

# Zum Beispiel: Nichtkommutative Feldtheorie (neue Physik an neuen Beschleunigern)

Thorsten Ohl

Lehrstuhl für Theoretische Physik II, Universität Würzburg  
und Fachbereich Physik, TU Darmstadt

Universität Würzburg, 8. Juni 2005

## Nichtkommutative Quantenfeldtheorie

Was heißt . . .

. . . und zu welchem Ende studiert man NCQFT?

Moyal-Weyl-\*-Produkt

## Eichtheorien

Ladungsquantisierung

Seiberg-Witten-Abbildungen

NCSM à la Wess et al.

## Beschleunigerexperimente

Monte Carlo: O'Mega, VAMP & Whizard

$\gamma\gamma \rightarrow f\bar{f}$  @ ILC

$PP \rightarrow Z\gamma \rightarrow e^+e^-\gamma$  @ LHC

## „Theoretische Theorie“

$\theta_{0i} \neq 0$ : Unitarität und Eichinvarianz

Höhere Ordnungen in  $\theta_{\mu\nu}$

## Zusammenfassung und Ausblick

- ▶ **Quantenmechanik:** Messungen von Ort und Impuls **komplementär**

$$\Delta x_i \cdot \Delta p_j \geq \hbar/2 \cdot \delta_{ij}$$

formal: Operatoren vertauschen nicht

$$[x_i, p_j] = x_i p_j - p_j x_i = i\hbar \delta_{ij}$$

- ▶ **Bislang** keine experimentellen Hinweise, daß Messungen von Ortskoordinaten inkompatibel:

$$\Delta x_\mu \cdot \Delta x_\nu \stackrel{?}{=} 0 \quad \Leftrightarrow \quad [x_\mu, x_\nu] \stackrel{?}{=} 0$$

- ▶ Trotzdem

$$[\hat{x}_\mu, \hat{x}_\nu] = i\theta_{\mu\nu} = i \frac{C_{\mu\nu}}{\Lambda_{\text{NC}}^2}$$

**erlaubt**, solange **charakteristische Energieskala**  $\Lambda_{\text{NC}}$  groß,  
bzw. **minimale Fläche** oder **Längenskala**

$$a_{\text{NC}} = l_{\text{NC}}^2 = 1/\Lambda_{\text{NC}}^2$$


klein im Vergleich zur Auflösung **bisheriger** Experimente.

## ▶ Fundamentale Längenskala

- ▶  $x_\mu$ -Kontinuum  $\Rightarrow$  Gitter der Eigenwerte der Operatoren  $\hat{x}_\mu$  (Gitterkonstante  $\sim 1/\Lambda_{\text{NC}}$ ) [Snyder, Wess]
- ▶ sanftes Abschneiden der (divergenten) Beiträge  $E > \Lambda_{\text{NC}}$  zur Quantengravitation (vgl.  $\hbar$  und Schwarzkörperstrahlung)
- ∴ innere und raumzeitliche Symmetrien vertauschen nicht mehr
- ∴ reichhaltigere Symmetrien

## ▶ Stringtheorie

- ▶ NCQFT ist Niederenergielimes von Stringtheorien [Seiberg/Witten]
- ▶ 1752 Zitate für ein Paper von August 1999 ...

 keine Hinweise auf den Wert von  $\Lambda_{\text{NC}}$

 Warum nicht? *Schön ist, Mutter Natur, deiner Erfindung Pracht und alles, was*

- ▶ experimentell noch nicht ausgeschlossen,
- ▶ mathematisch konsistent und elegant, sowie
- ▶ an der nächsten Generation von Experimenten nachweisbar ist,

*Ist ein großer Gedanke, Ist des Schweißes der Edlen wert!*

Spezialfall:  $\theta^{\mu\nu}$  **konstante**  $4 \times 4$ -Matrix:

$$[\hat{x}^\mu, \hat{x}^\nu] = i\theta^{\mu\nu} = i\frac{1}{\Lambda_{\text{NC}}^2} C^{\mu\nu} = i\frac{1}{\Lambda_{\text{NC}}^2} \begin{pmatrix} 0 & -E^1 & -E^2 & -E^3 \\ E^1 & 0 & -B^3 & B^2 \\ E^2 & B^3 & 0 & -B^1 \\ E^3 & -B^2 & B^1 & 0 \end{pmatrix}$$

**NB:** „**elektrische**“ und „**magnetische**“ Beiträge  $\vec{E}$  (d. h.  $\theta^{0i}$ ) und  $\vec{B}$  (d. h.  $\theta^{ij}$ ) spielen theoretisch und phänomenologisch unterschiedliche Rollen

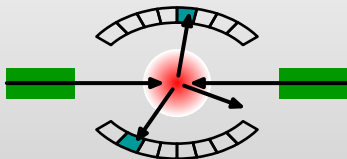
„**Fundamentalistischer**“ Zugang:

1. konstruiere Observable aus den Operatoren  $\hat{x}_\mu$
2. entwickle Streutheorie auf nichtkommutativen Räumen

☺ **unnötig kompliziert ...**

Typisches Experiment der Teilchenphysik:

- ▶ Ein Beschleuniger präpariert einen Anfangszustand,
- ▶ der sich durch die zu untersuchende Wechselwirkung verändert,
- ▶ ein Detektor mißt den entstehenden Endzustand:



- ∴ Experimente studieren die Ortskoordinaten  $\hat{x}_\mu$  nicht direkt, sondern deren Funktionen: Zustände und Felder
- ∴ Ergebnisse der Beobachtungen in effektiver Lagrangedichte als Produkte von Funktionen kodifiziert:

$$\mathcal{L}_{\text{eff.}}(x) = \dots + g_2 \bar{\psi}(x) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \psi'(x) W^\mu(x) \\ + g_3 \sum_{a,b,c} f_{abc} \frac{\partial A_\nu^a}{\partial x^\mu}(x) A^{b,\mu}(x) A^{c,\nu}(x) + \dots$$

☺ einfachere, aber äquivalente Realisierung: ersetze **Punktprodukt** von Funktionen der **nicht**kommutativen Variablen

$$(f \cdot g)(\hat{x}) = f(\hat{x})g(\hat{x})$$

**überall** durch **Moyal-Weyl-\*-Produkt** von Funktionen **kommutativer** Variablen:

$$(f * g)(x) = f(x) e^{\frac{i}{2} \overleftarrow{\partial}^{\mu} \theta_{\mu\nu} \overrightarrow{\partial}^{\nu}} g(x) = f(x)g(x) + \frac{i}{2} \theta_{\mu\nu} \frac{\partial f(x)}{\partial x_{\mu}} \frac{\partial g(x)}{\partial x_{\nu}} + \mathcal{O}(\theta^2)$$

Dann gilt für die Koordinaten

$$(x_{\mu} * x_{\nu})(x) = x_{\mu} x_{\nu} + \frac{i}{2} \theta_{\mu\nu}$$

und insbesondere

$$[x_{\mu} * , x_{\nu}](x) = (x_{\mu} * x_{\nu})(x) - (x_{\nu} * x_{\mu})(x) = i \theta_{\mu\nu}$$

**NB:** höhere Ordnungen in  $\theta_{\mu\nu}$  nötig, damit **\*-Produkt assoziativ**:

$$(f * g) * h = f * (g * h)$$

Wichtige Eigenschaften:

- ▶ **Propagatoren** bleiben **ungeändert**:

$$\int d^4x \phi(x) * \eta(x) = \int d^4x \phi(x) \eta(x)$$

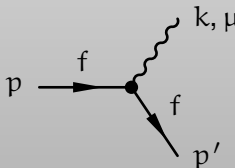
- ▶ **zyklische Invarianz**:

$$\int d^4x \phi_1(x) * \phi_2(x) * \dots * \phi_n(x) = \int d^4x \phi_2(x) * \dots * \phi_n(x) * \phi_1(x)$$

- ▶ **Nichtlokalität** durch **Moyal-Phasen**, z. B. für „naive“ NCQED

$$\bar{\psi} \mathcal{A} \psi \rightarrow \bar{\psi} * \mathcal{A} * \psi$$

also



$$= iQ_f e \gamma_\mu \rightarrow iQ_f e \gamma_\mu e^{\frac{i}{2} p_\mu \theta^{\mu\nu} p'_\nu}$$

# Eichtheorien



Eichprinzip seit 35 Jahren **zentral** für die theoretische Teilchenphysik

**Materiefelder** :  $\psi \rightarrow \psi' = e^{ig\eta}\psi$  (NB:  $\eta$  **nicht** konstant!)

**Eichfelder** :  $A_\mu \rightarrow A'_\mu = e^{ig\eta}A_\mu e^{-ig\eta} + \frac{i}{g}e^{ig\eta}(\partial_\mu e^{-ig\eta})$

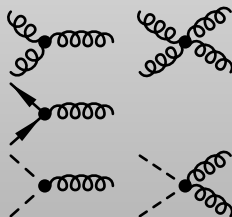
so daß für **kovariante Ableitung** und **Feldstärke**

$$D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu \rightarrow D'_\mu = e^{ig\eta}D_\mu e^{-ig\eta}$$

$$F_{\mu\nu} = \frac{i}{g}[D_\mu, D_\nu] = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig[A_\mu, A_\nu] \rightarrow F'_{\mu\nu} = e^{ig\eta}F_{\mu\nu}e^{-ig\eta}$$

Bausteine für Wechselwirkungen

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2} \text{tr}(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}) \\ & + \bar{\psi}(i\not{D} - m)\psi \\ & + (D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi - V(|\phi|) \end{aligned}$$





naheliegende **nichtkommutative Verallgemeinerung**:

$$\begin{aligned}\psi &\rightarrow \psi' = e^{ig\eta^*} \psi = \psi + ig\eta^* \psi + \frac{(ig)^2}{2!} \eta^* \eta^* \psi + \mathcal{O}(\eta^3) \\ A_\mu &\rightarrow A'_\mu = e^{ig\eta^*} A_\mu e^{-ig\eta^*} + \frac{i}{g} e^{ig\eta^*} (\partial_\mu e^{-ig\eta^*}) \\ &= A_\mu + ig[\eta^*, A_\mu] + \partial_\mu \eta + ig[\eta^*, \partial_\mu \eta] + \mathcal{O}(\eta^2)\end{aligned}$$

**Kein Unterschied** zwischen **abelsch** und **nicht-abelsch**:

$$\therefore A'_\mu \neq A_\mu + \partial_\mu \eta \text{ auch wenn } [\eta, A_\mu] = 0, \text{ weil } [\eta^*, A_\mu] \neq 0$$

$$\therefore F_{\mu\nu} \neq \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \text{ auch wenn } [A_\mu, A_\nu] = 0, \text{ weil } [A_\mu^*, A_\nu] \neq 0$$

😊 herausragende Signatur:

**Selbstkopplung neutraler Eichbosonen  $\gamma$  und  $Z$**   
in führender Ordnung (ohne Schleifen)!

∴ **Form und Stärke** der Kopplung zwischen Eichbosonen durch Kopplung an Materie **festgelegt!**

☺ für jede nicht-abelsche Eichtheorie **nur eine** unabhängige Kopplung

☹ auch in nichtkommutativen Verallgemeinerungen der QED:

$$g_M^2 \cdot \text{diagram 1} + g_M^2 \cdot \text{diagram 2} + g_M g_{TGC} \cdot \text{diagram 3} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \boxed{g_M = g_{TGC}}$$

☹ **unverträglich** mit den **Hyperladungs**-Quantenzahlen im  $SU(3)_C \times SU(2)_T \times U(1)_Y$  **Standardmodell**:

$$Y(L_e, e_R, \nu_{e,R}, L_{u,d}, u_R, d_R) = (-1, -2, 0, 1/3, 4/3, -2/3)$$

☹ außerdem:  $SU(N)$  nicht realisierbar, nur  $U(N)$  schließt ab:

$$[A_\mu^*, A_\nu]_- = \frac{1}{2} [A_\mu^a, A_\nu^b]_+ [T^a, T^b]_- + \frac{1}{2} [A_\mu^a, A_\nu^b]_- [T^a, T^b]_+$$

Drücke **nichtkommutative** Größen durch **kommutative** Größen (und Ableitungen) aus

$$\hat{A}_\mu(x) = \hat{A}_\mu(A_{\nu_1}(x), \partial_{\nu_1} A_{\nu_2}(x), \partial_{\nu_1} \partial_{\nu_2} A_{\nu_3}(x), \dots, \theta)$$

$$\hat{\eta}(x) = \hat{\eta}(\eta(x), \partial_{\nu_1} \eta(x), \dots, A_{\nu_1}(x), \partial_{\nu_1} A_{\nu_2}(x), \dots, \theta)$$

$$\hat{\psi}(x) = \hat{\psi}(\psi(x), \partial_{\nu_1} \psi(x), \dots, A_{\nu_1}(x), \partial_{\nu_1} A_{\nu_2}(x), \dots, \theta)$$

realisiere **nichtkommutative Eichtransformation** durch **kommutative**:

$$\hat{A} \rightarrow \hat{A}'(A, \theta) = e^{ig\hat{\eta}^*} \hat{A}_\mu(A, \theta) e^{-ig\hat{\eta}^*} + \frac{i}{g} e^{ig\hat{\eta}^*} \left( \partial_\mu e^{-ig\hat{\eta}^*} \right) \stackrel{!}{=} \hat{A}(A', \theta)$$

$$\hat{\psi} \rightarrow \hat{\psi}'(\psi, A, \theta) = e^{ig\hat{\eta}^*} \hat{\psi} \stackrel{!}{=} \hat{\psi}(\psi', A', \theta)$$

Lösung (**nicht** eindeutig) als Potenzreihe in  $\theta$ :

$$\hat{A}_\mu(x) = A_\mu(x) + \frac{1}{4} \theta^{\rho\sigma} [A_\sigma(x), \partial_\rho A_\mu(x) + F_{\rho\mu}(x)]_+ + \mathcal{O}(\theta^2)$$

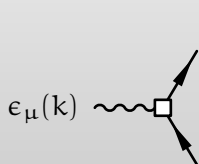
$$\hat{\psi}(x) = \psi(x) + \frac{1}{2} \theta^{\rho\sigma} A_\sigma(x) \partial_\rho \psi(x) + \frac{i}{8} \theta^{\rho\sigma} [A_\rho(x), A_\sigma(x)]_- \psi(x) + \mathcal{O}(\theta^2)$$

$$\hat{\eta}(x) = \eta(x) + \frac{1}{4} \theta^{\rho\sigma} [A_\sigma(x), \partial_\rho \eta(x)]_+ + \mathcal{O}(\theta^2)$$

Neue Wechselwirkungsvertices für Eich- und Materiefelder aus der Entwicklung von

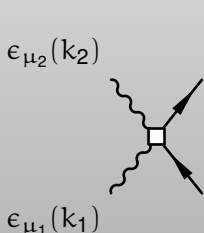
$$g\bar{\hat{\psi}}(x)\hat{\mathcal{A}}(x)\hat{\psi}(x) = g\bar{\psi}(x)\mathcal{A}(x)\psi(x) + \mathcal{O}(\theta)$$

also (alle Impulse auslaufend)



$$\epsilon_{\mu}(k) \quad \bar{u}(p')$$

$$= ig \cdot \frac{i}{2} [(\theta k)_{\mu} \not{p} + (\theta p)_{\mu} \not{k} - (k\theta p) \gamma_{\mu}]$$



$$\epsilon_{\mu_2}(k_2) \quad u(p)$$

$$\bar{u}(p')$$

$$= ig^2 \cdot \frac{i}{2} \left[ (\theta(k_1 - k_2))_{\mu_1} \gamma_{\mu_2} - (\theta(k_1 - k_2))_{\mu_2} \gamma_{\mu_1} \right. \\ \left. - \theta_{\mu_1 \mu_2} (k_1 - k_2) \right]$$

$$\epsilon_{\mu_1}(k_1) \quad u(p)$$

😊 Ward Identität bereits von



erfüllt, **3-Eichboson-Vertex** nicht erforderlich!

☹️ keine Vorhersage für 3-Eichboson-Vertex

▶ offene Fragen

∴ **Seiberg-Witten-Abbildung** enthält nicht nur Kommutatoren

☹️ führt aus Lie-Algebra in **einhängende assoziative Algebra**: im Allgemeinen **unendlichdimensional!**

😊 *Wo aber Gefahr ist, wächst / Das Rettende auch.:*

**Seiberg-Witten-Abbildungen nicht eindeutig**: Freiheiten hinreichend zur Elimination der überzähligen Freiheitsgrade

😊 ... furchtlos gehn / Die Söhne der Alpen über den Abgrund weg / Auf leichtgebaueten Brücken / ...

In der **ein**hüllenden Algebra ist die Spur

$$S_{\text{gauge}} = -\frac{1}{2} \int d^4x \operatorname{tr} \left( \frac{1}{G^2} F_{\mu\nu} * F^{\mu\nu} \right)$$

**darstellungsabhängig** ( $1/G^2$  vertauscht mit allen Generatoren von  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ )

$\therefore$  Kopplungskonstanten für 3-Eichboson-Vertices **nicht** eindeutig  
z. B. Spur in der Summe **aller** im Standardmodell **vorkommenden**  
Darstellungen:

$\therefore$  Nebenbedingungen an die Eigenwerte  $1/g_i^2$  von  $1/G^2$  in den  
Darstellungen ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )

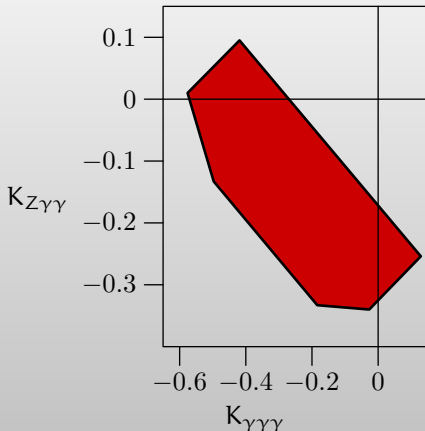
1. **Summenregeln** aus **matching** an's Standardmodell



$$\frac{1}{g_s^2} = \frac{1}{g_3^2} + \frac{1}{g_4^2} + \frac{2}{g_5^2}, \quad \frac{1}{g^2} = \frac{1}{g_2^2} + \frac{3}{g_5^2} + \frac{2}{g_6^2}, \quad \frac{1}{g'^2} = \dots$$

2. **Positivität**

$$\frac{1}{g_i^2} \geq 0$$

$$\begin{array}{l}
 \epsilon_{\mu_1}(k_1) \quad \text{---} \square \quad \begin{array}{l} \text{---} \epsilon_{\mu_3}(k_3) \\ \text{---} \epsilon_{\mu_2}(k_2) \end{array} \\
 = iK_{\gamma\gamma\gamma} \cdot \dots \\
 \\
 \epsilon_{\mu_1}(k_1) \quad \text{---} \square \quad \begin{array}{l} \text{---} \epsilon_{\mu_3}(k_3) \\ \text{---} \epsilon_{\mu_2}(k_2) \end{array} \\
 = iK_{Z\gamma\gamma} \cdot \dots
 \end{array}$$



**NB:** quartische Vertices (z. B.  ,  ) sind  $\mathcal{O}(\theta^2)$ !



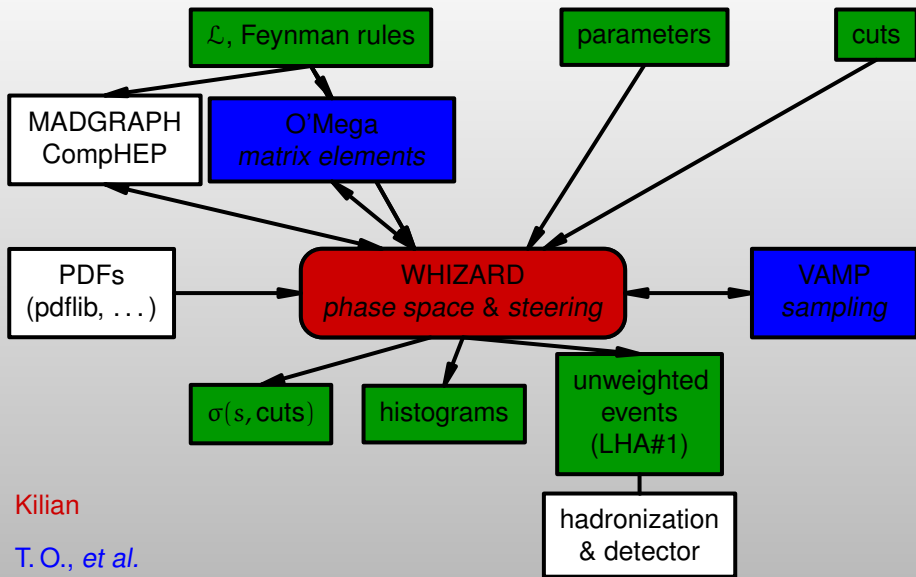
# Experimente an Beschleunigern: ILC & LHC

## Elektroschwache Symmetriebrechung: „Wo kommen die Massen der Elementarteilchen her?“

- ▶ Orthodoxie: **leichtes Higgs & Supersymmetrie**
  - ▶ Entdeckung bei **LHC** (Massenbestimmung)
  - ▶ Eigenschaften bei **ILC** (Präzisionsmessungen)
- ▶ Alternativen
  - ▶ „**Little Higgs**“, d. h. leichtes Higgs als Goldstone Boson (Renormierung kürzlich Thema von Diplomarbeiten [[Frank, Karg](#)])
  - ▶ **zusätzliche Raumzeitdimensionen**
    - ▶ Quantengravitation bei „niedrigen“ Energien
    - ▶ Higgslose Symmetriebrechung mit Kaluza-Klein-Moden (z. B. Konsistenzbedingungen [[T. O./Schwinn, PRD70](#)])

Gemeinsam: reichhaltige Phänomenologie

- ☺ **viele** neue Elementarteilchen
- ☺ darunter Kandidaten für **dunkle Materie**
  - ▶ **viele** komplizierte Streuprozesse und Zerfallskaskaden (SUSY!)
- ∴ **automatisierte Werkzeuge** erforderlich!



Kilian

T.O., et al.

$\gamma(k_1)\gamma(k_2) \rightarrow f(p_1)\bar{f}(p_2)$  im **Standardmodell** ( $\gamma$  polarisiert):

$$A_t^{\text{SM}} = \text{diagram} , \quad A_u^{\text{SM}} = \text{diagram} .$$

The diagram for  $A_t^{\text{SM}}$  shows a top quark loop with two photon vertices (black dots) and two fermion vertices (black dots). The diagram for  $A_u^{\text{SM}}$  shows a u-quark loop with two photon vertices (black dots) and two fermion vertices (black dots).

NCSM [T. O./Reuter, PRD70]:

$$A_{t,1}^{\text{NC}} = \text{diagram} , \quad A_{t,2}^{\text{NC}} = \text{diagram} ,$$

The diagram for  $A_{t,1}^{\text{NC}}$  shows a top quark loop with one photon vertex (black dot) and one fermion vertex (black dot), and one photon vertex (white square). The diagram for  $A_{t,2}^{\text{NC}}$  shows a top quark loop with one photon vertex (white square) and one fermion vertex (black dot), and one photon vertex (black dot).

$$A_{u,1}^{\text{NC}} = \text{diagram} , \quad A_{u,2}^{\text{NC}} = \text{diagram} .$$

The diagram for  $A_{u,1}^{\text{NC}}$  shows a u-quark loop with one photon vertex (white square) and one fermion vertex (black dot), and one photon vertex (black dot). The diagram for  $A_{u,2}^{\text{NC}}$  shows a u-quark loop with one photon vertex (black dot) and one fermion vertex (white square), and one photon vertex (white square).

$$A_c^{\text{NC}} = \text{diagram} , \quad A_{s,\gamma}^{\text{NC}} = \text{diagram} , \quad A_{s,Z}^{\text{NC}} = \text{diagram} .$$

The diagram for  $A_c^{\text{NC}}$  shows a charm quark loop with two photon vertices (white squares) and two fermion vertices (black dots). The diagram for  $A_{s,\gamma}^{\text{NC}}$  shows a s-quark loop with one photon vertex (white square) and one fermion vertex (black dot), and one photon vertex (black dot). The diagram for  $A_{s,Z}^{\text{NC}}$  shows a s-quark loop with one photon vertex (white square) and one fermion vertex (black dot), and one photon vertex (white square).

- Nichtkommutativität  $\theta$  als Spinor zweiter Stufe  $\phi_{AB}$

$$\theta_{A\dot{A},B\dot{B}} = \theta^{\mu\nu} \bar{\sigma}_{\mu,A\dot{A}} \bar{\sigma}_{\nu,B\dot{B}} = \phi_{AB} \epsilon_{\dot{A}\dot{B}} + \bar{\phi}_{\dot{A}\dot{B}} \epsilon_{AB}$$

mit  $(\phi_{AB})^* = \bar{\phi}_{\dot{A}\dot{B}}$  und

$$\phi_{11} = -E_- - iB_-, \quad \phi_{12} = E_3 + iB_3 = \phi_{21}, \quad \phi_{22} = E_+ + iB_+$$

und  $E_{\pm} = E^1 \pm iE^2$ ,  $B_{\pm} = B^1 \pm iB^2$ .

- Kontraktionen als Spinorprodukte

$$(V_1 \theta V_2) = \frac{1}{2} \Re [\langle v_1 v_2 \rangle^* \langle v_1 \phi v_2 \rangle]$$

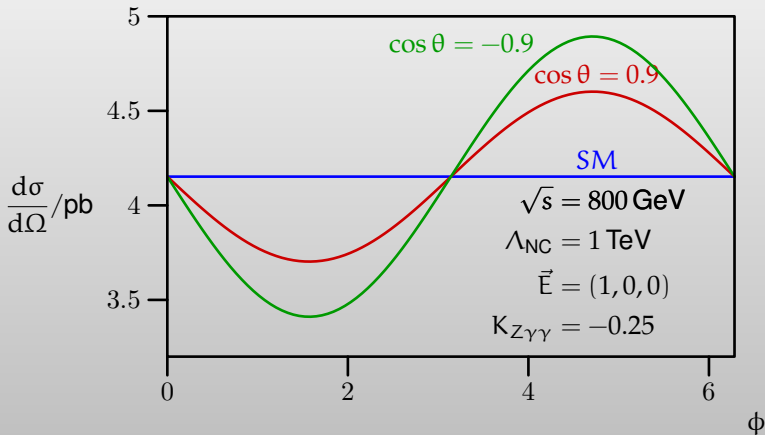
mit  $\langle p \phi q \rangle = \phi_{11} p_2 q_2 + \phi_{22} p_1 q_1 - \phi_{12} (p_1 q_2 + p_2 q_1)$ .

$$A_{u,1}^{(+,-)} = \frac{-e^2 Q_f^2}{\sqrt{2}u} \frac{\langle k_1 p_2 \rangle \langle p_1 k_2 \rangle^*}{\langle p_2 k_1 \rangle^*} \left[ \begin{array}{l} (\epsilon_2 \theta p_1) \langle k_2 p_1 \rangle \langle p_1 p_2 \rangle^* \\ + \sqrt{2} (k_2 \theta p_1) \langle k_2 p_2 \rangle^* \end{array} \right]$$

$$A_{u,1}^{(-,+)} = 0$$

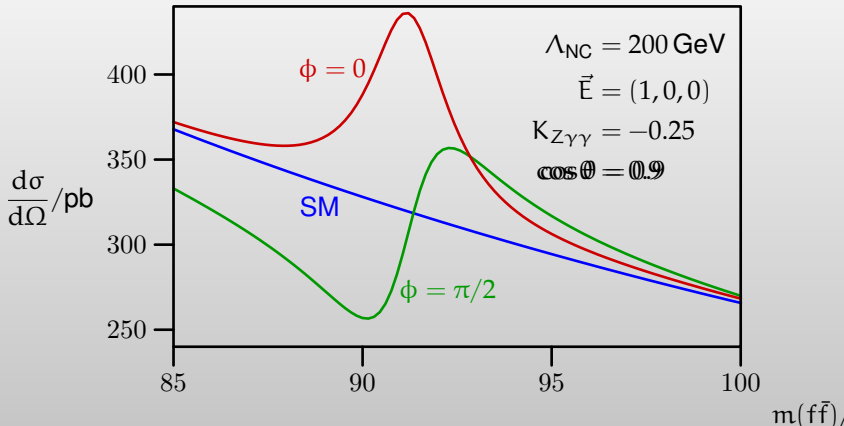
...

Differentieller Wirkungsquerschnitt hängt im NCSM vom Azimutwinkel  $\phi$  ab:



$\theta^{\mu\nu}$  zeichnet Richtungen  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  aus  $\implies$  keine Rotationsinvarianz!

## Z-Boson im s-Kanal als Interferenz

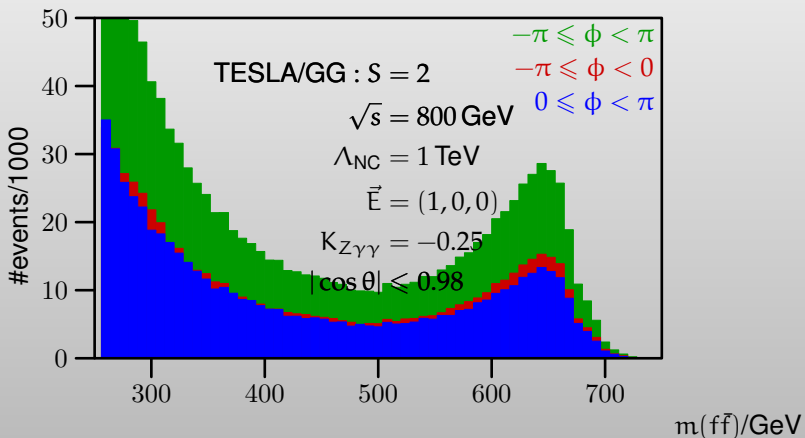


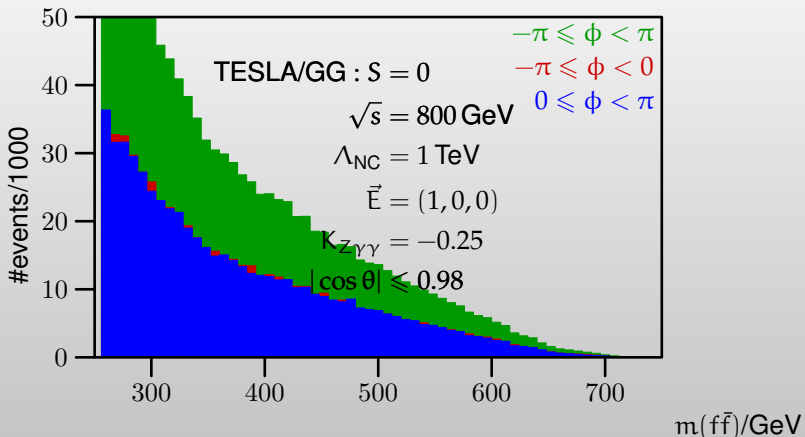
zu großer Untergrund in  $\gamma\gamma \rightarrow f\bar{f}$



Diplomarbeit: gekreuzter Kanal  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  in **LEP1** Daten oder bei **Giga-Z @ ILC** (vgl. [Kaminski, Diplomarbeit])

Anzahl der Ereignisse in den Halbkugeln  $\phi < 0$  und  $\phi > 0$  für  $\sqrt{s} = 800$  GeV

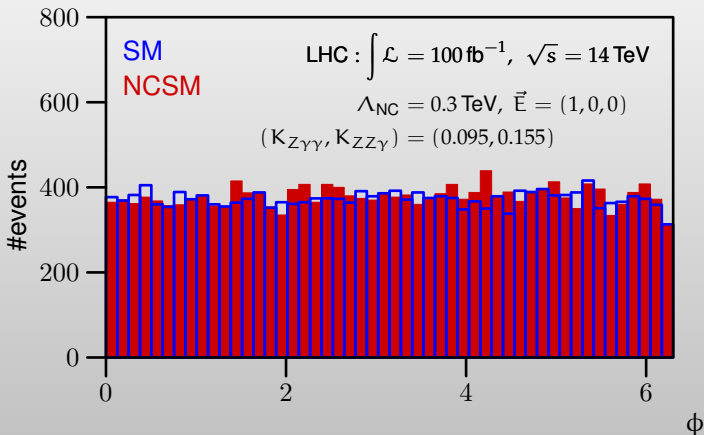




☹️ kein Signal im Higgs-freundlichen  $S = 0$  Modus ...



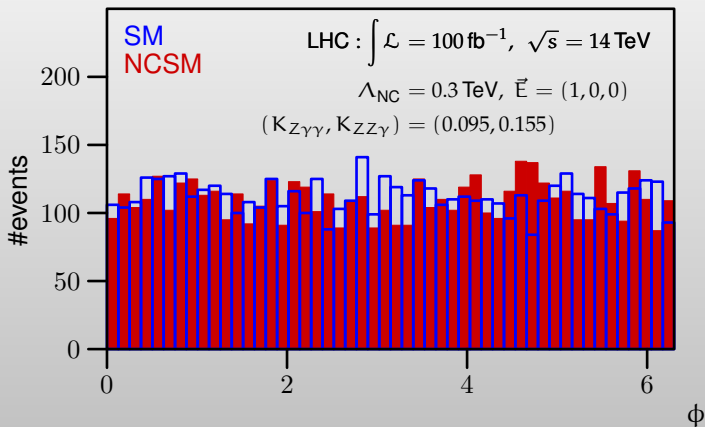
Nur **Akzeptanzschnitte**, Effizienzen wie bei Tevatron sowie  
 $85 \text{ GeV} < m_{e^+e^-} < 97 \text{ GeV} \wedge 200 \text{ GeV} < m_{e^+e^-\gamma} < 1 \text{ TeV}$ :



kein Effekt, trotz unrealistisch kleinem  $\Lambda_{\text{NC}}$ !

- ▶ Effekte vorwiegend **antisymmetrisch** in  $\cos \theta_{\gamma}^*$  (CMS der Quarks):

$$\int_{-1}^{+1} \Delta(d\sigma/d\Omega) d\cos\theta \text{ kaum me\ssbar}$$

Schnitt  $0 < \cos \theta_\gamma^* < 0.9$ :

☹️ unzureichend ...

- ▶ **symmetrischer** PP  
Anfangszustand

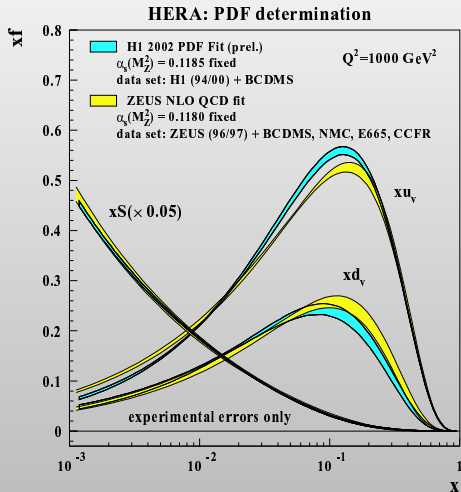
$$\left. \begin{array}{l} q\bar{q} \\ \bar{q}q \end{array} \right\} \rightarrow Z\gamma$$

☹ Schnitt auf  $\cos\theta_\gamma^*$  **sinnlos**  
ohne Trennung von Quarks  
und Antiquarks

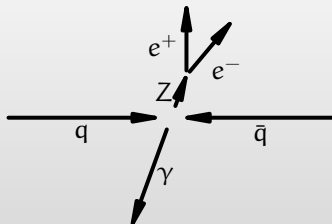
$$\therefore \langle x_q \rangle > \langle x_{\bar{q}} \rangle$$

😊 Ereignisse mit großem  
Longitudinalimpuls  
bevorzugen  $q\bar{q} \rightarrow Z\gamma$

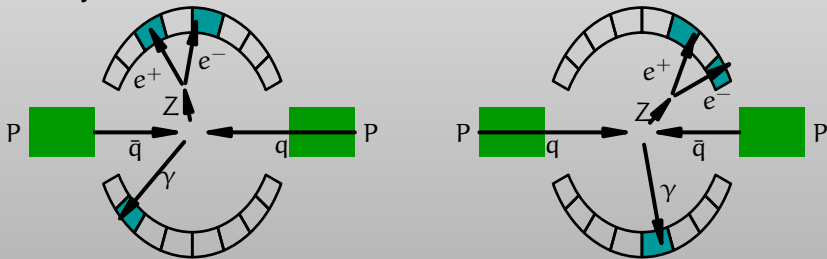
- ▶ Schnitt  
 $\cos\theta_Z > 0 \wedge \cos\theta_\gamma > 0?$



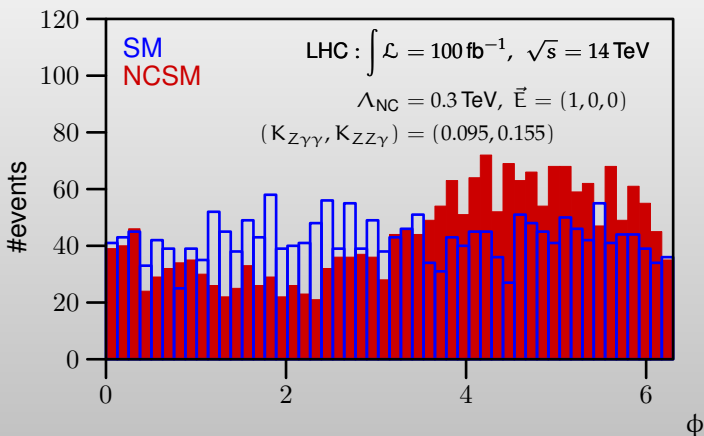
- Schwerpunktssystem der Quarks und Antiquarks:



- Laborsystem:



Schnitte  $\cos \theta_Z > 0 \wedge \cos \theta_\gamma > 0 \wedge 0 < \cos \theta_\gamma^* < 0.9$ :



☺ für kleine  $\Lambda_{\text{NC}}$  **unübersehbar!**

- ▶  $\gamma\gamma \rightarrow f\bar{f}$  hängt im NCSM **nur** von  $E_1$  und  $E_2$  ab  
[T. O./Reuter, PRD70]
- ▶  $f\bar{f} \rightarrow Z\gamma$  wegen axialer Kopplung potentiell reichhaltiger
- ▶ Abhängigkeit von  $\vec{E}$  im Schwerpunktsystem der Quarks numerisch **viel** stärker als von  $\vec{B}$  (mit Ausnahme von  $\cos\theta_\gamma^* = 0$ )
- ▶ Lorentz-Boosts entlang Strahlachse  $x_3$

$$E_1 \rightarrow \gamma(E_1 - \beta B_2)$$

$$B_1 \rightarrow \gamma(B_1 + \beta E_2)$$

$$E_2 \rightarrow \gamma(E_2 + \beta B_1)$$

$$B_2 \rightarrow \gamma(B_2 - \beta E_1)$$

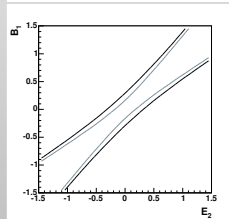
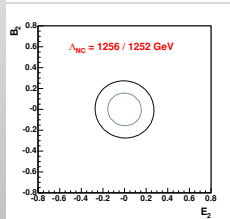
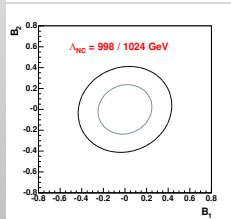
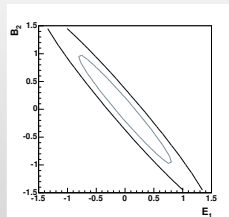
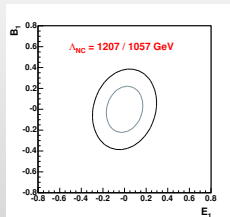
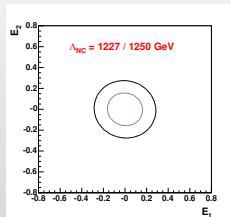
$$E_3 \rightarrow E_3$$

$$B_3 \rightarrow B_3$$

mit  $\beta = v/c$  und  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$

- ▶ Messungen von  $(E_1, B_2)$  und von  $(E_2, B_1)$  korreliert
- ▶ Korrelation durch  $\langle\beta\rangle$  bestimmt

## Likelihood-Fits [Alboteanu/T. O.]:



- ▶ nur die kinematischen Korrelationen von  $(E_1, B_2)$  und  $(E_2, B_1)$

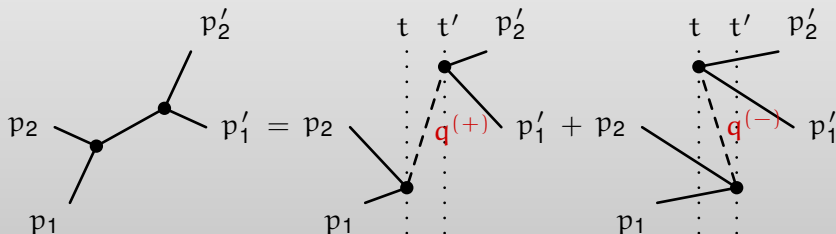


„Theoretische Theorie“

☹ Theorie **nichtlokal** in der Zeit für  $\theta_{0i} \neq 0$

∴ **Unitaritätsverletzung** in Streuamplituden (**optisches Theorem**)

- ▶ Vorschlag [Sibold et al.]: **zeitgeordnete Störungsrechnung**, **explizit unitäre** Zeitentwicklung



- ▶ NB: **alle** Impulse auf der Massenschale

$$q^{(\pm)} = (\pm \sqrt{\vec{q}^2 + m^2}, \vec{q})$$

aber **keine** Energie-Erhaltung an jedem Vertex

- ▶ **Teilchen- und Antiteilchen-Propagator** addieren sich wegen **unterschiedlicher Moyal-Phasen  $\phi(q^{(\lambda)})$**  **nicht** zu **Feynman-Propagator**:

$$\sum_{\lambda=\pm} \frac{e^{i\phi(q^{(\lambda)})}}{2q_0^{(\lambda)}} \frac{\not{q}^{(\lambda)} + m}{q_0 - q_0^{(\lambda)} + \lambda i\epsilon} = \frac{R(q^{(+)}, q^{(-)})}{\not{q} - m + i\epsilon} - \gamma^0 \frac{R_-(q^{(+)}, q^{(-)})}{q_0^{(+)}}$$

mit  $R = \sum_{\lambda=\pm} e^{i\phi(q^{(\lambda)})} (1 + q_0/q_0^{(\lambda)})/2$ ,  $R_{\pm} = (e^{i\phi(q^{(+)})} \pm e^{i\phi(q^{(-)})})/2$

- ▶ z. B.: **Compton-Streuung  $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$**

$k_{\mu}$ 
 $+$ 
 $k_{\mu}$ 
 $+$ 
 $k_{\mu}$ 
 $\neq 0$

- ☹ **Ward-Identität verletzt!** [T. O./Rückl/Zeiner, NPB 676]  
(NB: bei Diplomarbeit gefunden)


- ☹️ explizite Form der Seiberg-Witten-Abbildung in **allen** Ordnungen in  $\theta_{\mu\nu}$  (bis auf weiteres ...) **unbekannt**
- ▶ zweite Ordnung in  $\theta_{\mu\nu}$  wichtig für LHC [Alboteanu/T. O.]
  - ▶ Beobachtung:
    - ▶ Vertizes mit **mehr als 4 Feldern** tragen zu  $2 \rightarrow 2$  erst in höheren Ordnungen bei
  - 😊 breche Potenzreihe der Seiberg-Witten-Abbildung **in  $A_\mu$**  ab und behalte alle Ordnungen in  $\theta_{\mu\nu}$ , z. B.

$$\psi^{[2]} = \frac{1}{2} \theta^{\mu\nu} A_\mu \frac{e^{i \overleftarrow{\partial} \theta \overrightarrow{\partial}} - 1}{i \overleftarrow{\partial} \theta \overrightarrow{\partial}} \partial_\nu \psi$$

- ▶ Vertexfaktoren **verallgemeinerte hypergeometrische Funktionen** statt Phasen
- ☹️ Studium des Hochenergieverhaltens von  $f\bar{f} \rightarrow \gamma\gamma$  in Arbeit [T. O./Zeiner] ...



# Zusammenfassung und Ausblick

- ▶ **Nichtkommutative Geometrie**
    - ▶ durch **Stringtheorie** motiviert
    - ▶ **UV-Regularisierung** der Quantengravitation
  - ▶ **NC-Eichtheorien** (insbes. Standardmodell) mit **\*-Produkt** und **Seiberg-Witten-Abbildung** formulierbar
  - ▶ experimenteller Nachweis bei **LHC** und später bei **ILC** möglich
  - ▶ offene theoretische Fragen
    - ▶ **Unitarität** und Eichinvarianz
    - ▶ **IR/UV-Mixing**  $\Leftrightarrow$  **Renormierungsgruppe**
    - ▶ ...
-  aus Zeitmangel übergangen: Effekte in **Astrophysik** und **Kosmologie**
- ▶ **Neutrino-Photon Kopplungen** im **SM verboten**, im **NCSM** potentiell starke Effekte [T. O./Päs/Reuter, in Vorbereitung]
  - ▶ **nichtkommutative Gravitation**, potentielle Auswirkungen auf Inflation [Koslowski/Niemeyer/T. O., in Vorbereitung]

*While it is never safe to say that the future of Physical Science has no marvels even more astonishing than those of the past, it seems probable that most of the grand underlying principles have been firmly established and that further advances are to be sought chiefly in the rigorous applications of these principles to all the phenomena which come under our notice. It is here that the science of measurement shows its importance—where quantitative results are more to be desired than qualitative work. An eminent physicist has remarked that the future truths of Physical Science are to be looked for in the sixth place of decimals.*

[ALBERT MICHELSON, 1894 (sic!)]

*∴ It's déjà vu all over again!*

[YOGI BERRA]