B	Photino	$\tilde{\gamma}$	F
W, Z Bosonen		B	Wino, Zino	\tilde{W}, \tilde{Z}	F
Gluon	g	B	Gluino	\tilde{g}	F
Higgs'	H	B	Higgsino	\tilde{H}	F

Massen:

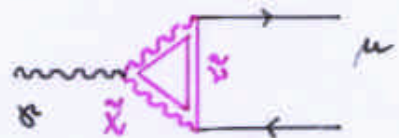
$$\tilde{M} \lesssim 1 \text{ TeV}$$

Konstraints [MSSM]:

(a) $b \rightarrow s \gamma$:
large $tg\beta$

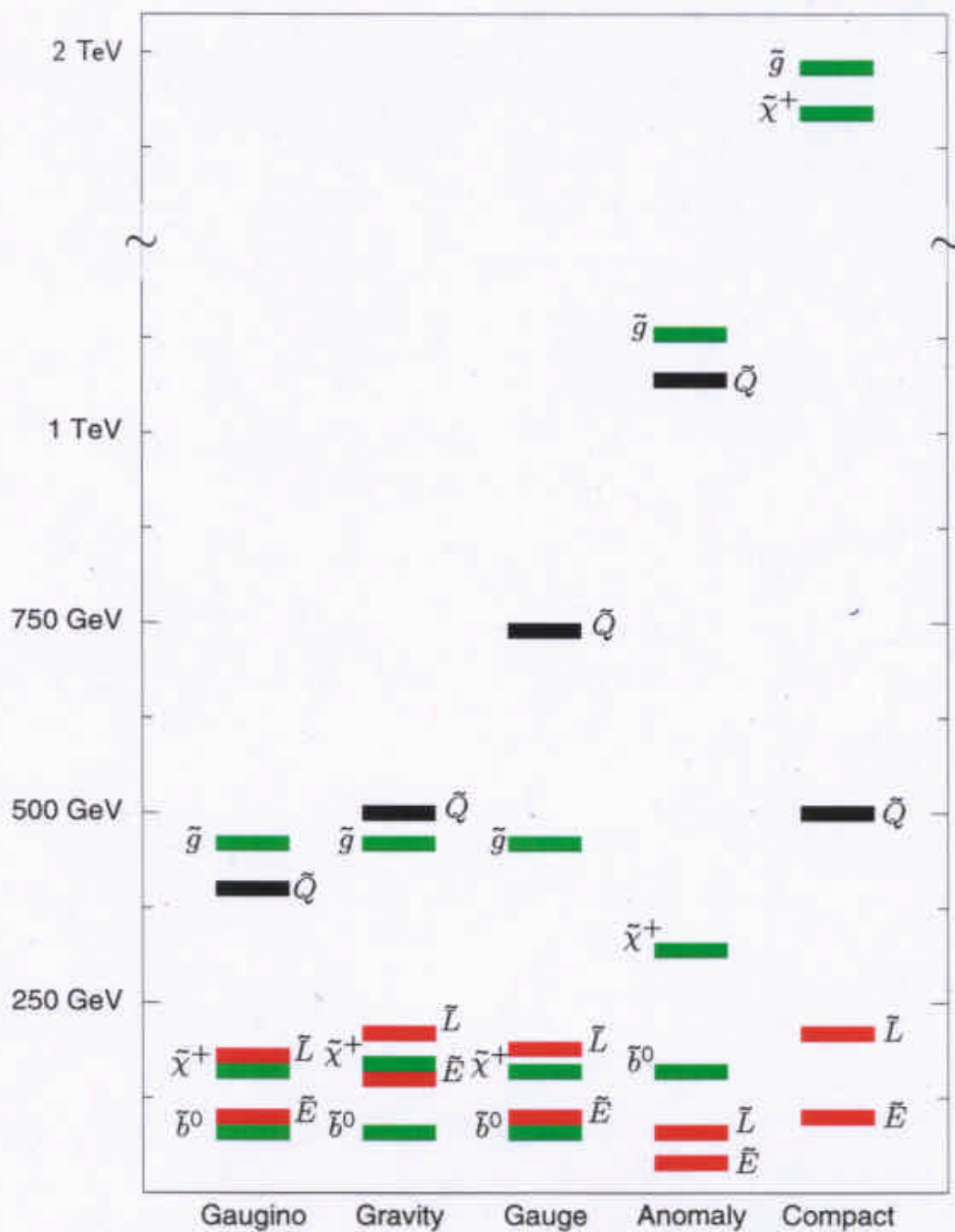


(b) $[g-2]_\mu$:
kein Limit

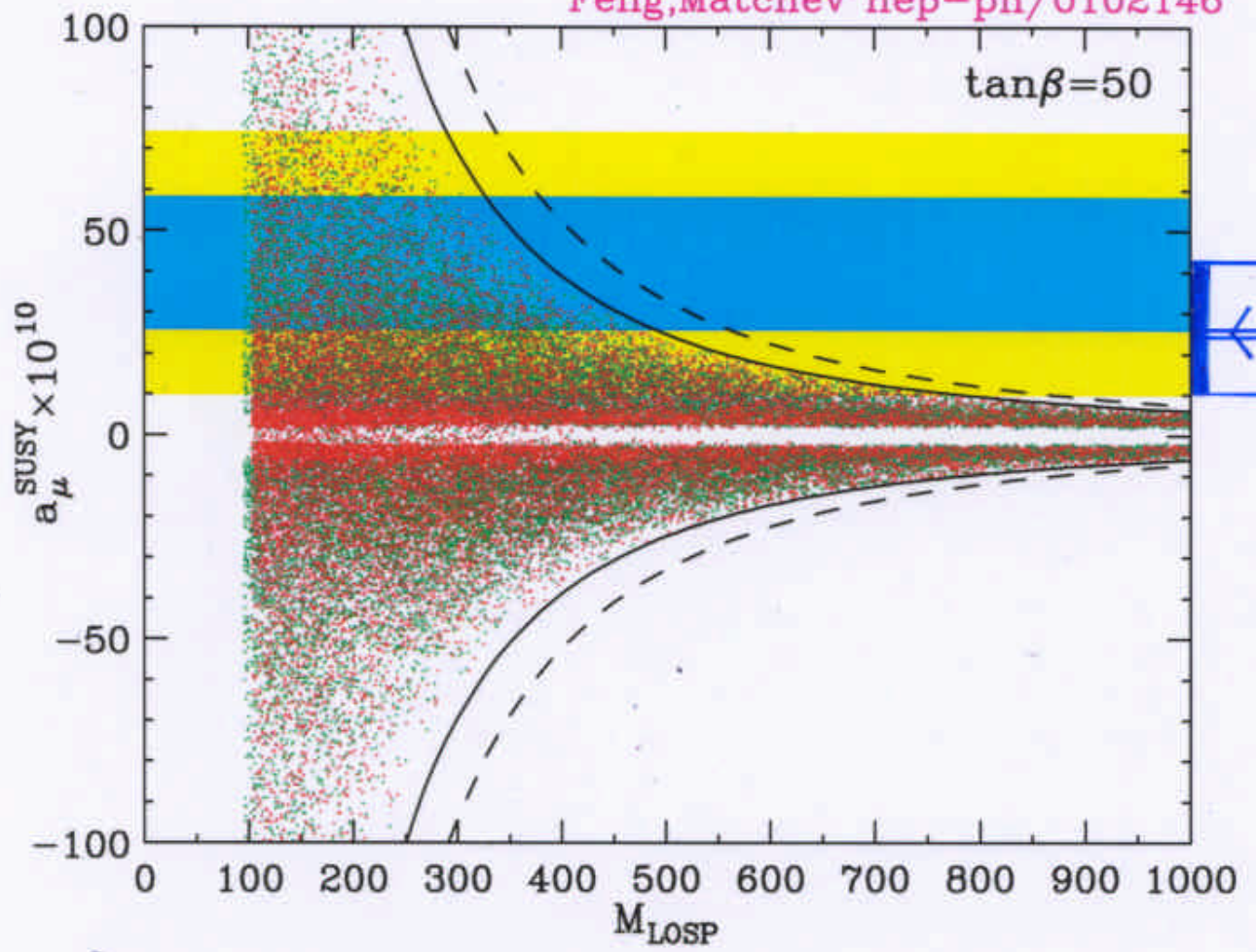


(c) Kalte Dunkle Materie $\sim \chi^0$

Polster
 Prod. e.a.



Feng, Matchev hep-ph/0102146



PRODUKTION / ENTDECKUNG :

- Terakton \rightarrow LHC : $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}$
- LEP \rightarrow TESLA \rightarrow CLIC : $e^+e^- \rightarrow \tilde{W}^+\tilde{W}^-$

$$M[\tilde{q}, \tilde{g}] \lesssim 0.5 \rightarrow 3 \text{ TeV}$$

$$M[\tilde{W}, \tilde{Z}] \lesssim 0.1 \rightarrow 0.5 \rightarrow 2 \text{ TeV}$$

ZUGANG : Snowmass points und Slopes / SPS :

LHC
TESLA ... CLIC } LHC + TESLA " ~ " CLIC [3]

PRÄZISIONS - MESSUNGEN / TESLA [CLIC] :

- Zerfalls-Spektren / Expt. Analyse
- LC Massen-Messung an Schwelle

$$\Delta \tilde{M} \sim 100 \text{ MeV}$$

$$\Delta \tilde{M} / \tilde{M} \sim 1\%$$

Experiment. Analysen v. SUSY Sektor
bei TESLA in per-mille Region } }

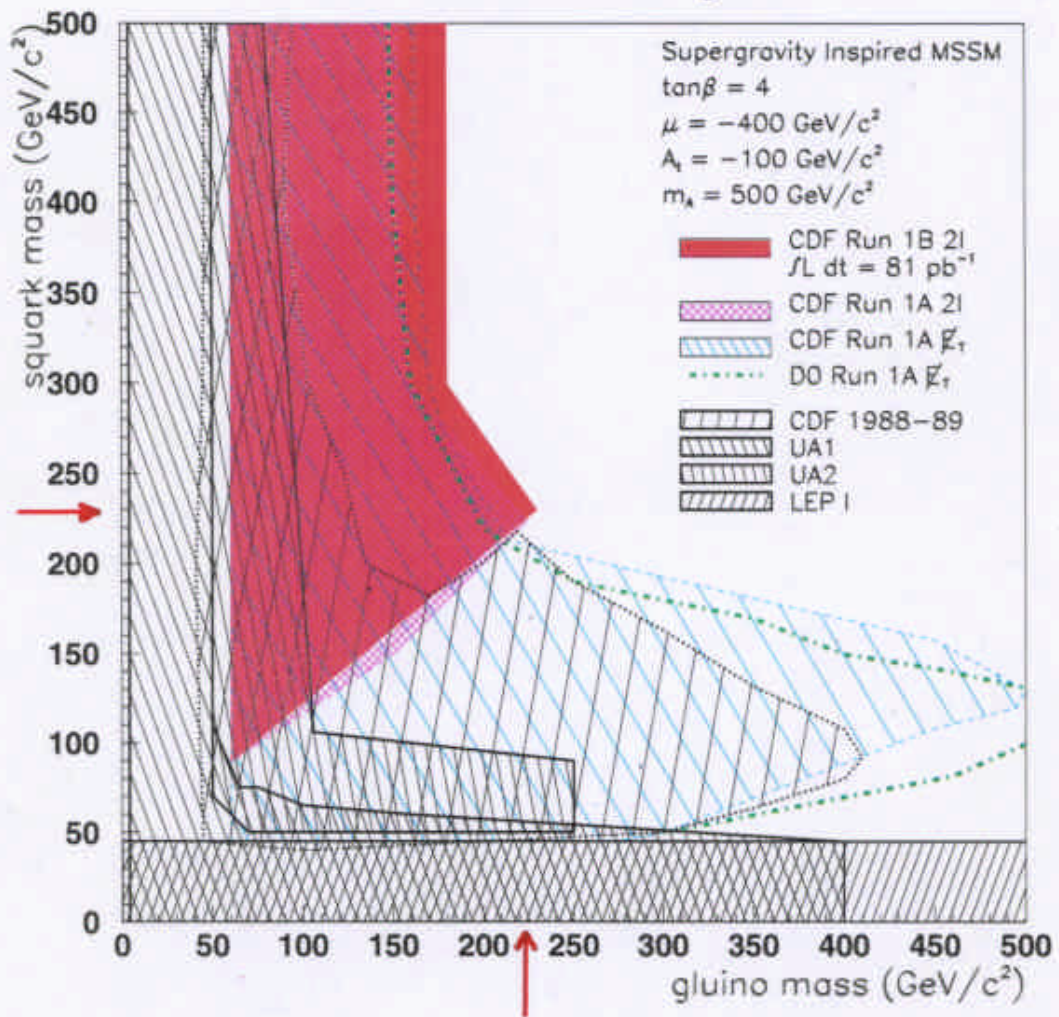
essentieller Schritt zur
Extrapol. GUT \sim PL

E. GROSSE / UNIVERSELLE VEREINIGUNG

Hypothese : Fundamentale Theorie von Materie, die universelle
Vereinigung aller Kräfte einschließt, basiert
auf Physik nahe Planck-Skala: $d_{PL} \sim 10^{-35} \text{ cm}$ }
 $M_{PL} \sim 10^{19} \text{ GeV}$ }

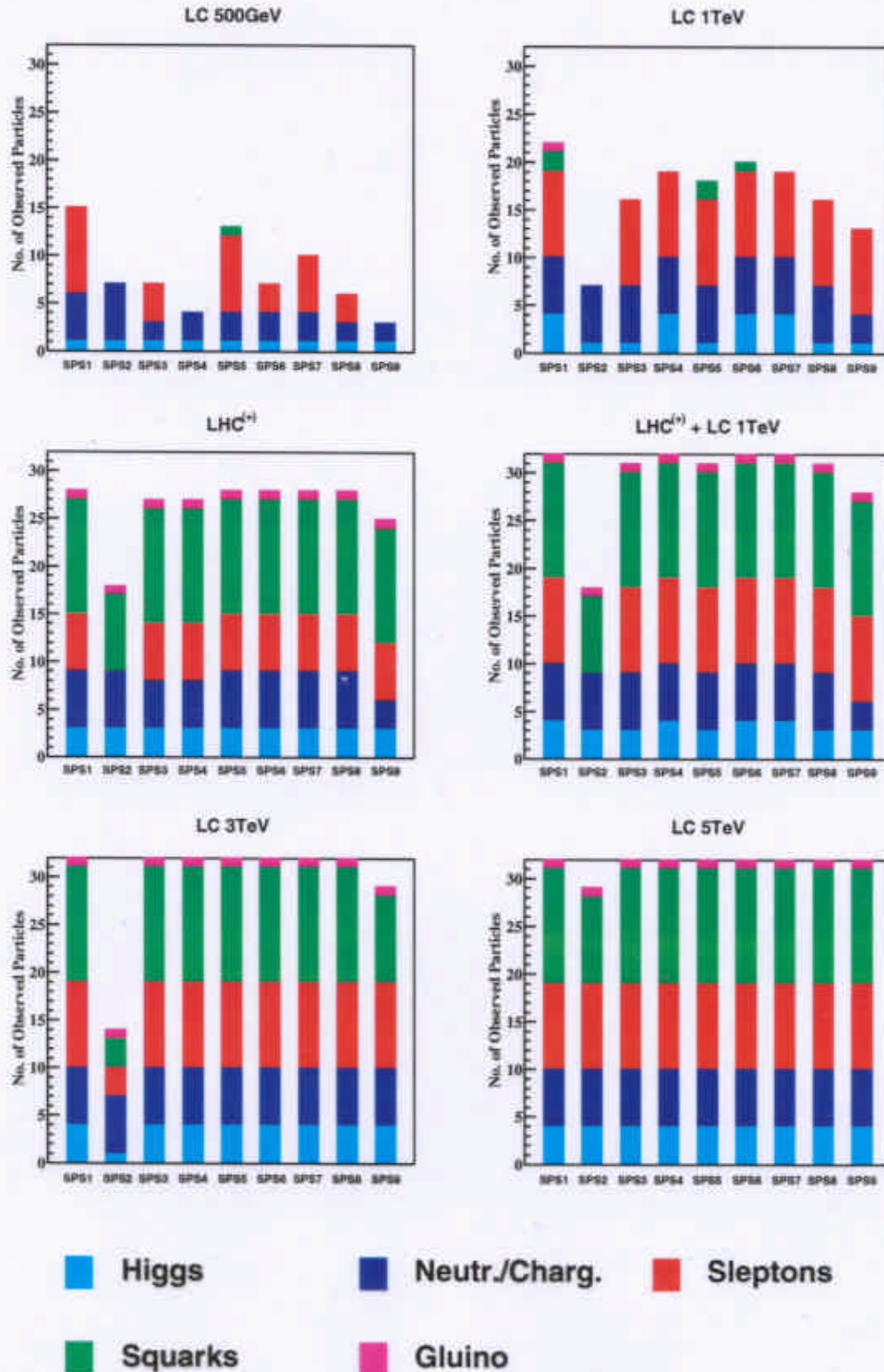
: Vereinigung von Teilchenphysik \sim Gravität

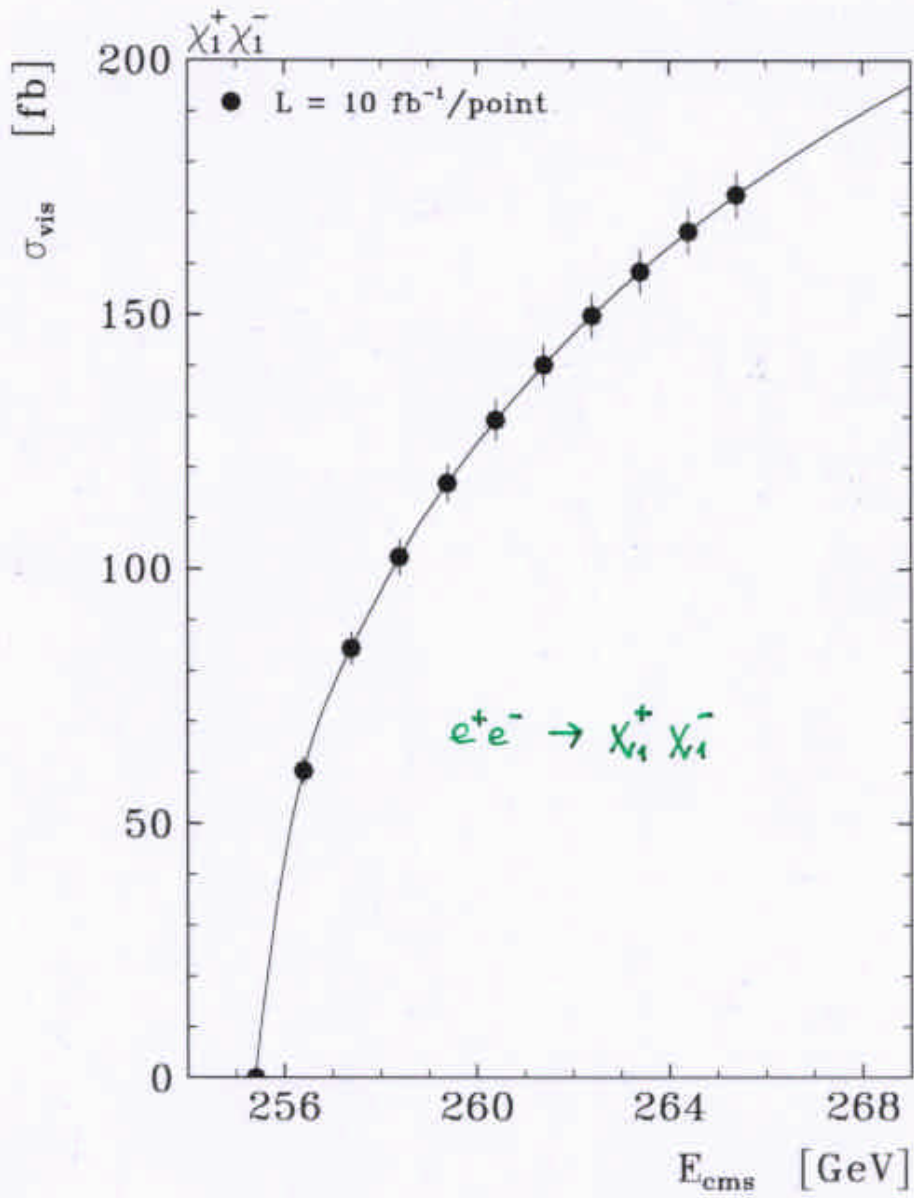
CDF Preliminary



SPS Snowman collaboration:

LC + LHC: SUSY Particles





Marklyn

Exp. Methoden :

Proton - Zerfall	✓ ✓ ✓
Neutrino - Physik	✓
Präzisions - Colliderphysik	✓ ✓
Kosmologie	✓ ✓

a) UNIFICATION VON GAUGE INTERAKTIONEN

Kopplungen : $\alpha_i(Q)$ $i =$ elektromagn. $\left\| \begin{array}{l} \text{schwach} \\ \text{stark} \end{array} \right. \Rightarrow$ isomorph \Rightarrow

SUSY erfolgreich bei Unifikation
unabh. von Massen $\lesssim 1\text{TeV}$ $\left. \begin{array}{l} M_U = 2 \cdot 10^{16} \text{ GeV} \\ \text{per-cent genau} \end{array} \right\}$

$\sin^2 \theta_W = 0.2335(17)$ SUSY $= 0.2316(02)$ EXPT	<u>2% Vorhersage</u>
------------------------------------------------------------	----------------------

b) P ZERFALL : ohne Erfolg : $P \rightarrow \bar{\nu}_\mu K^+$

SUSY - SU(5)	$\approx 3 \cdot 10^{30} \text{ a}$	$\left\ \right.$
EXPT	$\approx 6 \cdot 10^{32} \text{ a}$	$\left\ \right.$

c) [Neutrino-Physik] :

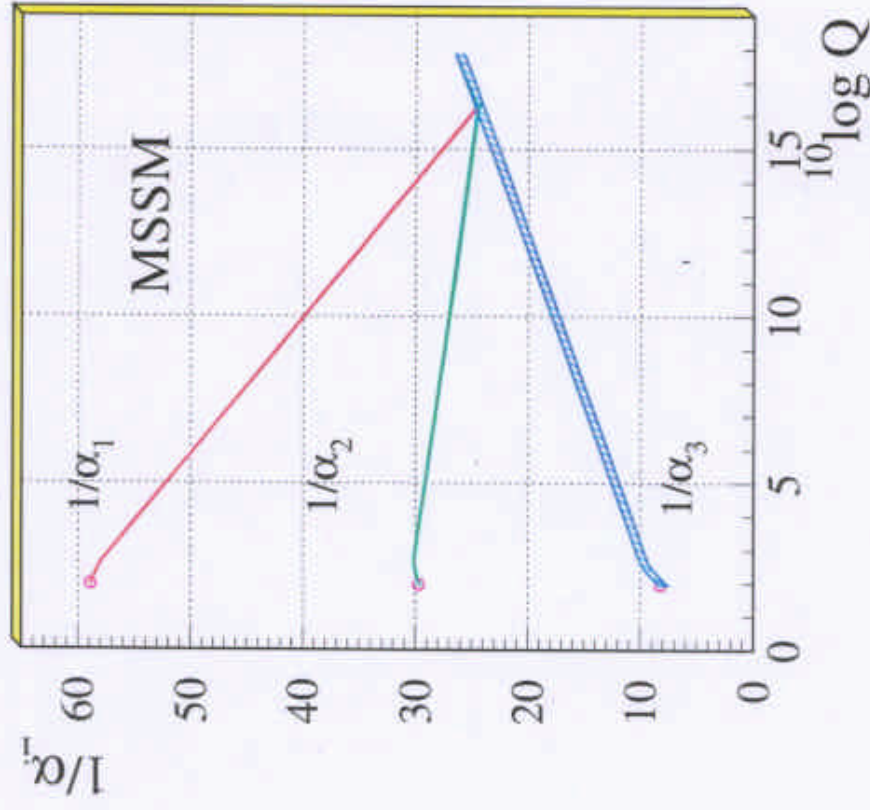
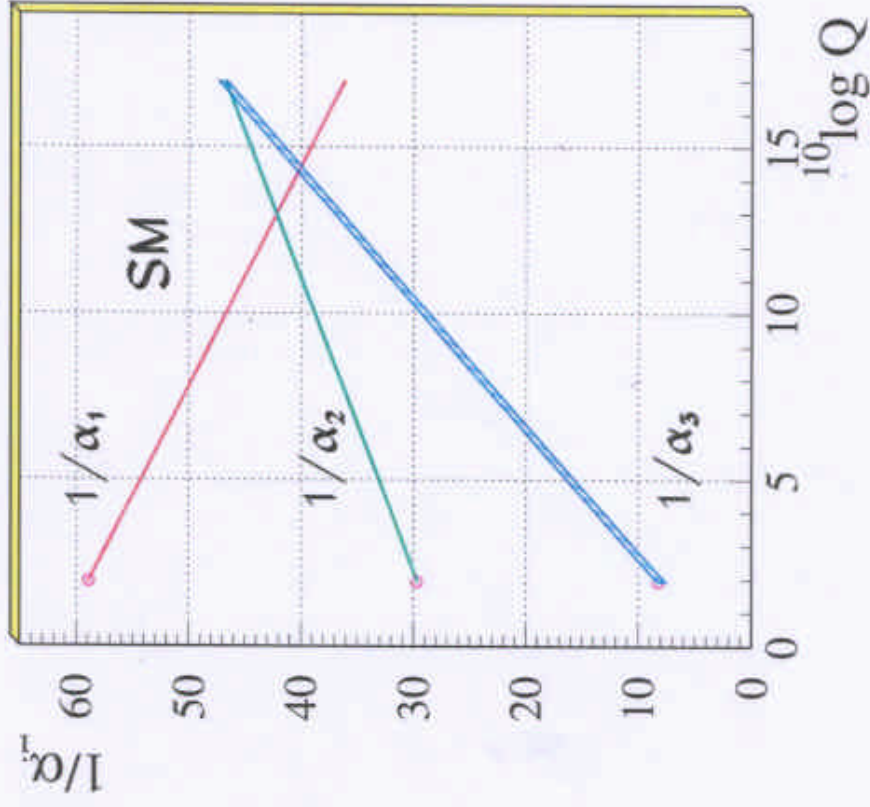
ν_R Masse \sim GUT

$M_N^\nu = \begin{vmatrix} 0 & m_0 \\ m_0 & M_M \end{vmatrix}$ $M_M =$ Majorana \sim GUT
 $m_0 =$ Dirac \sim ELW

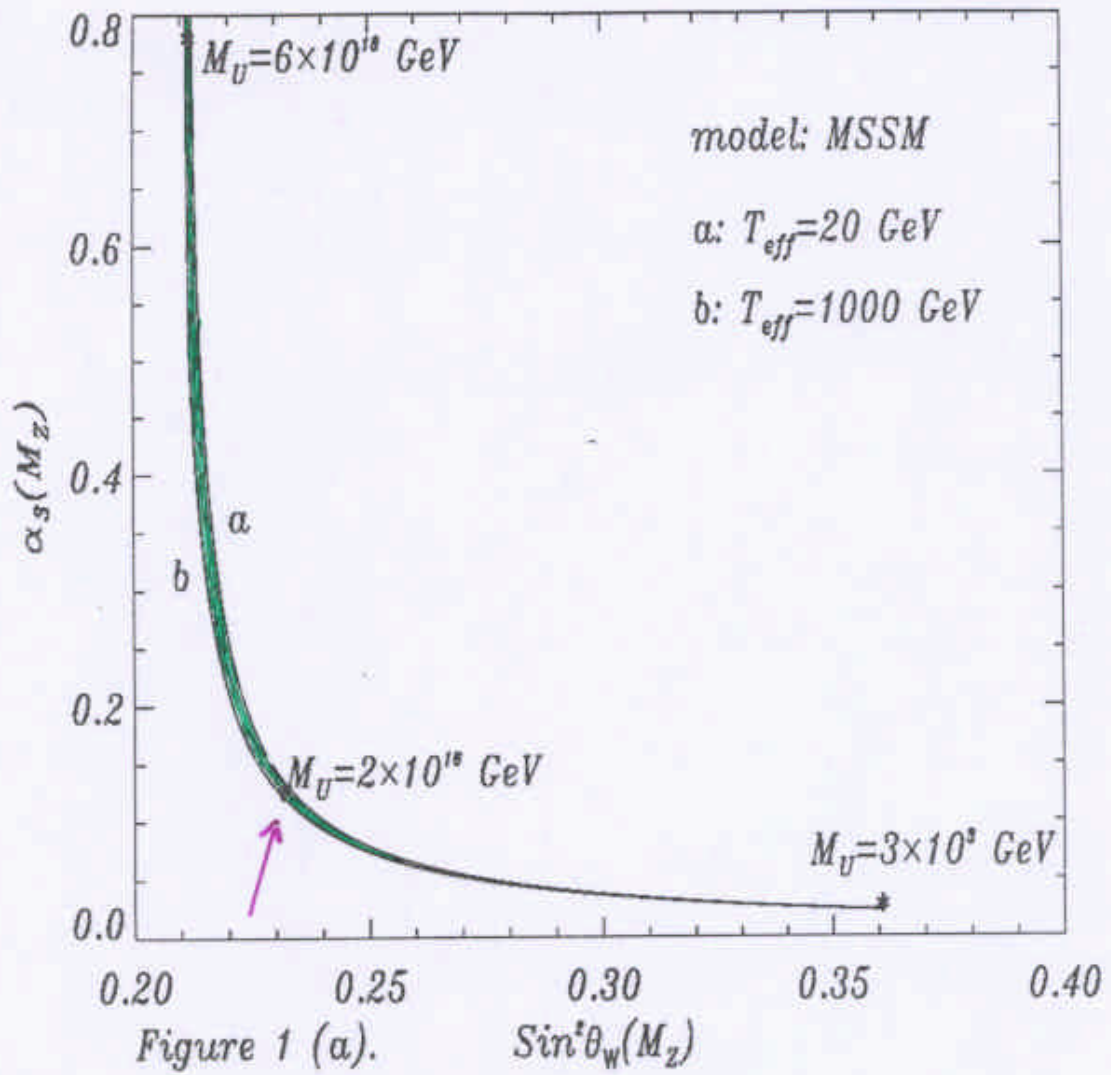
"see-saw" :
 $m_\nu = m_0^2 / M_M$
 $\sim 10^{-2} \text{ eV}$

Unification of the Coupling Constants in the SM and the minimal MSSM

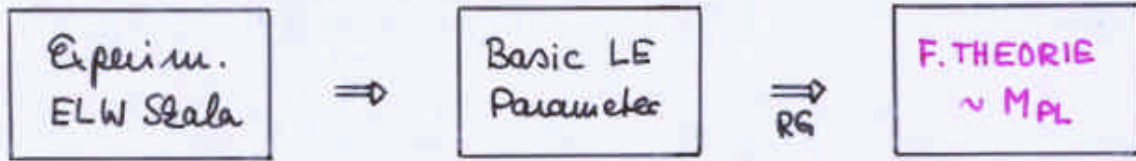
Amaldi, ea



Ross et al.



d) REKONSTRUKTION FUND. SUSY THEORIE NAHE GUT



⇒ mSUGRA : $\left. \begin{array}{l} \text{Gauginos } M_i \sim \alpha_i \\ \text{Skalare } \tilde{M}_k^2 \rightarrow \tilde{M}_0^2 \end{array} \right\} \text{unifizieren}$

⇒ het. S. 8hg : Gauginos unifizieren approximativ
Skalare nicht-universell

→ Parameter: $\sin^2 \theta, \langle t \rangle, \dots \sim M_{Pl}$

Mit Hochpräzision bei LC Analysen, können fundamentale Parameter nahe Planck-Skala rekonstruiert werden.

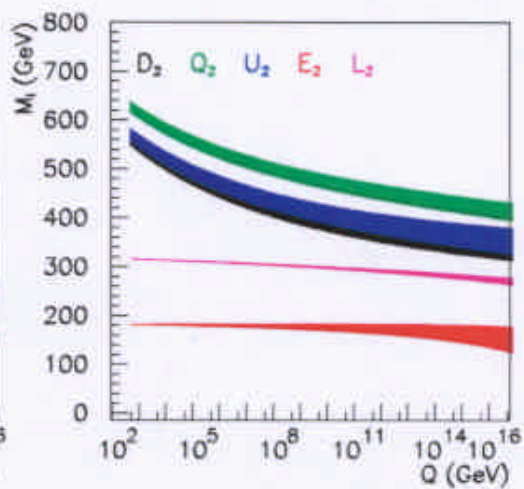
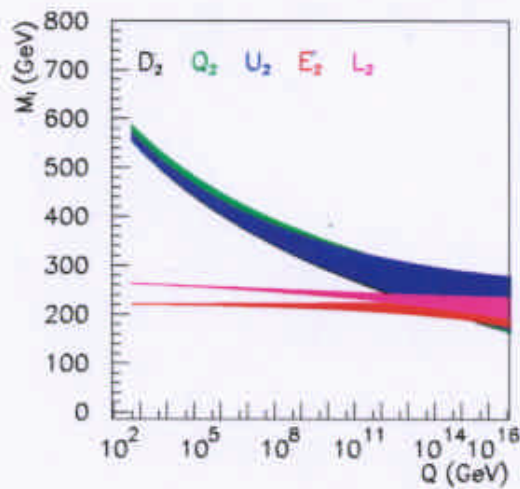
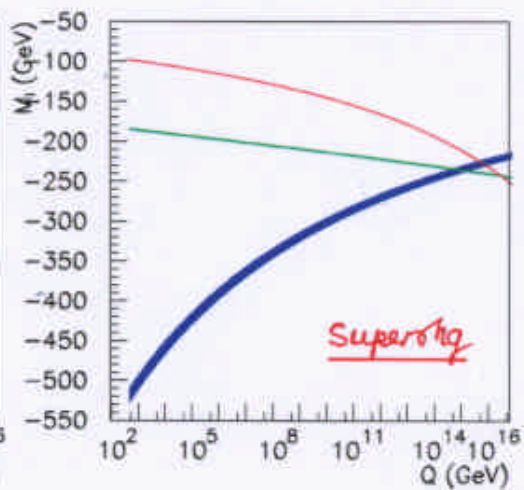
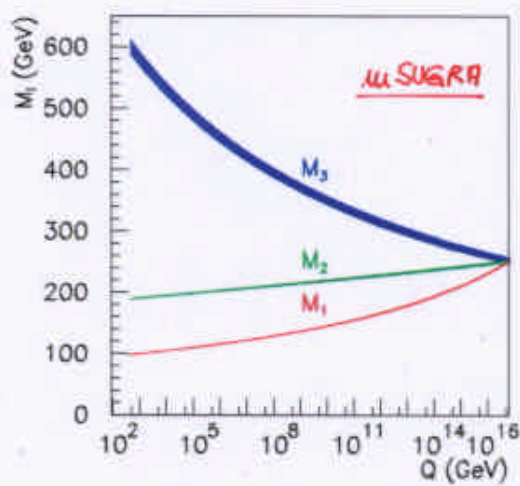
D. STRUKTUR DER RAUM-ZEIT

Motiv: Gravitations-Skala \sim ELW Skala

vereinbar, wenn schwache Grav. in $d_{im} = 4$
Projektion von starker Grav. in $d_{im} > 4$
[zusätzl. Dimensionen: kompaktifiziert]

(a) ADD : flache Metrik
(b) RS : expon. Dämpfung

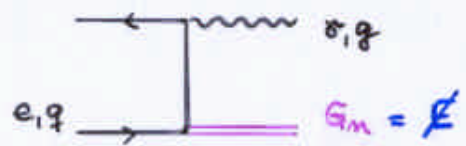
Blair, Pened, Z.



EXPERIMENTELLE SIGNALE

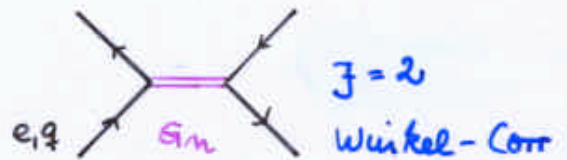
(a) ADD: Emission von KK [G] :

$$\sigma_{\text{gg}} = F(M_{\text{PL}}^*, \beta)$$



Spin-2 Kontakt-WW :

$$\max [M_{\text{PL}}^*]; \beta$$



(b) RS : KK [G] Resonanzen :

$$M_{\text{KK}} \sim \theta (\text{TeV})$$



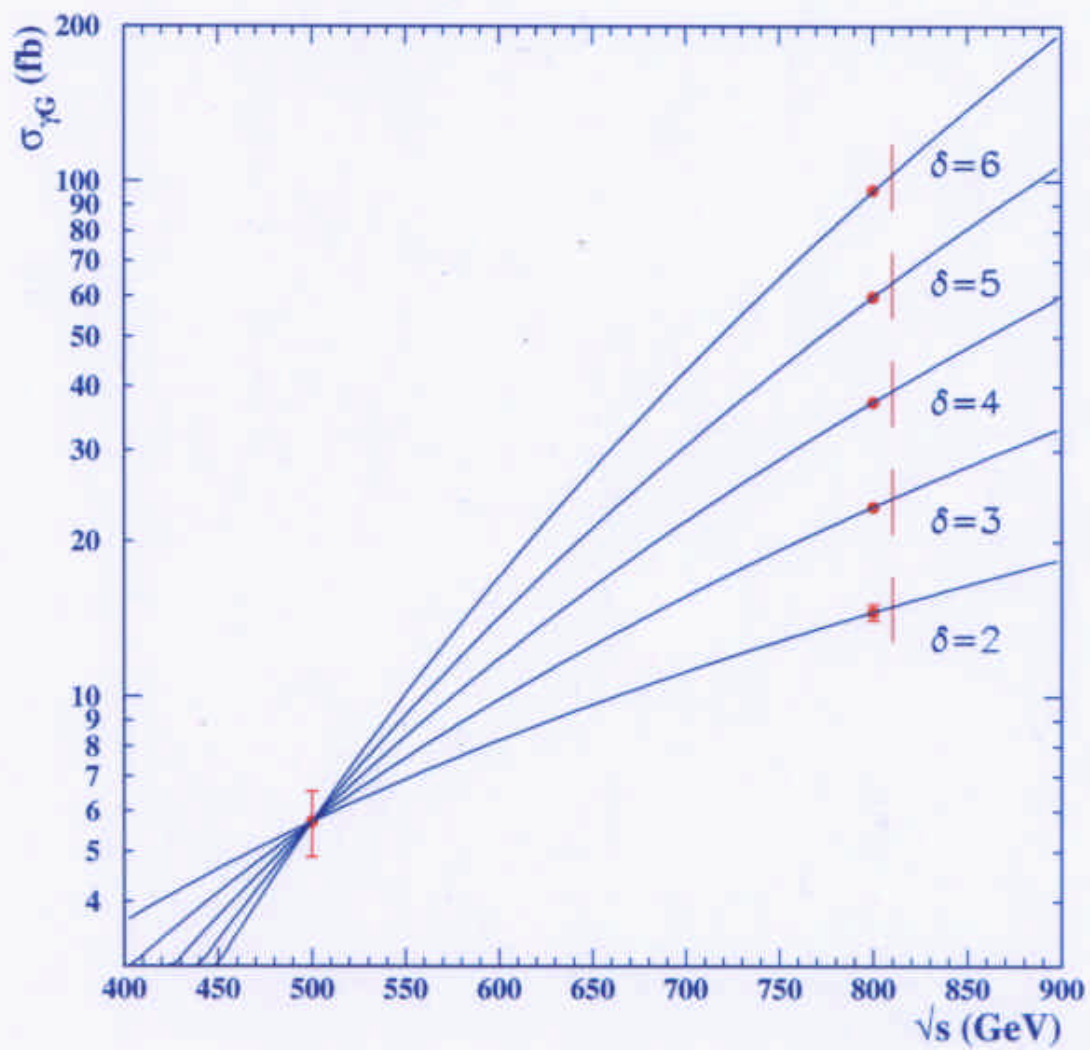
(c) generisch : Abweichung von Newton's Gesetz f. kleine R
Emission von Schwarzen Löchern bei hoh. Energie
SN cooling ...

SENSITIVITÄT :

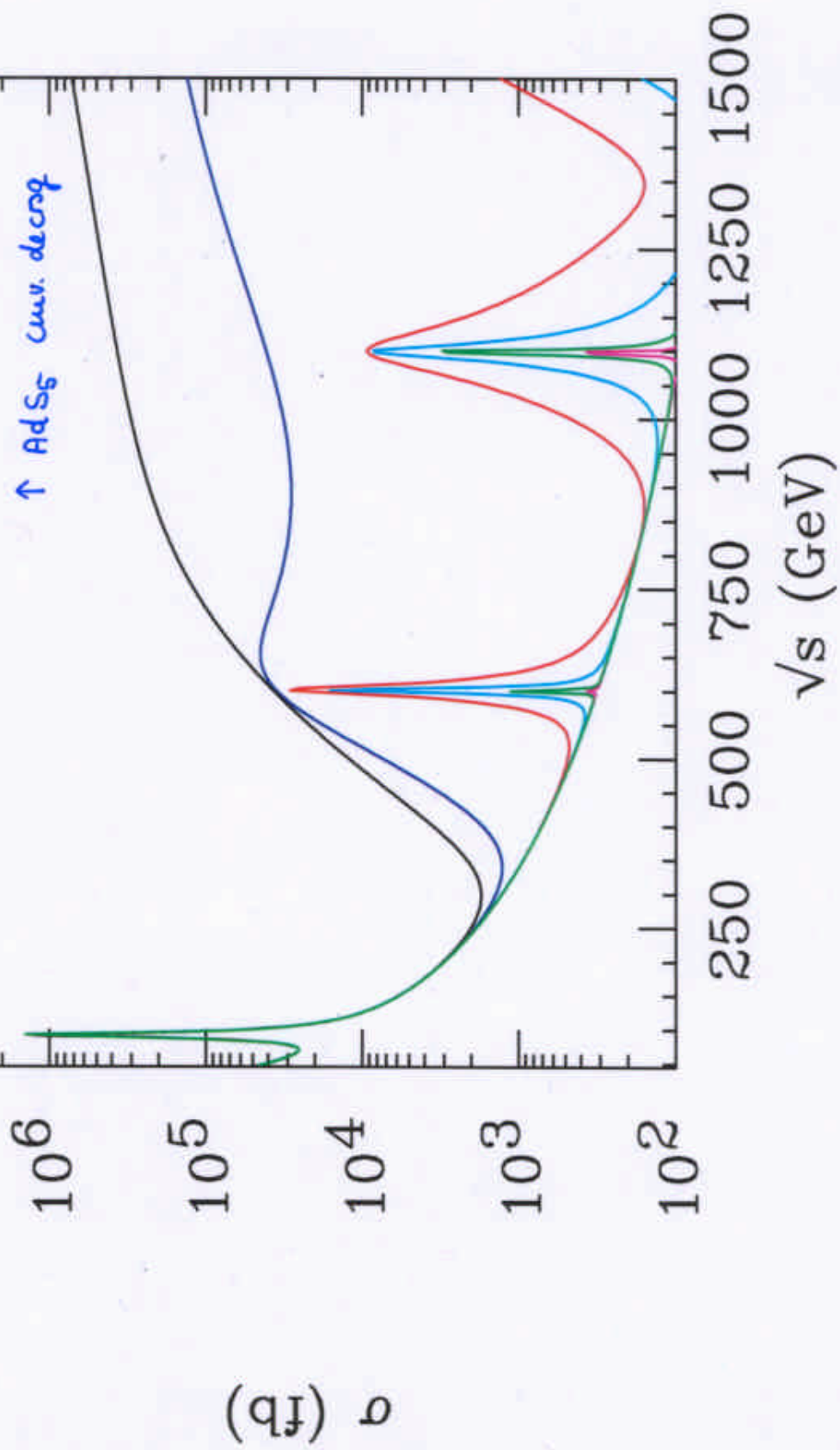
keine Abweichung
bisher etabliert

ADD	M_6	M_8	M_{10} [TeV]
LEP2	1.5	1	0.6
LHC	8	7	6
TESLA	3/8	1.3/8	1/8
ASTRO	20eV	9	0.6

ZENTRAL-PROBLEM : schlüssiges Konzept für
große Vereinigung $\sim \sin^2 \theta_w$ } ?



Hewlett ea

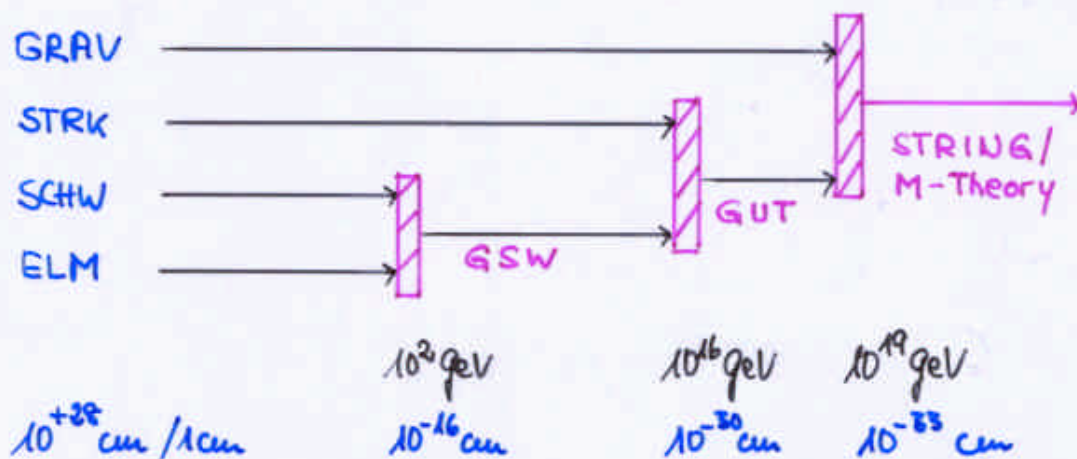


5. SUMMA & PERSPECTIVA

zur Zeit und in Zukunft operierende Hochenergie-Beschleuniger sollten unsere Erkenntnis der Natur wesentlich erweitern und vertiefen.

- a) Higgs Mechanismus: Ursprung von Masse
[alternative] elektroschwache Sym. Brechung
- (b) Supersym. Materie: kann entdeckt werden und mit hoher Genauigkeit untersucht w.:

: Universelle Vereinigung: Fundam. Theorie \sim M_{PL}



- (c) Struktur v. Raum-Zeit \sim Gravitation: $\lesssim 10^{-17}$ bis 10^{-18} cm

Experimente im TeV Bereich haben Schlüsselcharakter für das Ziel, die Gravität der Teilchenphysik zu inkorporieren und konstruieren die

THEORIE DER MATERIE

HIGH ENERGY PHYSICS IS
ENTERING AN EXTRAORDINARY
PERIOD OF DISCOVERY :
SOLVING THE MYSTERIES OF
PARTICLE PHYSICS WILL BE
AN EPOCHAL CHAPTER IN THE
HISTORY OF SCIENCE.

Fred GILMAN

HEPAP CHAIR / DOE & NSF