

TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Diesseits und jenseits des Standardmodells
(teilweise in Anlehnung an Skript R. Klanner/T. Schöner)



Caren Hagner
Achim Geiser

Universität Hamburg, IExpPh
Sommersemester 2007

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen

2. Feynman-Regeln und –Diagramme

3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip

4. QED

5. Starke Wechselwirkung und QCD

6. Schwache Wechselwirkung, elektro-schwache Vereinigung und der

Higgs-Mechanismus

7. Der Higgs-Mechanismus

8. Mischung von Quarks und Leptonen

9. Teilchenphysik und Kosmologie

10. Diesseits und Jenseits des Standardmodells

10.1 Erfolge und Misserfolge des SM

10.2 GUT

10.3 SUSY

10.4 (Super)Strings und Extra Dimensionen

11. Wie geht es weiter? Träume der Teilchenphysiker

10.1 ERFOLGE UND MISSERFOLGE DES SM

Erfolge und Misserfolge des SM

(erfüllt SM Anforderungen an eine fundamentalen Theorie?)

1. (wenige) Grundannahmen? Kausalität, Quantentheorie, spezielle Relativitätstheorie

ja

2. Konsistenz (ohne innere Widersprüche)?

ja

- keine Divergenzen (Renormierbarkeit)
- Extrapolation zu hohen Energien
(Hierarchieproblem, Gravitation)

nein

3. Übereinstimmung mit Experimenten

ja

- Entwicklung des Universums (dunkle Materie, dunkle Energie, Baryonen-Asymmetrie)

?nein?

4. Vorhersagekraft

- W, Z , charm, top, ν_τ

- Selbst-WW der Eichbosonen g, W, Z , etc.

ja
ja
??

- Massenerzeugung durch Higgsmechanismus

5. Einfachheit (Occams razor)

- 29 willkürliche, fein abgestimmte Parameter **nein**

(3 Kopplungskonstanten $\alpha, \alpha_W, \alpha_S$,

2 Parameter Higgs-Potential, $v, \lambda, (M^{\text{Higgs}})$,

6 Quarkmassen + 6 Leptonmassen

4 Quark- + 4 Lepton-Mischungswinkel

1 QCD-Phase

3 Gravitationskonstante, h, c)

- Warum 3 Familien?
- Warum Massenwerte Quarks, Leptonen?
- Warum 1/3 Ladung der Quarks?
- Lassen sich die 3 WW des SM vereinheitlichen?
- Warum so versch. Energieskalen ($0.2-10^{19}$ GeV)?
- Wie passt die Gravitation in das Bild?

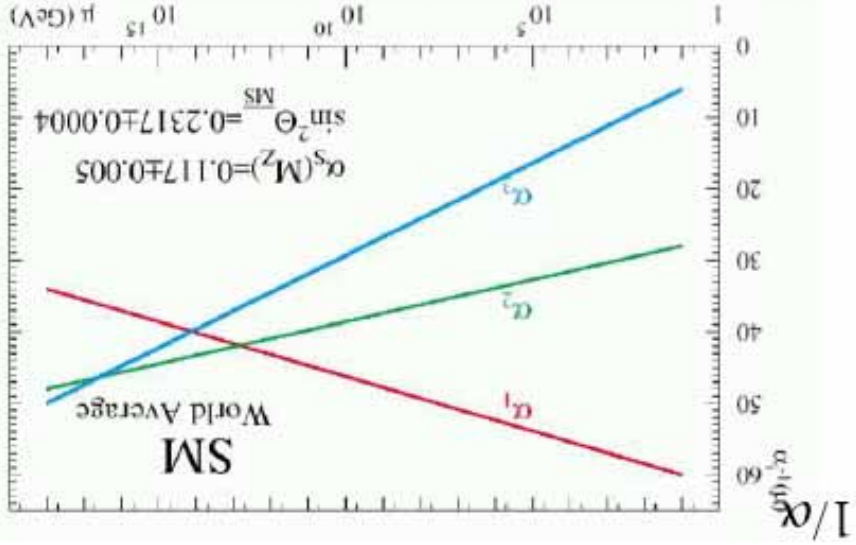
Wir wissen die Antworten nicht, aber wir haben Ideen + Experimente um Fragen zu beantworten

z.B.

GUT (Grand Unified Theories)

Vereinheitlichung der 3 WW SU(3) ⊗ SU(2) ⊗ U(1)

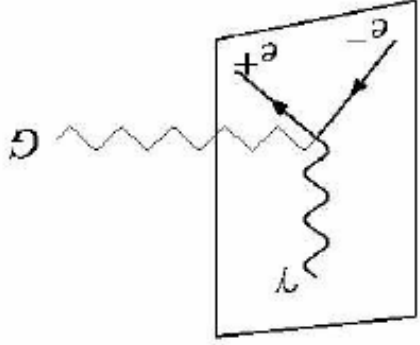
in einer neuen "großen" Gruppe:



IDEEN JENSEITS DES STANDARDMODELLS

Composite Models

- Fundamentale Teilchen habe Sub-Struktur (bisher keine Evidenz $\rightarrow > 10^{-19} \text{ m}$)

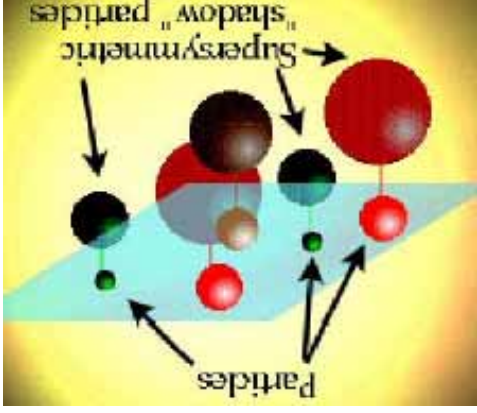


Extra Dimensionen

- (String Theorie)
- SM in 3+1 Dimensionen
- Gravitation in N extra Dimensionen

Supersymmetrie (SUSY)

Symmetrie zwischen Fermionen („Materie-Teilchen“) und Bosonen („Kraftteilchen“) \rightarrow zu jedem Fermion \leftrightarrow Boson



Hierarchie-Problem des SM:

Energieskalen im und jenseits des SM:

$$-\Lambda^{\text{QCD}} \approx 0.2 \text{ GeV} \quad \alpha_s(\bar{Q}_2) = 12\pi / [(33 - 2N_f) \ln(\bar{Q}_2 / \Lambda^2)]$$

$$-v = 246 \text{ GeV} \quad (M_{Z,W} \approx 100 \text{ GeV}) - e+w\text{-Vereinigung}$$

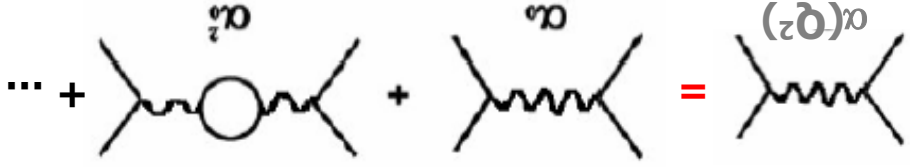
$$-M^{\text{GUT}} \approx 10^{16} \text{ GeV} \quad \text{ew+starke-Vereinigung}$$

$$-M^{\text{Planck}} \approx 10^{19} \text{ GeV} \quad M^{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar c / G_N} = 22 \mu\text{g}$$

(bei $E = M^{\text{Planck}}$ Comptonwellenlänge $\lambda = \hbar c / M c^2 = R^{\text{Schw}} = G_N M / c^2$ Schwarzschildradius \rightarrow Teilchen \rightarrow schwarzes Loch Ende „Raum-Zeit-Kontinuum“)

Quantenkorrekturen und Renormierung:

gemessene Parameter	=	„nackte“ Parameter	+	Quantenkorrekturen (Berechnung in höherer Ordnung)
$g, \sin\theta_w, \alpha_s$		in Lagrange		



eg. Kopplungskonstanten:

$$g_2(Q_2) = g_0^2 + C \cdot g^4 \cdot \ln(M^x / Q_2^2)$$

\rightarrow logarithmisch divergent!!!

$M^x \dots$ maximale Energie im Loop-Integral

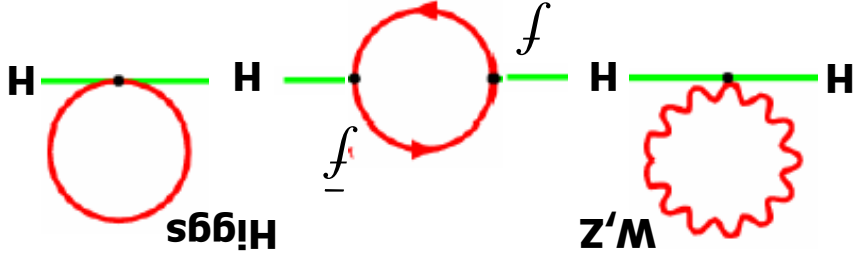
(ie maximale Energie bis zu der Theorie gültig ist)

10.2 GRAND UNIFIED THEORY (SU(5)-GUT)

Hierarchie-Problem des SM (Beispiel $M_{Higgs}^{(W)}$):

- Higgs Potential: $V_{|\phi|^2} = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$
- Higgsmasse: $M_{Higgs}^{(W)} = 2 \cdot \lambda \cdot v^2$
- Quantenkorrekturen:

$$M_{Higgs}^{(W)}(M_X) = M_{Higgs}^{(W)}(M_W) + C \cdot g^2 \cdot M_X^2$$



damit $M_{Higgs}^{(W)} > \text{TeV}$ (Unitarität in W-W-

Streuung) **muss M_{Higgs}^2** mit großer Genauigkeit **$C \cdot g^2 \cdot M_X^2$** kompensieren (bekannt unter „fine

tuning problem“),

entweder $C=0$:

gilt nicht im SM, aber in SUSY durch Einführen neuer Teilchen, die um $1/2$ Einheit Spin

verschieden sind

oder

„neue“ Physik Energieskala bei $M_X \approx 1 \text{ TeV}$ (bei LHC sichtbar – bisher in Präzisionsmessungen bei LEP, HERA, Tevatron keine Spur!)

Grand Unified Theories (GUT)

- SM: $U(1) \times SU(2) \times SU(3)_c$

- 1974: Georgi-Glashow: $SU(5)$ einfachste Gruppe,

die $U(1) \times SU(2) \times SU(3)_c$ enthält \rightarrow

- Leptonen und Quarks in $SU(5)$ -Multiplikts: $[q_c \equiv \bar{q}]$

Quarks and Leptons in 5- and 10-plets:

$$\begin{pmatrix} d_c \\ d_c \\ d_c \\ d_c \\ d_c \\ e^- \\ -\nu_e \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} +d_g \\ +u_g \\ +u_g \\ +u_g \\ +d_g \\ +d_g \\ +d_g \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +u_c \\ -u_c \\ 0 \\ +u_c \\ +d_c \\ +d_c \\ +d_c \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -u_c \\ +u_c \\ 0 \\ -u_c \\ -u_c \\ 0 \\ +e^+ \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -d_g \\ -u_g \\ -u_c \\ -d_c \\ -d_c \\ -e^+ \\ 0 \end{pmatrix}$$

da elektrische Ladung ein Generator von $SU(5)$:

- aus Vertauschungsrelationen \rightarrow Quantisierung Q

- mit $\sum Q_i = 0$ innerhalb Spalten $\rightarrow Q_d = 1/3 Q_e$

Eichbosonen: $8g, W^\pm, Z^0, \gamma + 12$ Eichbosonen X, Y

6 X : $Q=-4/3$, Farben r, g, b + Anti-Teilchen,

6 Y : $Q=-1/3$, Farben r, g, b + Anti-Teilchen

Gauge bosons in 5x5 matrices:

$$\begin{pmatrix} G_{11} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} \\ G_{21} & G_{22} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_{23} & G_{24} & G_{25} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & G_{34} & G_{35} \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 & Y_5 \end{pmatrix}$$

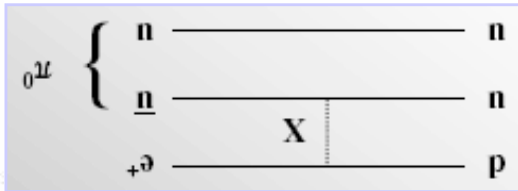
GRAND UNIFIED THEORY (SU(5) - GUT)

Vorhersagen SU(5)-GUT

- X-Boson vermittelt
Zerfall $p \rightarrow \pi^0 e^+$
mit Lebensdauer:

$$\tau = \frac{M_X^4}{\alpha^2 (M_X^{GUT}) \cdot M_p^5} \approx 10^{30 \pm 1} \text{ s}$$

$$1/\tau \sim 1/(\Omega_2 + M_X^2) \text{ für } M_X = 10^{15} \text{ GeV}$$



(Wert von M_X : ~ gleiche Kopplungen)

- um dies zu überprüfen wurde in Japan der Super-Kamiokande Detektor (50 kt H_2O - Entdeckung ν -Oszillationen, SN 1987A - Nobelpreis) gebaut

→ Ergebnis: $\tau > 5 \cdot 10^{32} \text{ a} \rightarrow$ ~~SU(5)-GUT~~ (minimal)

- Kopplungen bei $\mu = M^{GUT}$ gleich? → **nein** nur ungefähr

$$\alpha_i(\bar{Q}_2) = \alpha_i(n_2) / (1 - \beta_0^i \cdot \alpha_i(n_2) \ln(\bar{Q}_2 / \mu_2))$$

$$-\beta_0^i = \frac{11N_c - 4N_f}{12\pi} \quad N_c = 0,2,3 \text{ für } U(1), SU(2), SU(3) \quad N_f = 3 \text{ (Anzahl Familien)}$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{8} \alpha = \frac{3}{8} (e^2 / 4\pi), \alpha_2 = g^2 / 4\pi, (g = e / \sin \theta_w), \alpha_3 = \alpha_s$$

$$-\sin^2 \theta_w(M_X) = 3/8 \rightarrow \sin^2 \theta_w(M_W) = 0,214 \pm 0,004$$

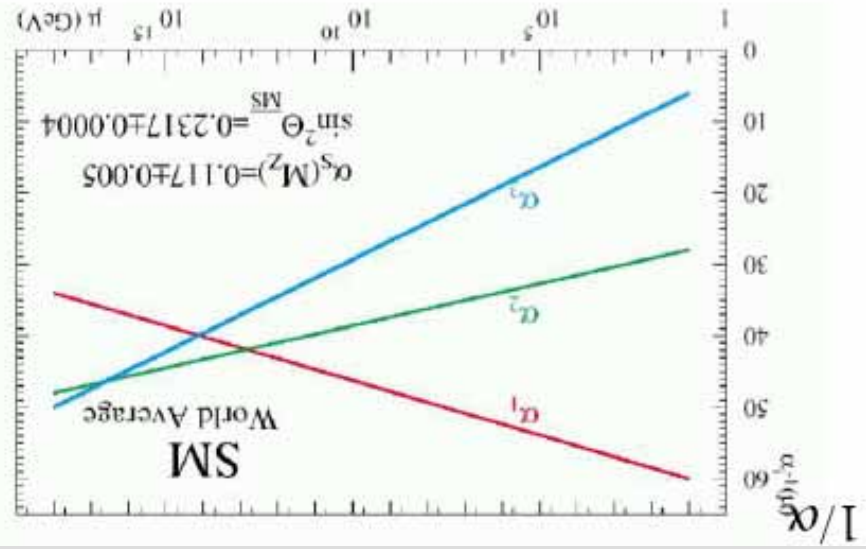
- **Fermionmassen**: stimmt recht gut, aber nur für Exp. $0,23120 \pm 0,00015$ → **nein** nur ungefähr

$$M^b / M^r \approx 3$$

die 3te Generation!

- SU(5)-GUT macht präzise Vorhersagen
- widersprechen den Präzisionsmessungen
- dennoch: qualitativ werden zahlreiche Beobachtungen beschrieben und offene Fragen des SMS erklärt

- Neutrinomassen: $M^{\nu} \sim M^{\mu} / M^X = 10^{-7} \text{ eV} \rightarrow$ verträglich mit Daten
- Magnetische Monopole mit Massen von $O(10^{17} \text{ GeV})$
- löst **nicht** Generationenproblem (Verfahren muss für jede Generation wiederholt werden)



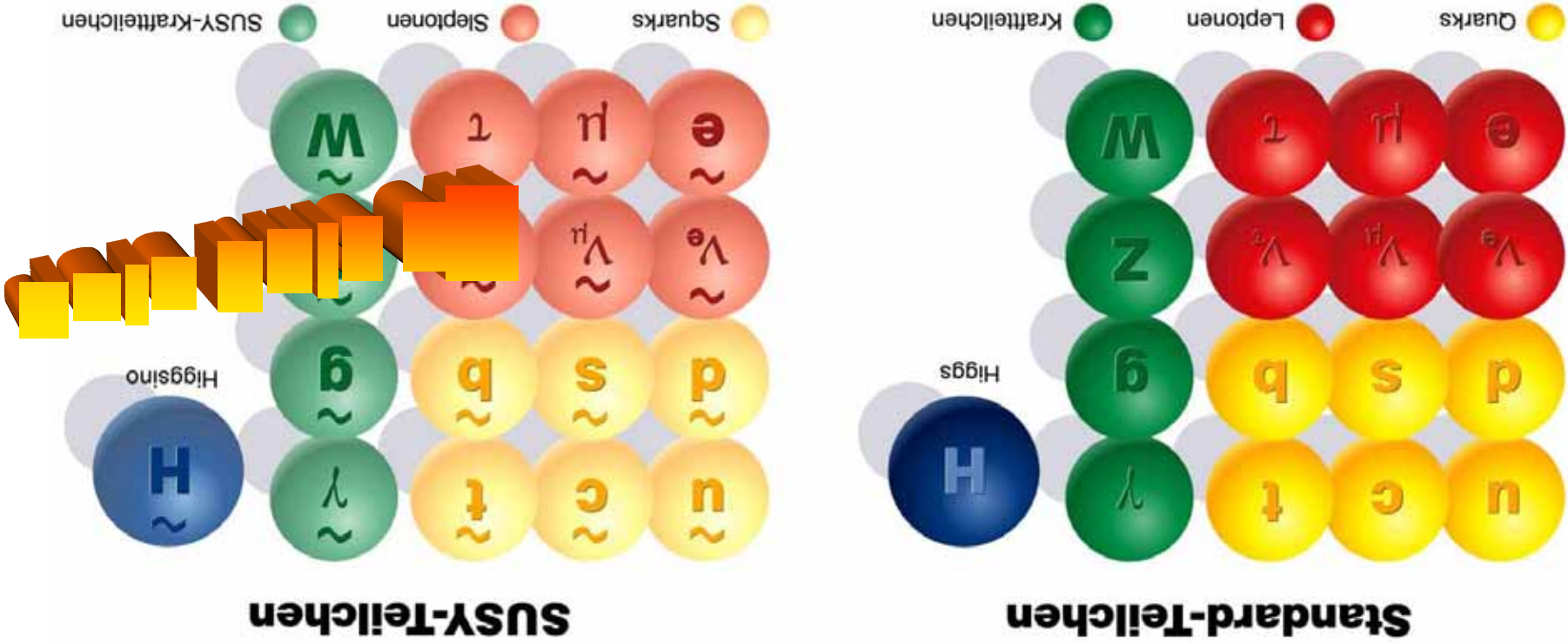
10.3 Supersymmetrie

- Möglichkeit zur Lösung der theoretischen Probleme mit Grosser Vereinheitlichung der Kräfte: **Supersymmetrie**
- Für jedes existierende Teilchen: neues ähnliches Teilchen, mit um $1/2$ Einheit verschiedenem Spin



Supersymmetrie

- verdoppelte Anzahl der Teilchen:



- bisher nicht gesehen bei LEP, HERA, Tevatron ... -> müssen (zu) schwer sein!
- Hoffnung des Nachweises bei LHC!

SUPERSYMMETRIE - SUSY

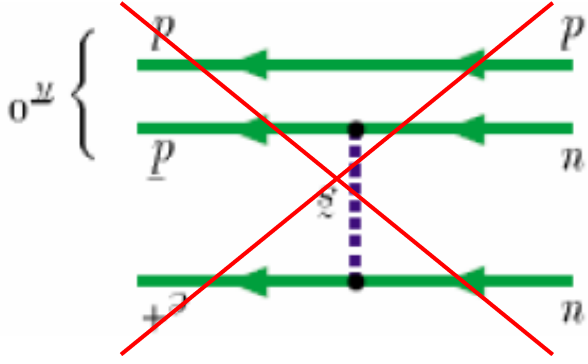
SUSY: zusätzliche WW, die SUSY- und eich-invariant sind ermöglichen Lepton- u. Baryonzahlverletzung
 → Einführung der R_p (R-Parität) *:

$$R_p = (-1)^{3B+2S+L}$$

- $R_p = +1$... SM-Teilchen

- $R_p = -1$... SUSY-Partner

→ jeder Vertex hat eine gerade Anzahl von SUSY-Teilchen → verhindert Proton-Zerfall



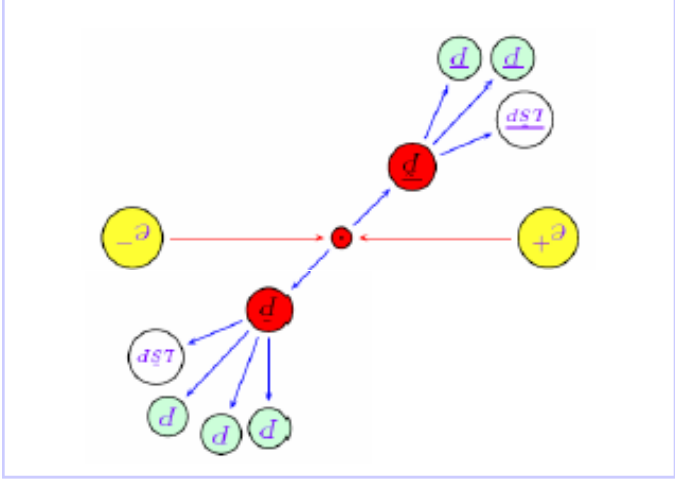
→ SUSY-Partner können nur paarweise erzeugt werden

→ das leichteste SUSY-Teilchen **LSP** (Lightest SUSY Particle) ist stabil, neutral und ohne Farbladung
 → nur schwache WW → im Detektor wie Neutrino "nachweisbar"

→ Kandidat für dunkle Materie

*) **B...Baryonzahl, S...Spin, L...Leptonzahl**

- Paarerzeugung LSP in e^+e^- , pp , ...



SUSY: löst SUSY die Probleme des SM ???

- < 100 freie Parameter zur Beschreibung der Massen und Kopplungen der SUSY-Teilchen

- keine SUSY-Teilchen experimentell gefunden →

Supersymmetrie ist "gebrochen" ($M^{\text{SUSY}} \neq M^{\text{SM}}$)

- falls keine SUSY-Teilchen bis zu $M \sim 1 \text{ TeV}$ →

Hierarchieproblem nicht gelöst

- so lange keine experimentelle Evidenz für SUSY

→ viele Modelle, wie SUSY gebrochen sein könnte

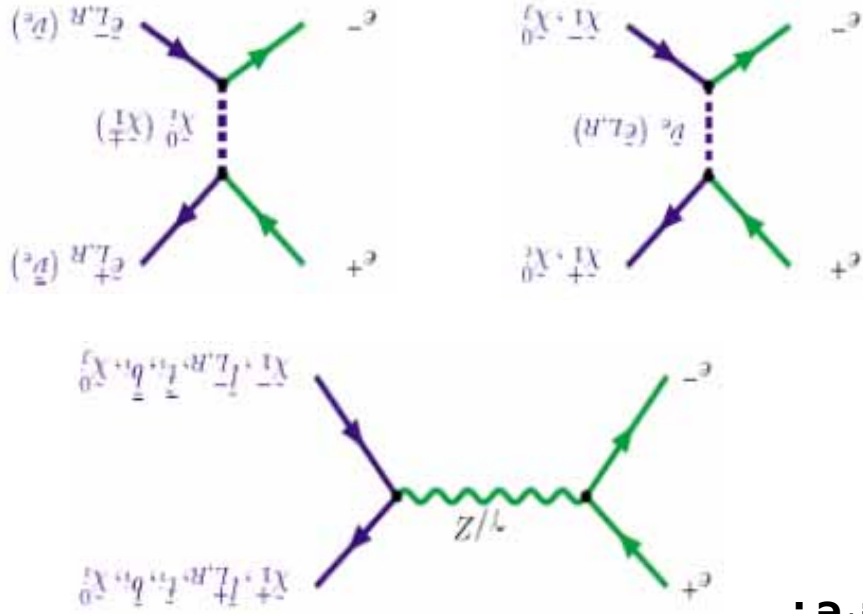
→ SUSY-Teilchen-Suche ein Schwerpunkt des experimentellen Programms an Hochenergiebeschleunigern und der Astro-Teilchenphysik

SUCHE NACH SUSY-TEILCHEN IN e^+e^-

Direkte SUSY-Suche:

- Suche nach "fehlender Energie (Impuls)" durch LSP in hochenergetischen Teilchenreaktionen
- M^{SUSY} Zerfälle hängen in komplizierter Weise von den Annahmen über die SUSY-Parameter ab,
- die signifikantesten Massen-Grenzen kommen von e^+e^- (LEP), Tevatron (pp) und HERA (ep)
- falls am LHC SUSY nicht gefunden wird: SUSY (in heutiger Vorstellung) schwierig

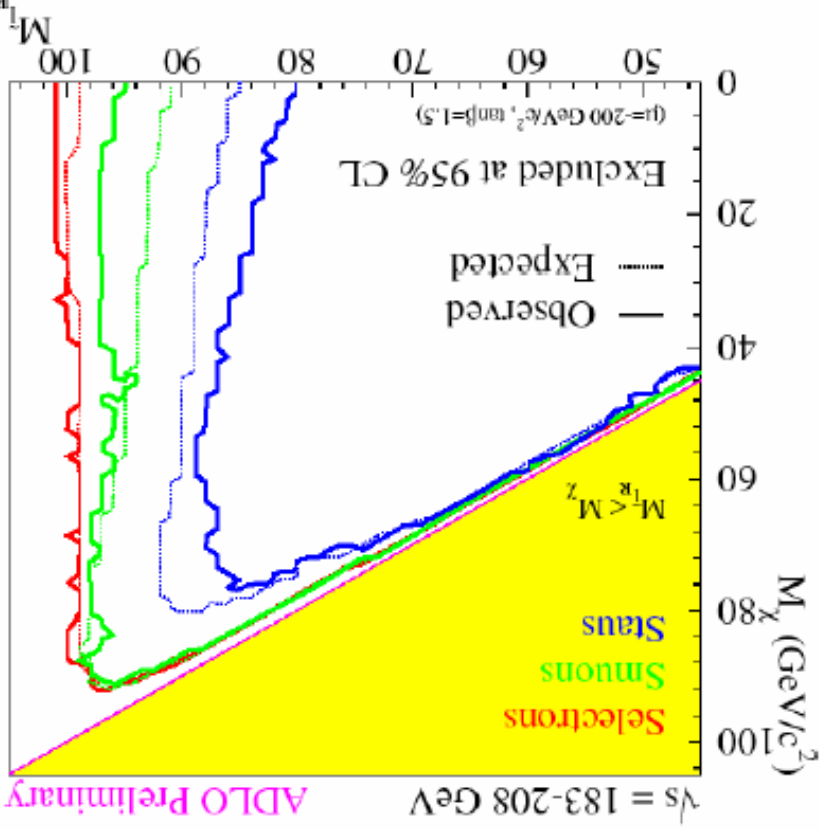
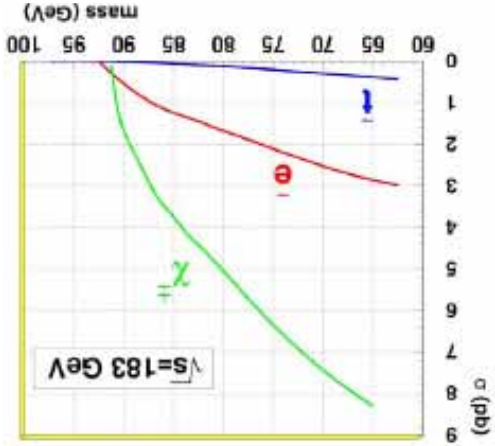
e^+e^- :



χ^0 Neutralinos ... Mischung von W_0, B_0 und neutralen Higgsinos $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0$
 χ^\pm Charginos ... Mischung von W^\pm und geladenen Higgsinos $\tilde{H}_1^\pm, \tilde{H}_2^\pm$

Ergebnisse e^+e^- :

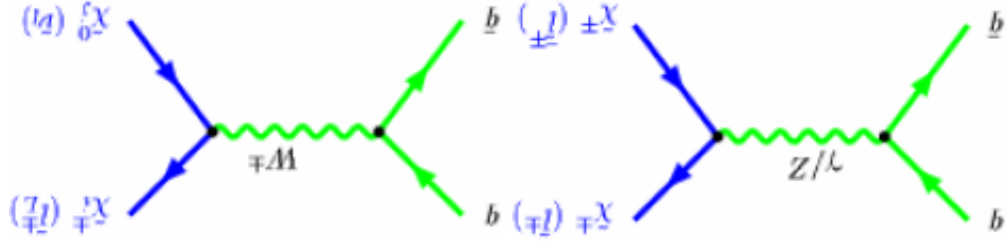
empfindlich bis:
 $M^{\text{SUSY}} > E_{\text{cm}}/2$
 $\sim 100 \text{ GeV}$



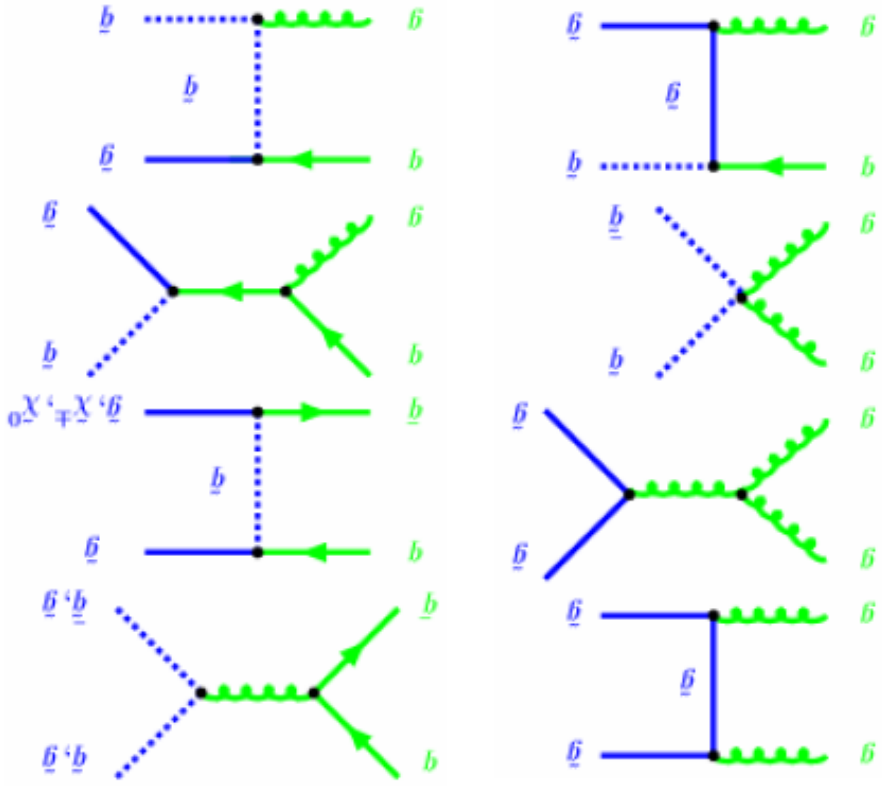
SUCHE NACH SUSY-TEILCHEN IN pp

pp-Produktion:

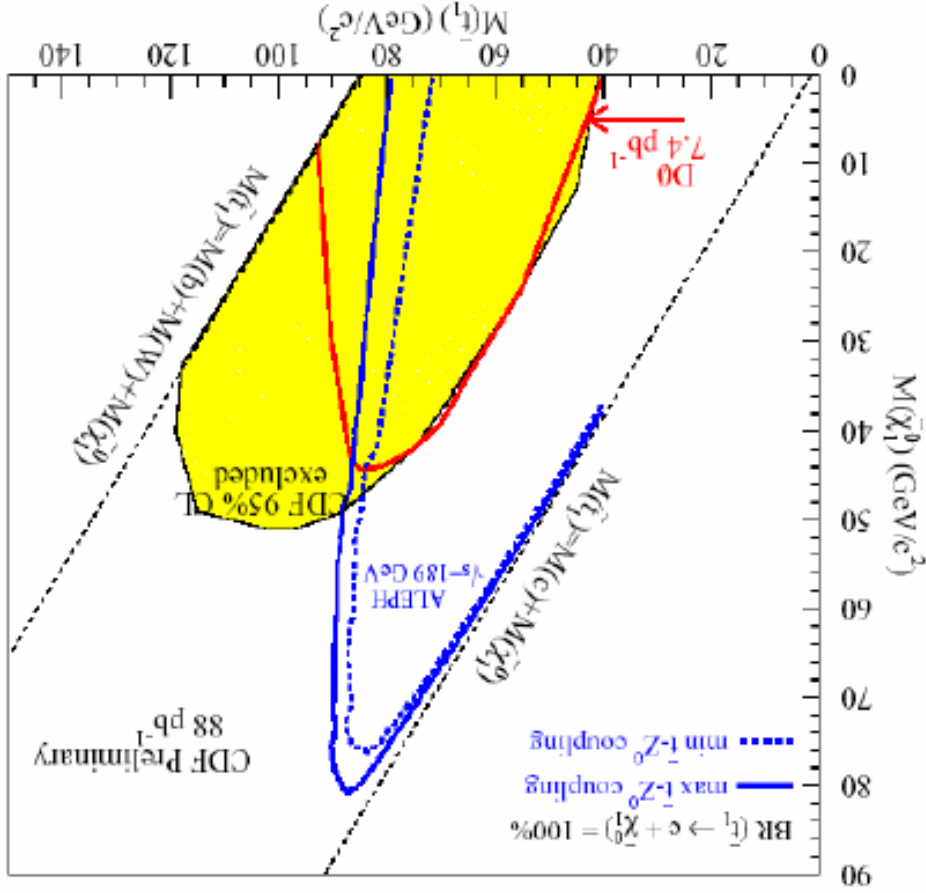
- Quark-Antiquark Annihilation:



- Gluon induzierte Erzeugung:



Ergebnisse pp:

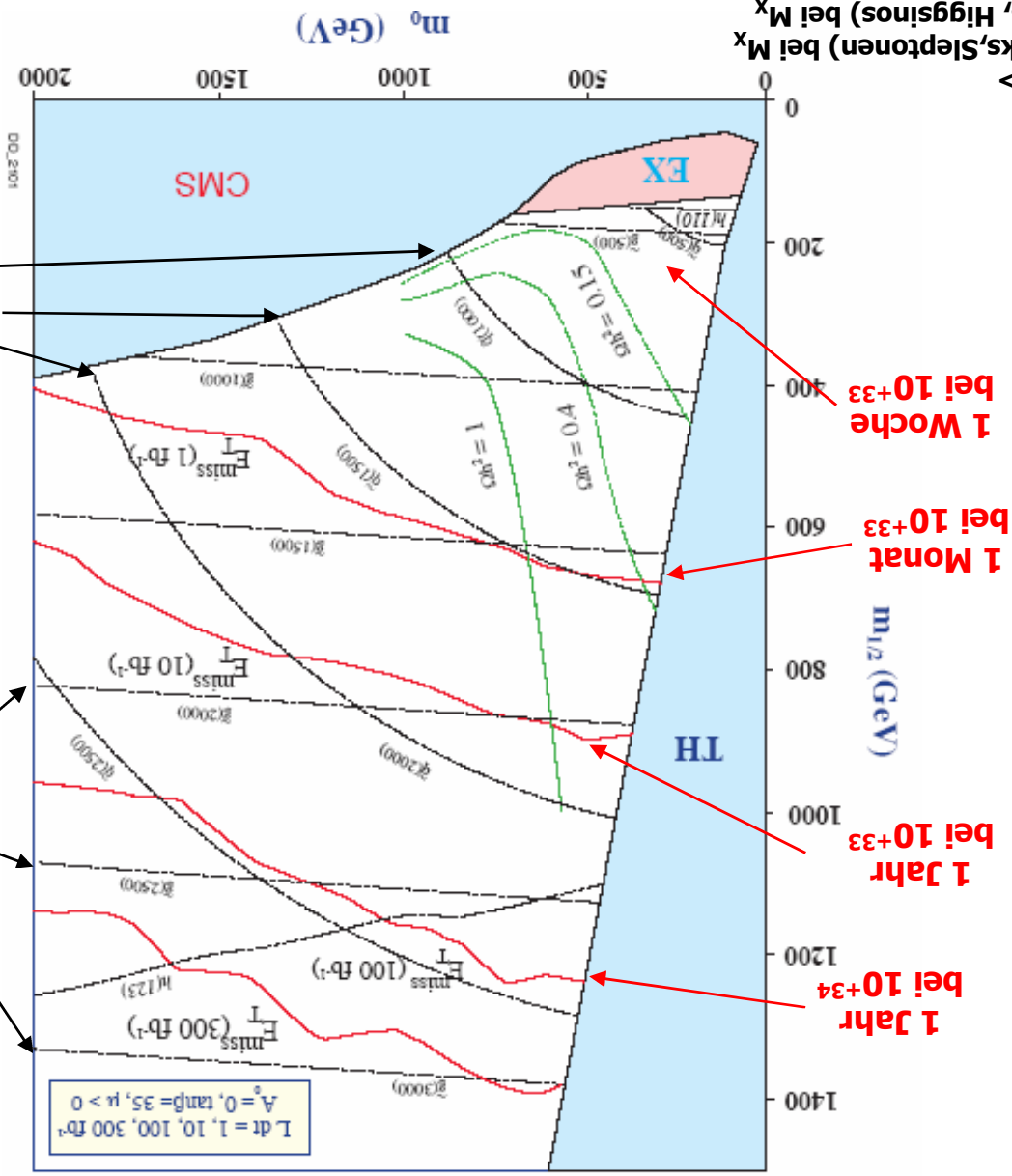


Zurzeit läuft Tevatron ausgezeichnet und SUSY-
Suche ist ein wesentlicher Teil des Programms,
aber Antwort (Entdeckung) voraussichtlich erst
am LHC

SUCHE NACH SUSY AM LHC-ZUSAMMENFASSUNG

SUSY am LHC: hohe Empfindlichkeit für M_{SUSY} bis oberhalb von 2 TeV:

- sobald LHC und Detektoren laufen (2008) und **verstanden** (Datum?) sollte die Frage nach SUSY bald beantwortet sein
- $m_0, m_{1/2}, A_0, \tan\beta, \mu$ Parameter des speziellen SUSY-Modells



$\tan\beta = v_1/v_2 \dots$ Vakuumserwartungswerte $\langle H_{1,2} \rangle$

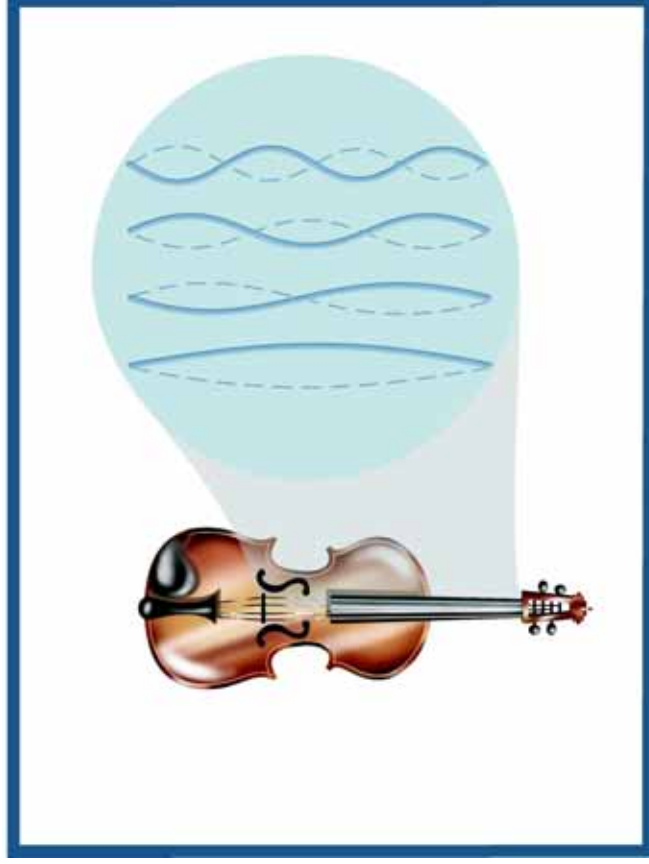
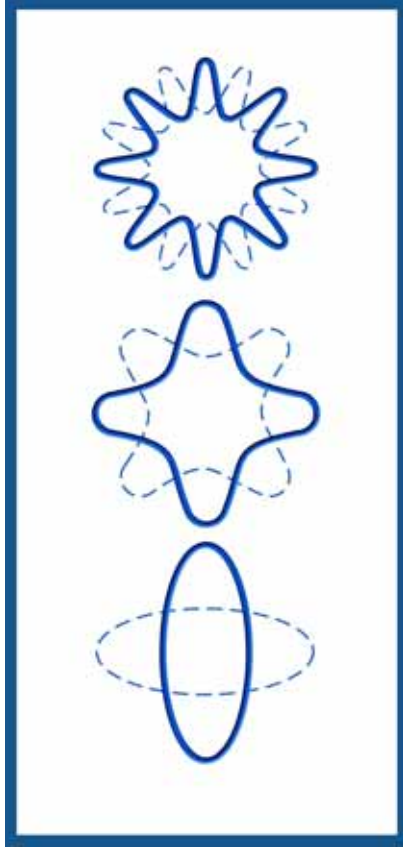
$m_{1/2} \dots$ gemeinsame Masse Bosonen (Higgs, Squarks, Sleptonen) bei M_X

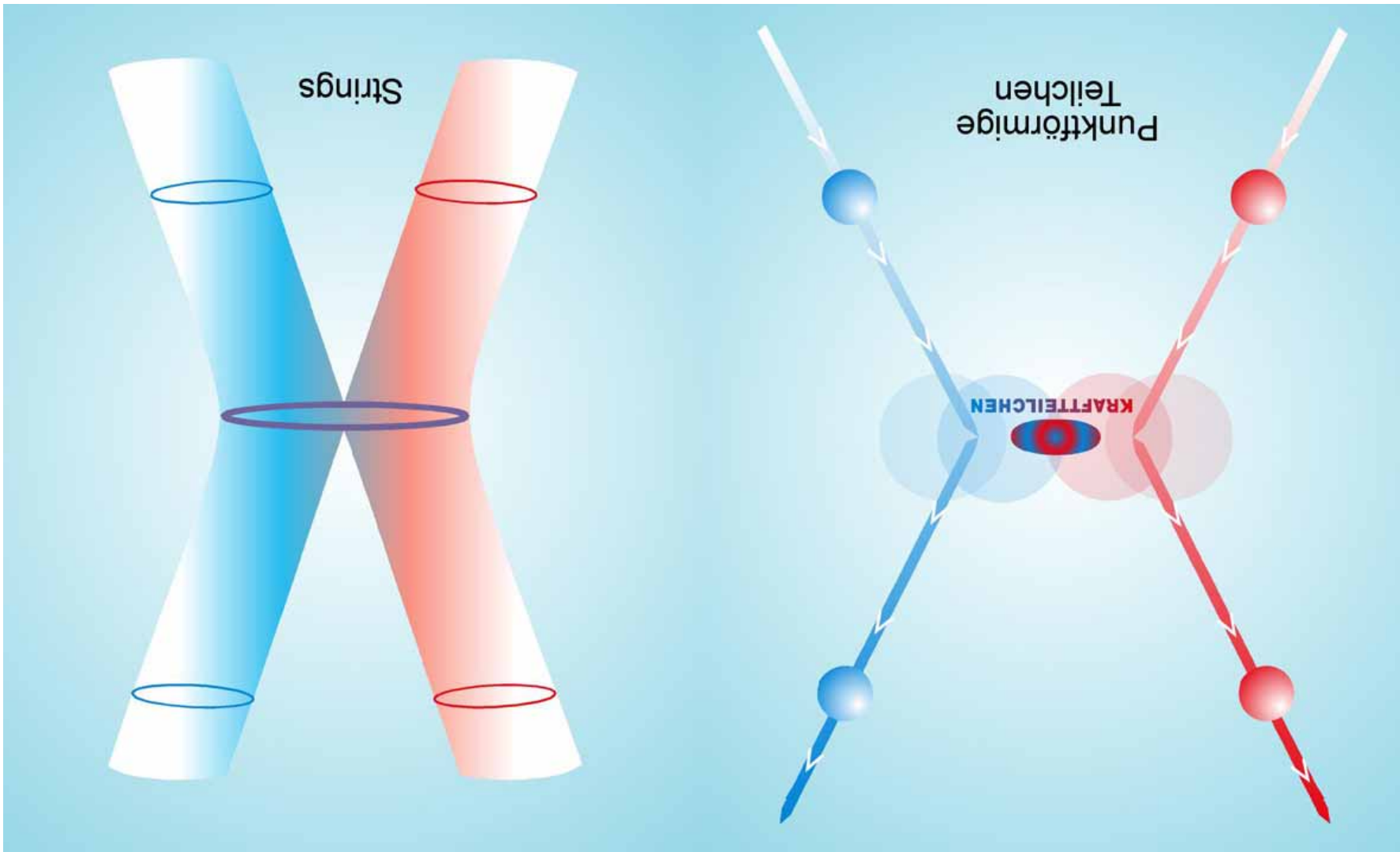
$m_0 \dots$ gemeinsame Masse Fermionen (Gauginos, Higgsinos) bei M_X



10.4 Vereinheitlichung und Superstrings

Um Gravitation in Vereinheitlichung der Kräfte einzubeziehen, benötigen Superstrings (Supersymmetrische Strings)

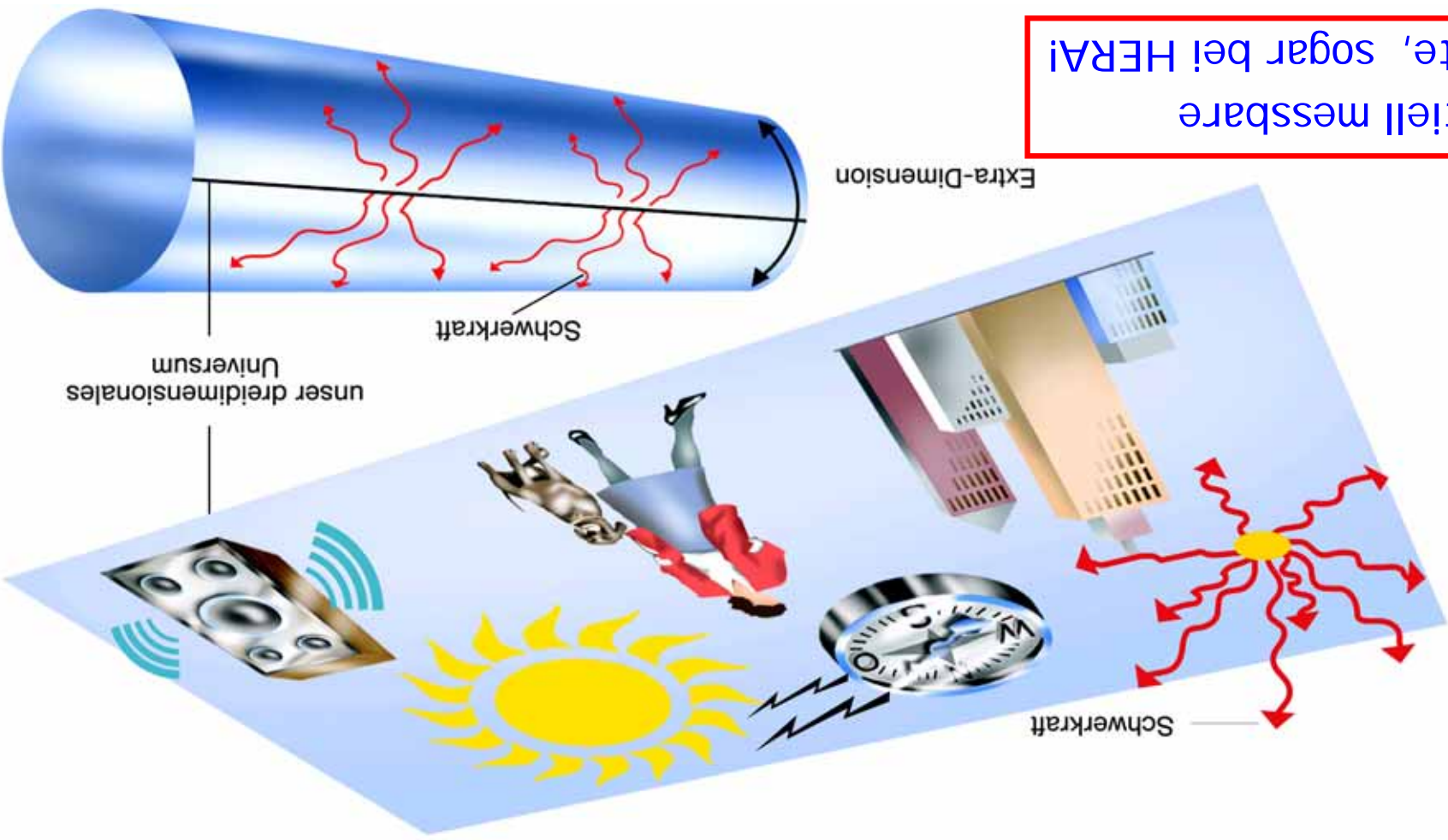




Superstring-Wechselwirkung

10.5 Extra Dimensionen?

- Superstrings brauchen mehr als 3+1 Dimensionen
- Zusätzliche ("Extra") Dimensionen -> "aufgerollt"
- könnten bis zu mm gross sein!



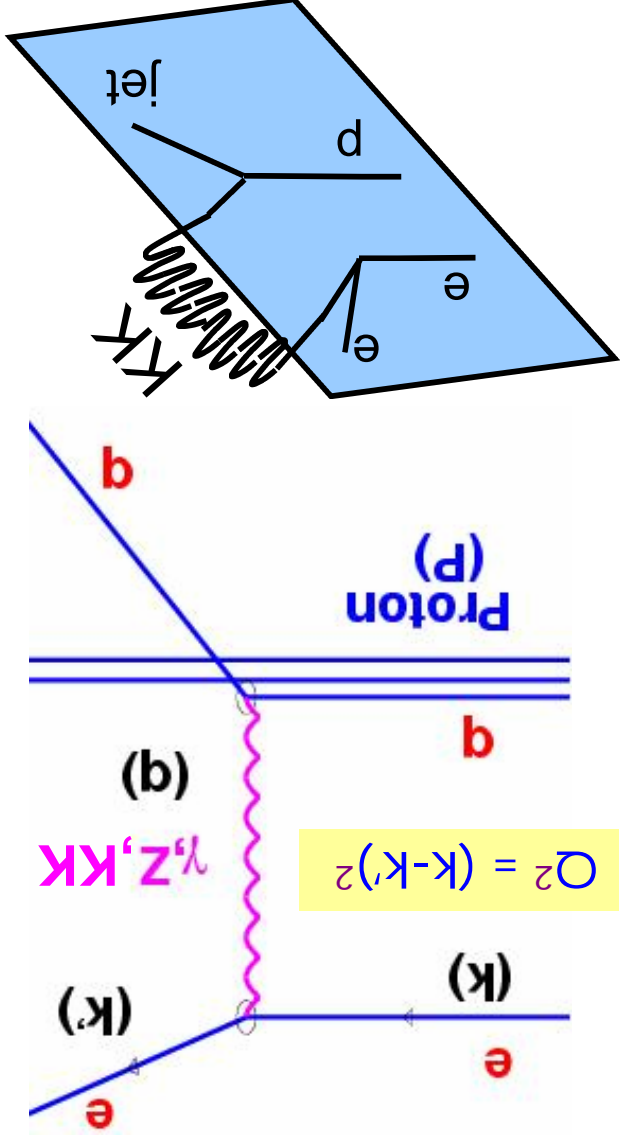
potentiell messbare Effekte, sogar bei HERAI

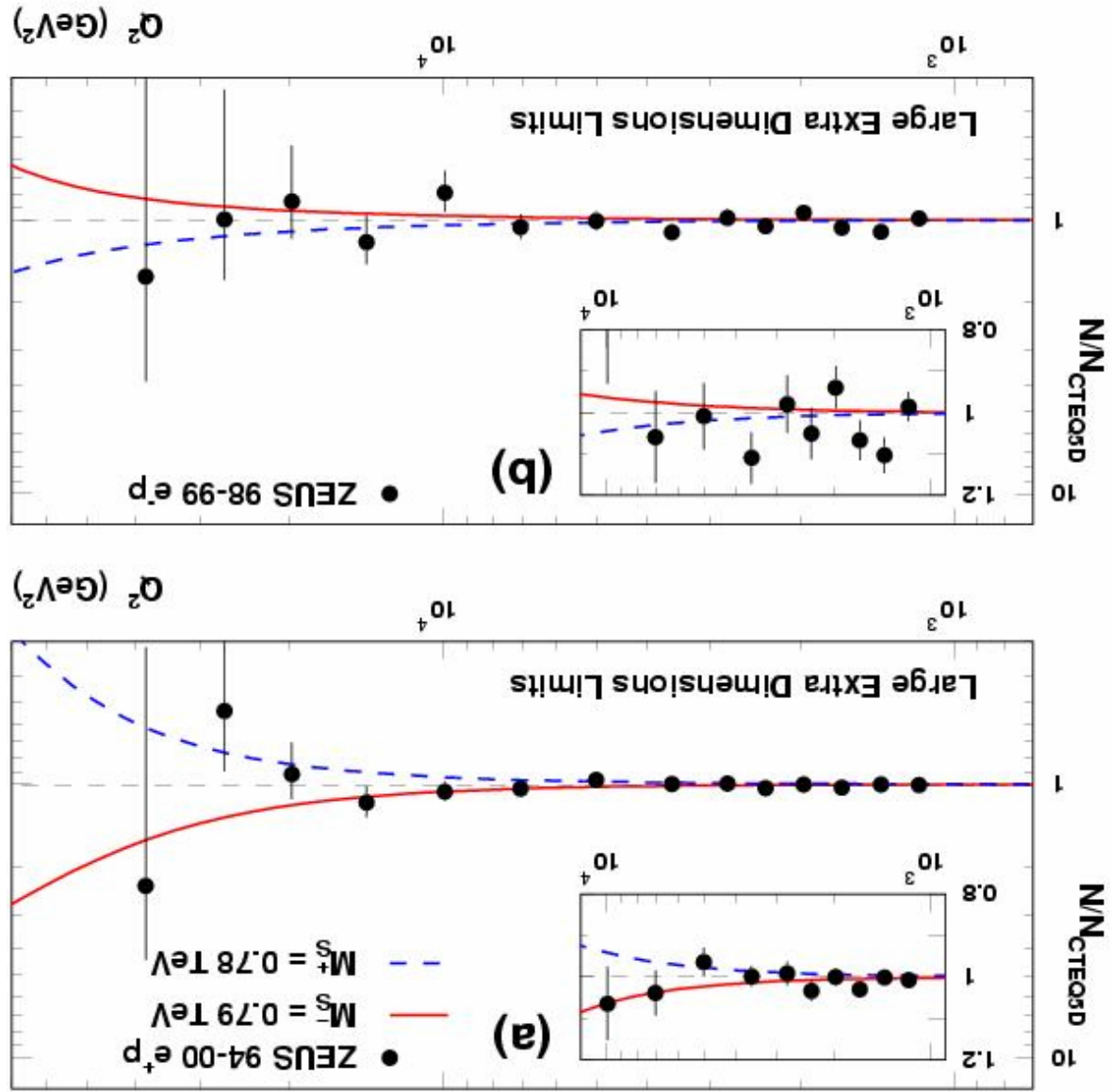
Grosse Extra Dimensionen: Virtueller Graviton-Austausch

Virtueller Graviton-Austausch im t-Kanal interferiert mit tief unelastischer Streuung (DIS)

Austausch von «Kaluza-Klein-Turm» (K, Serie von äquidistanten Resonanzen) beeinflusst Q^2 -Verteilung bei grossen Q^2 (Photon-Virtualität)

Vergleiche $d\sigma/dQ^2$ mit Standard-Modell-Erwartung





$\lambda = -1 : M_S > 0.79 \text{ TeV}$
 $\lambda = +1 : M_S > 0.78 \text{ TeV}$

benutzte $d\sigma/dQ^2$ in
 binned likelihood
 \Rightarrow 95% CL-Grenze auf
 M_S (TeV)

Zeus	$s_{1/2}(\text{GeV})$	$L_{\text{int}}(\text{pb}^{-1})$
e^+p	301/319	112
e^-p	319	16

Grosse Extra Dimensionen: Virtueller Graviton-Austausch

ZUSAMMENFASSUNG: PHYSIK JENSEITS DES SM

Zusammenfassung Kapitel 10

- Standard-Modell beschreibt die experimentellen Daten perfekt, lässt aber viele Fragen offen

- Warum 3 Familien ?

- Warum die experimentell gefundenen Massenwerte der Quarks und Leptonen ?

- Warum $1/3$ Ladung der Quarks ?

- Lassen sich ew und starke WW vereinheitlichen ?

- Ist eine Extrapolation zu hohen Energien möglich ?

- Warum sind die Energieskalen so verschieden ($10^2 - 10^{16} - 10^{19}$ GeV) ?

- Was ist die Lösung des Hierarchie-Problems?

- Wie passt die Gravitation in das Bild ?

- Das Standard-Modell sagt vorher, dass bei Energien um 1 TeV voraussichtlich eine neue Physik auftreten wird: SUSY?, Compositeness?, Extra Dimensionen?

- GUT-SU(5) (Große Vereinheitlichte Theorie), die "kleinste" Gruppe, die $U(1)^4 - SU(2)^1 - SU(3)^c$ enthält, macht viele Vorhersagen, die allerdings quantitativ vom Experiment **nicht** bestätigt werden
- SUSY (Fermionen-Bosonen-Symmetrie) ist der theoretisch am besten verstandene Kandidat zur Beschreibung der Physik jenseits des Standard-Modells

- Stringtheorie versucht die Kräfte des SM mit der Gravitation zu vereinen – heroische Anstrengung, bisher (noch?) keine Verbindung mit dem Experiment