Supersymmetrie von Streuamplituden und Green–Funktionen in Störungstheorie

Jürgen Reuter

— TU Darmstadt —

⟨reuter@hep.tu-darmstadt.de⟩

10. Juli 2002

1 Motivation 1

- Neue Experimente
- Event–Generation
- Konsistenzchecks

2 Supersymmetrie 4

- Was ist Supersymmetrie?

3 Ward–Identitäten 5

- Definition und Beispiele
- On-shell vs. Off-shell

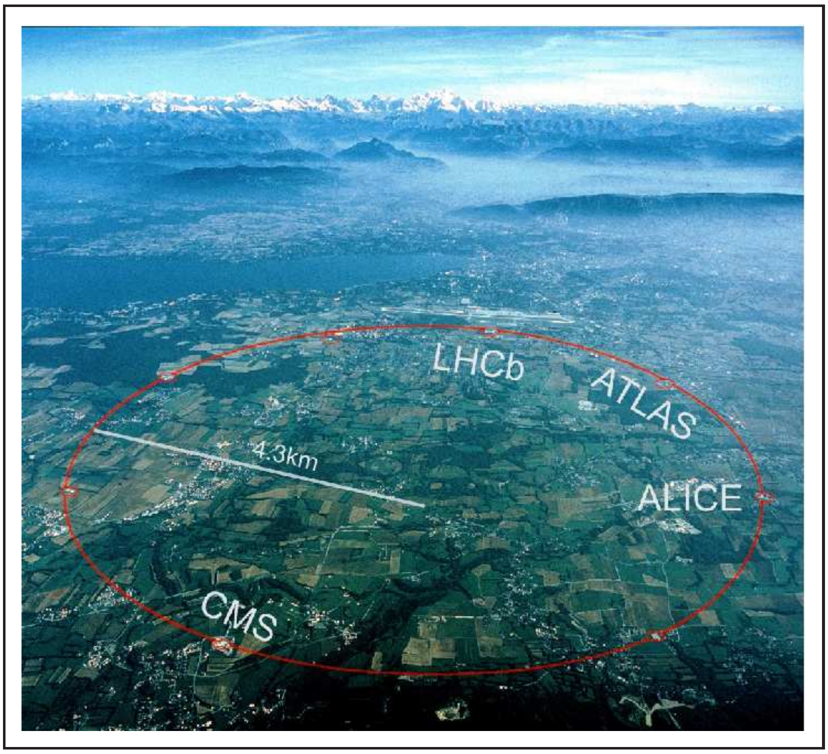
4 Slavnov–Taylor-Identitäten 7

- BRST-Formalismus
- BRST und STI für SUSY
- Ergebnisse

5 Tests und Implementierung 10

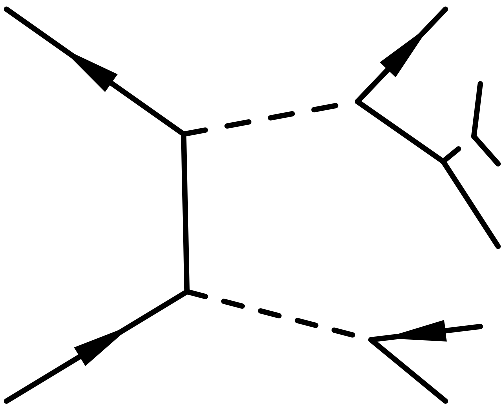
6 Zusammenfassung 11

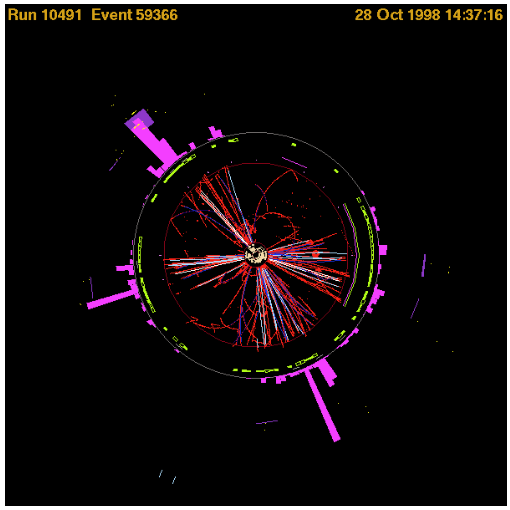
- Neue Generation von Beschleunigern: LHC, TESLA



- Herausforderung des Standardmodells (SM)

Interpretation der Daten erfordert genaue Kenntnis der Modelle alternativ zum SM





Prozesse sehr **komplex**: $10^4 - 10^6$ Feynman–Diagramme
$\Longrightarrow$ Rechnungen müssen automatisiert werden

Ω Matrixelement-Generator *O'Mega* ist *die* Lösung

Idee:

Einbau des MSSM (minimales supersymmetrisches Standardmodell) in *O'Mega* ✓ , *aber:*

Komplexität des MSSM um *1 - 2 Größenordnungen höher* als im SM:

120 unabhängige Parameter, 4300 Vertizes

Konsistenzchecks sind unerläßlich

- **Symmetrien des Modells** $\Longleftrightarrow$ Konsistenz zwischen Kopplungskonstanten, Massen, (Breiten)
- Numerische Stabilität

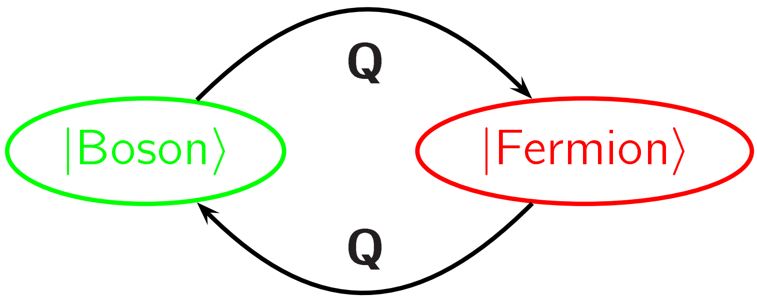
Implementierung erfordert Verständnis, wie Checks *analytisch* funktionieren (Cancellations)

Symmetrien (SUSY/[Eich]) werden auf 2 Arten für Konsistenzchecks genutzt:

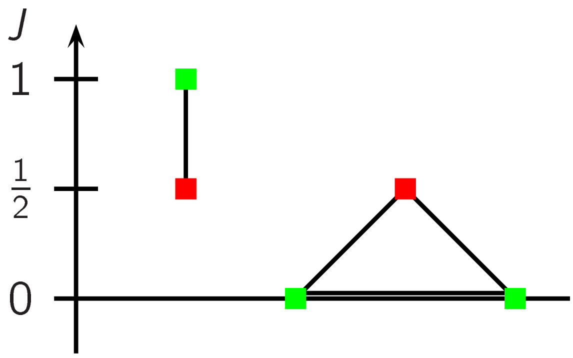
- Ward-Identitäten (SWI)
- Slavnov–Taylor-Identitäten (SSTI)

Supersymmetrie (SUSY)

– ist fermionische Symmetrie mit Spinorladung **Q**:



– Multipletts mit Fermionen *und* Bosonen *gleicher Masse*:



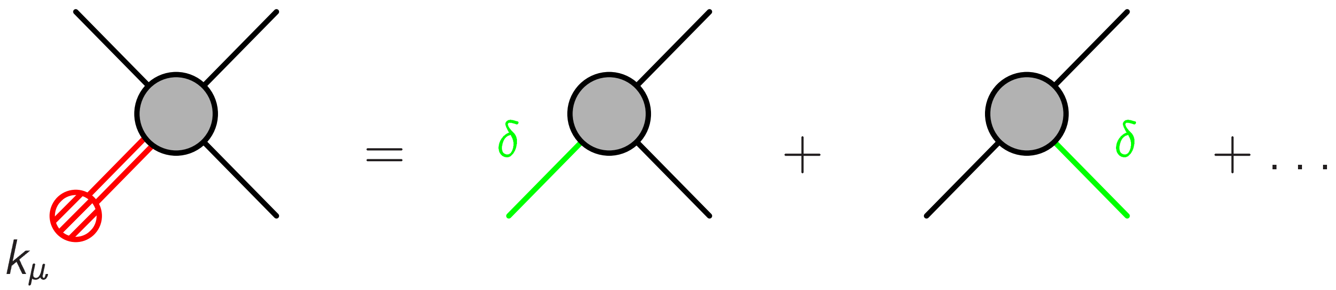
– verknüpft *innere* und *Raumzeit*-Symmetrien

Minimales Supersymmetrisches Standardmodell (MSSM)

- SUSY-Partner: Lepton $\leftrightarrow$ Slepton, Quark $\leftrightarrow$ Squark, Eichboson $\leftrightarrow$ Gaugino, Higgs $\leftrightarrow$ Higgsino
- Bisher *keine* SUSY-Partner gefunden $\Longrightarrow$ SUSY gebrochen
- Brechung verursacht reichhaltige Phänomenologie

Kontinuierliche Symmetrie $\phi \to \phi + \delta\phi \quad \longrightarrow \quad$ erhaltener Strom $\mathcal{J}^\mu$

$$\partial_\mu \langle 0 | \mathrm{T} \, [\mathcal{J}^\mu(x) \phi_1 \ldots \phi_n] | 0 \rangle \quad = \quad \text{Kontakt- (Off-shell) terme}$$



Supersymmetrische Ward-Identität (SWI):

SWI analytisch überprüft. (3-Punkt-Green-funktionen mit Stromeinsetzung)

Modell	on-shell	off-shell
Wess-Zumino	✓	✓
O'Raifeartaigh	✓	✓
U(1)-Eichmodell	✓	↯

Realistische Modelle (SQED, SQCD, MSSM) besitzen Eichsymmetrien.
Zufrieden mit on-shell Tests?

NEIN.

- Off-shell Identitäten liefern stringentere Tests (unphysikalische Zustände, nichttrivialere Relationen)
- Theoretischer Gesichtspunkt: SUSY gebrochen?

Lösung (Sibold et al., 2000): SUSY ist Symmetrie *nur* auf *physikalischem* Hilbertraum $\longleftrightarrow$ $|\text{Off-shell}\rangle$ unphysikalischer Zwischenzustand

Off-shell Tests sind **möglich**:
SUSY BRST-Formalismus $\longleftrightarrow$ Slavnov–Taylor-Identitäten (White, 1991; Sibold et al., 2000)

BRST-Symmetrie (Becchi/Rouet/Stora/Tyutin)

- Quantisierung von (nichtabelschen) Eichtheorien
- *globale* nichtlineare (Rest-)Symmetrie nach Eichfixierung
- FP-Trick: Eichfixierung als neue (unphysikalische) Freiheitsgrade: fermionische Skalare – Geister

Geister sind notwendig für die Unitarität der Theorie in *allgemeiner* Eichung

- $\boxed{[Q_{\mathrm{BRST}}, \phi(x)]_{\pm} = \text{Geist} \cdot \delta\phi(x)}$

Slavnov–Taylor-Identität:

$$\boxed{\langle 0 | \mathrm{T}\,[\,\{Q_{\mathrm{BRST}}, \phi_1\phi_2 \ldots \phi_n\}\,] | 0 \rangle = 0}$$

auch gültig, wenn ϕ *unphysikalisch*, z.B. off-shell

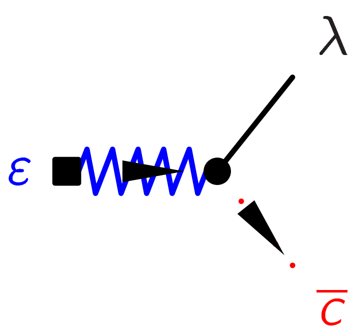
Idee: White, 1991

Gemeinsamer BRST-Formalismus für SUSY *und* Eichsymmetrie.

Neue Geister: **bosonische Spinoren ε**
SUSY global $\Longleftrightarrow$ Geister *konstant*

jetzt: $$[Q_{\text{BRST}}, \phi(x)]_{\pm} = c(x) \cdot \delta_{\text{Eich}}\phi(x) + \varepsilon \cdot \delta_{\text{SUSY}}\phi(x)$$

Diagrammatische Umsetzung, neue Feynman–Regeln:



SUSY-Geist trotz Konstanz Teil der Feynman-Regeln

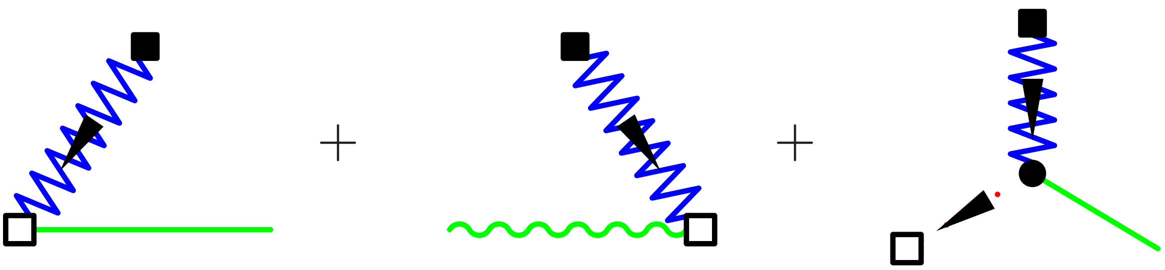
Slavnov–Taylor-Identitäten für SUSY sind **verstanden** – neuer Vertex *eliminiert* eichabhängige Anteile der SUSY-Transformationen

STI analytisch überprüft für U(1)-Modell, SQED, SQCD

Beispiel:

(schematisch, ohne Vorfaktoren)

$$\boxed{\langle 0 | \mathrm{T} \left[\{ Q_{\mathrm{BRST}}, A_\mu(x) \, \lambda(y) \} \right] | 0 \rangle \Big|_{\varepsilon} = 0}$$



$= 0$

Cancellations in SYM **nichttrivial**:

Selbstwechselwirkung der Eichbosonen,

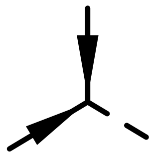
Kopplung der FP-Geister an die Eichbosonen

essentiell

Infrastruktur in *O'Mega*

– Fermistatistik für Majorana- (reelle) Fermionen

– Vertizes mit „clashing arrows"



– numerische Bibliotheken für Vertizes, Propagatoren etc.

– Vertizes für SUSY–Strom $\Longrightarrow$ Gravitino–Prozesse

Numerische Konsistenzchecks

- Konsistenzchecks: $$\boxed{\frac{|\mathcal{G}_1 + \mathcal{G}_2 + \ldots|}{|\mathcal{G}_1| + |\mathcal{G}_2| + \ldots} < \epsilon}$$

- durch systematische Tests subtile Fehler gefunden:
  in numerischen Bibliotheken *und*
  Modell-Implementierungen

Neue Collider erfordern genaue Simulation von MSSM-Prozessen

> **Implementierung** des (allg.) MSSM in *O'Mega* zur Monte-Carlo–Eventgeneration

MSSM komplex $\Longrightarrow$ Konsistenzchecks notwendig

- Analytische Rechnungen für SUSY Ward-Identitäten; *Off-shell in Eichtheorien* **nicht erfüllt**
- SUSY-BRST: diagrammatische SSTI als stringente Tests *off-shell*; analytische Rechnungen (U(1), SQED, SYM)
- Entscheidend: Kopplung SUSY-, FP-Geist, Gaugino

> (S)WI und (S)STI **ideale systematische Konsistenztests** und **Fehlerdetektoren**; in numerischen Tests bewährt

☞ *"Wake up little SUSY"*