

# Neue Physik — Neue Beschleuniger — Neue Software

Thorsten Ohl  
— Universität Würzburg —  
<ohl@physik.uni-wuerzburg.de>

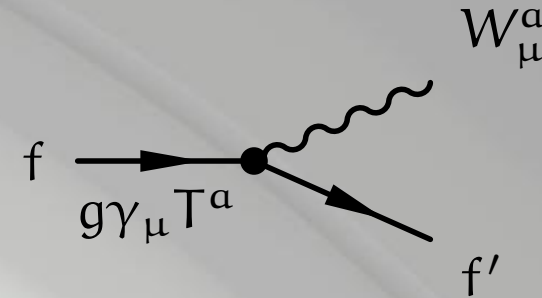
Universität Karlsruhe (TH), 26. November 2003

<b>1 Neue Physik</b> . . . . .	<b>1</b>
○ Orthodoxie ○ Neue Unübersichtlichkeit ○ pQFT	
<b>2 Neue Beschleuniger</b> . . . . .	<b>8</b>
○ Energie und/oder Präzision ○ Anforderungen	
○ Automatisierte Rechnungen ○ Komponenten für Colliderphysik	
<b>3 Neue Software (exemplarisch)</b> . . . . .	<b>12</b>
○ O'Mega, VAMP und WHIZARD ○ Feynmangraphen, DAGs und Keystones ○ Adaptives Monte Carlo ○ Anwendung	
<b>4 Neue Software (systematisch)</b> . . . . .	<b>20</b>
○ Komponentenorientierung ○ Problemzonen ○ Typensysteme	
○ Funktionale Programmierung	
<b>5 Ausblick</b> . . . . .	<b>27</b>
○ „Loops & Legs“ ○ „Terra Incognita“	

1	Neue Physik . . . . .	1
	Orthodoxie . . . . .	1
	Neue Unübersichtlichkeit . . . . .	3
	pQFT . . . . .	6
2	Neue Beschleuniger . . . . .	8
3	Neue Software (exemplarisch) . . . . .	12
4	Neue Software (systematisch) . . . . .	20
5	Ausblick . . . . .	27

Physik bei Energieskalen  $E \lesssim v = 254 \text{ GeV}$ :

- $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  **Eichtheorie**, typisch



- einziger (bekannter) Weg Wechselwirkungen mit **(Pseudo-)Vektorquantenzahlen konsistent** ( $S^\dagger S = 1$ ) zu beschreiben und die **überzähligen Freiheitsgrade** ( $[A_0(x), A_0(y)] = -iD(x-y)$ ) zu **entkoppeln**

- **spontan** durch Kondensat  $\langle \phi \rangle$  zu  $SU_C(3) \times U_Q(1)$  (d. h. QCD  $\times$  QED)

**gebrochen:**  $W_\mu^a$   $\phi$   $\phi$   $W_\nu^b \implies W_\mu^a$   $m^{ab} = g^2 \langle \phi \rangle^\dagger T^a T^b \langle \phi \rangle$   $W_\nu^b$

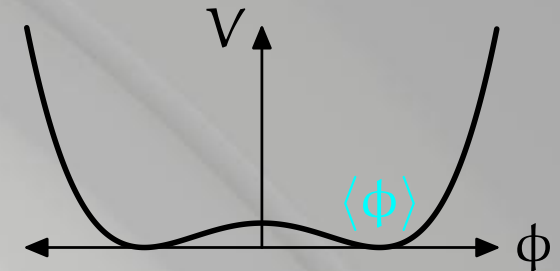
The diagram shows the mass generation for a gauge boson. On the left, a wavy line representing a gauge boson  $W_\mu^a$  is connected to a vertex with two blue dots representing Higgs fields  $\phi$ . An arrow points to the right, where the same wavy line is connected to a vertex with a black hexagon, representing the mass term  $m^{ab} = g^2 \langle \phi \rangle^\dagger T^a T^b \langle \phi \rangle$ . The resulting gauge boson is labeled  $W_\nu^b$ .

- d. h. die definierenden **Symmetrien** der Theorie bleiben bei hohen Energien erhalten, aber der Grundzustand kann bei niedrigen Energien nicht transformiert werden (vgl. Phasendrehungen und Ladungserhaltung bei **Supraleitung**, sowie Drehsymmetrie bei **Magnetismus**)

☺ beschreibt **alle** beobachteten Phänomene (sofern sie berechenbar sind)

- 😊 minimale, am Ende des zweiten Jahrtausends populäre und mit LEP-Daten konsistente Realisierung der Symmetriebrechung: **elementares skalares Dublett  $\phi$**  mit Potential

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4!} \cdot (\phi^\dagger \phi - v^2)^2$$



- ☹️ instabil unter **Strahlungskorrekturen**  $\delta m^2 \propto$    $\propto \frac{\lambda}{16\pi^2} \cdot \Lambda_{\text{GUT/Planck}}^2$

$\therefore$  **Supersymmetrie** schützt die skalaren Massen durch eine Beziehung zu den ihrerseits durch chirale Symmetrie geschützten Fermionmassen

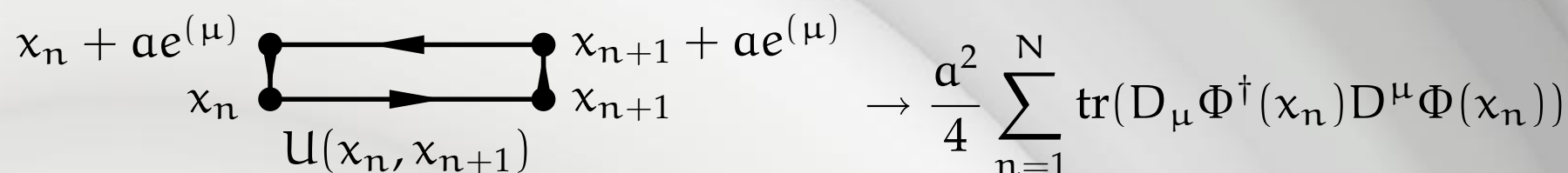
- ☹️ **Häresie Nr. 1:** Herkunft und Dynamik des Kondensats bleiben **ungeklärt**
- ☹️ **Häresie Nr. 2:** Teilchenmassen und Mischungswinkel bleiben **unbestimmte** freie Parameter des Modells ( $N_{\text{params}} = O(120)$ )

En attendant **Godot** Higgs ...

- 😊 NB: falls Godot nicht kommen sollte, werden wir **erst recht** sehr viel lernen!

Im dritten Jahrtausend ist das Bild wieder **reichhaltiger** geworden

- **LEDs** (Large Extra Dimensions), bzw. **Quantengravitation bei wenigen TeV**
- „**Dimensional Deconstruction**“ (Georgi et al.) und „**Little(st) Higgs**“ Modelle
  - zusätzliche Eichwechselwirkungen aus Gitter-regularisierten zusätzlichen Dimensionen mit **Plakettenwirkung** ( $x_{n+1} - x_n$  bleibt endlich!)



$$\begin{array}{ccc}
 x_n + ae^{(\mu)} & \begin{array}{c} \bullet \\ \leftarrow \\ \bullet \\ \rightarrow \\ \bullet \\ \bullet \end{array} & x_{n+1} + ae^{(\mu)} \\
 x_n & \begin{array}{c} \bullet \\ \leftarrow \\ \bullet \\ \rightarrow \\ \bullet \\ \bullet \end{array} & x_{n+1} \\
 & U(x_n, x_{n+1}) &
 \end{array}
 \rightarrow \frac{a^2}{4} \sum_{n=1}^N \text{tr}(D_\mu \Phi^\dagger(x_n) D^\mu \Phi(x_n))$$

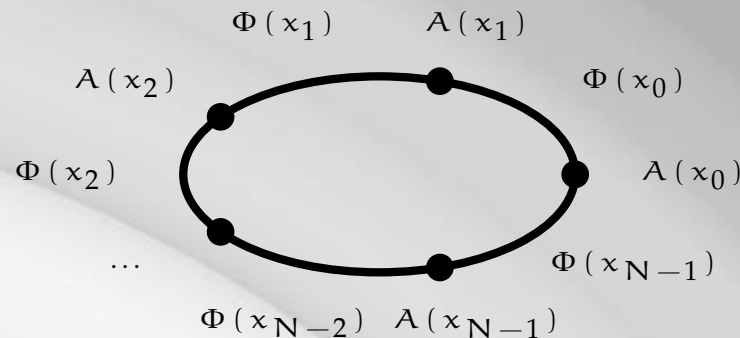
mit  $\Phi(x_n) = U(x_n, x_{n+1})$  und

$$D_\mu \Phi(x_n) = \partial_\mu \Phi(x_n) + iA_\mu(x_n)\Phi(x_n) - i\Phi(x_n)A_\mu(x_{n+1})$$

- ☺ als geeichtes **nichtlineares  $\sigma$ -Modell** für spontane Symmetriebrechung ausführlich untersucht

- „Dimensional Deconstruction“ und „Little(st) Higgs“

– Summe der  $\sigma$ -Modelle



– Translationsinvarianz in den zusätzlichen Dimensionen (diskrete Fouriertransformation)

$$\delta m_{1\text{-loop}}^2 \propto \frac{\lambda}{16\pi^2} \underbrace{\sum_{n=0}^{N-1} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}_{=0} \Lambda^2 + \frac{\lambda}{16\pi^2} \ln \Lambda = \frac{\lambda}{16\pi^2} \ln \Lambda$$

– minimale Variante: eine versteckte globale  $SU(5)$  Symmetrie (zu  $SO(5)$  gebrochen), so daß Massenterme 1-loop verboten sind

- **Nicht-kommutative Quantenfeldtheorie** (bzw. QFT auf nicht-kommutativen Räumen:  $[x_\mu, x_\nu] = i\theta_{\mu\nu}$ )

$$(fg)(x) = f(x)g(x) \rightarrow (f * g)(x) = f(x) e^{\frac{i}{2} \overleftarrow{\partial}^\mu \theta_{\mu\nu} \overrightarrow{\partial}^\nu} g(x)$$

liefert ungewöhnliche Vertexfaktoren:  $e^{\frac{i}{2} k^\mu \theta_{\mu\nu} k^\nu}$

- interessante Verallgemeinerung konventioneller QFTs mit **reichhaltigeren Symmetrien**: **innere Symmetrien** und **Raumzeitsymmetrien** vertauschen **nicht!**
- (vermuteter) Grenzfall der **M-Theorie** (Superstrings und Quantengravitation)

Gemeinsames Motiv:

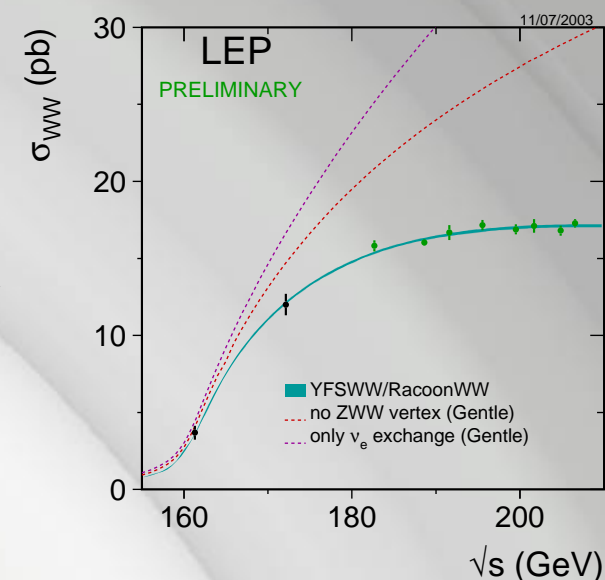
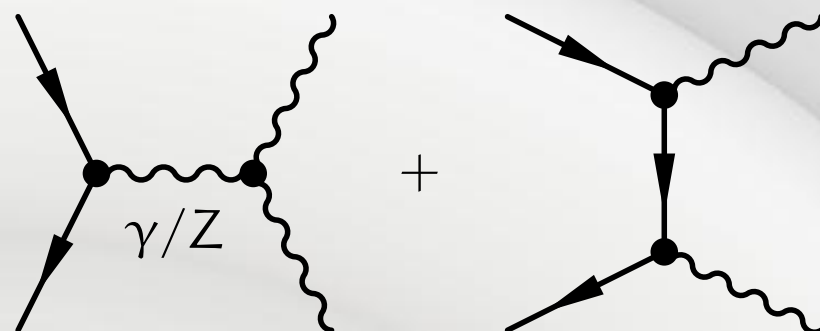
- **Symmetrien**
  - **Phänomenologie** der Wechselwirkungen
  - „**Zähmung**“ der **Quantenkorrekturen**

**Unabhängig** von zukünftigen Entwicklungen auf dem Gebiet von String-Theorie und Quantengravitation:

- **perturbative lokale Quantenfeldtheorie (pQFT)** bleibt als Methode **das** Bindeglied zwischen Theorie und Experiment
  - ∴ „**langreichweitige**“ Phänomene ( $L \geq 10^{-18}$  m) können **quantitativ** durch eine pQFT (mit geeigneten effektiven Freiheitsgraden) beschrieben werden
  - ∴ eine kombinierte Entwicklung in Schleifen und Energien ist in (fast) allen Energiebereichen gültig (als **effektive Quantenfeldtheorie** für die jeweils geeigneten Freiheitsgrade)
- ∴ effektive QFT wird uns als „**Niederenergie**“ Grenzfall der M-Theorie (Strings und Quantengravitation) erhalten bleiben
- nicht-perturbative Quantenfeldtheorie auf dem Gitter ist erfolgreich für statische Größen, aber noch weit von der Anwendung auf Streuprozesse

☹️ **einzelne** Beiträge zur Störungsreihe (Feynmandiagramme) erhalten die Symmetrien **nicht**

∴ Ergebnis oft das Resultat subtiler Auslöschungen zwischen Beiträgen, inzwischn klassisches Beispiel ist  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ :



☹️ **kleine relative** (numerische und/oder rechnerische) Fehler einzelner Beiträge ergeben **große absolute** Fehler im Endergebnis

∴ **vollständige Rechnungen** nötig, (unvermeidliche) **Teilsummen** müssen **Symmetrien respektieren!**

1	Neue Physik . . . . .	1
2	Neue Beschleuniger . . . . .	8
	Energie und/oder Präzision . . . . .	8
	Anforderungen . . . . .	9
	Automatisierte Rechnungen . . . . .	10
	Komponenten für Colliderphysik . . . . .	11
3	Neue Software (exemplarisch) . . . . .	12
4	Neue Software (systematisch) . . . . .	20
5	Ausblick . . . . .	27

## Energie-„Frontier“

s-Kanal Resonanzen und Zerfallskaskaden

$$m < \sqrt{s}$$

(meist) eindeutig

experimentell und theoretisch  
anspruchsvolle Endzustände

## Präzisions-„Frontier“

Interferenzen und Schleifenbeiträge

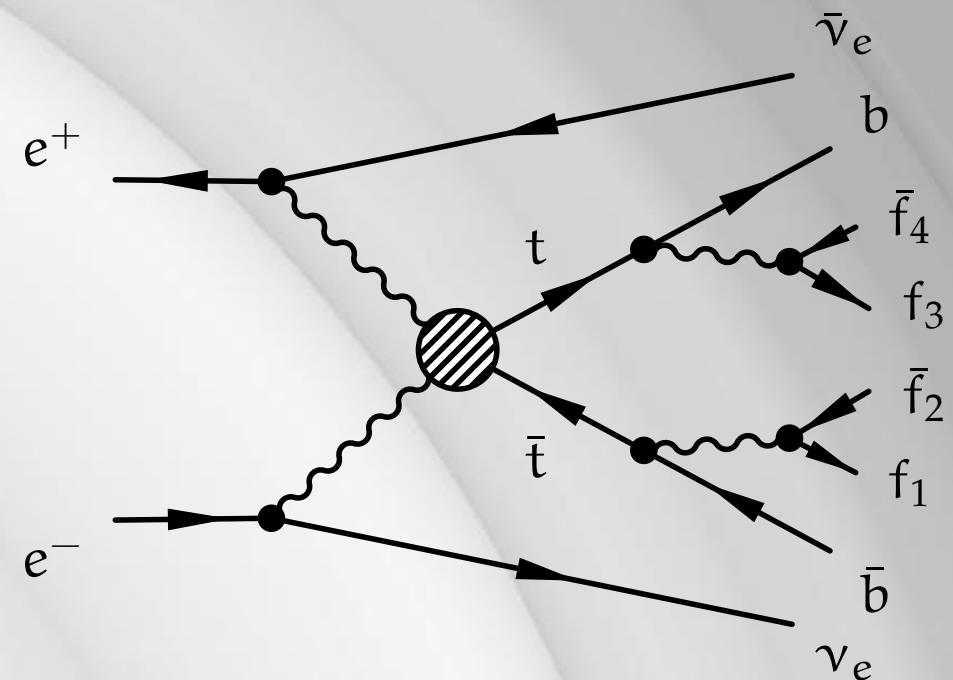
$$\text{auch } m > \sqrt{s}$$

(oft) offen für Interpretationen

hohe Anforderungen an Präzision in  
Theorie und Experiment

Beispiel:

- ∴ das Top-Quark koppelt über seine Masse besonders stark an den symmetriebrechenden Sektor
- ∴ das Studium der  $W^+W^- \rightarrow t\bar{t}$  Wechselwirkung ist wichtig für die Erforschung der EWSB
- ☹ erfordert Kontrolle über  $e^+e^- \rightarrow 8f$  Prozesse



Experimente an **zukünftigen (Linear-)Collidern**:

- werden Endzustände mit **vielen individuell nachweisbaren Teilchen** studieren

∴ benötigen **zuverlässige Vorhersagen und effiziente und zuverlässige Simulationswerkzeuge**

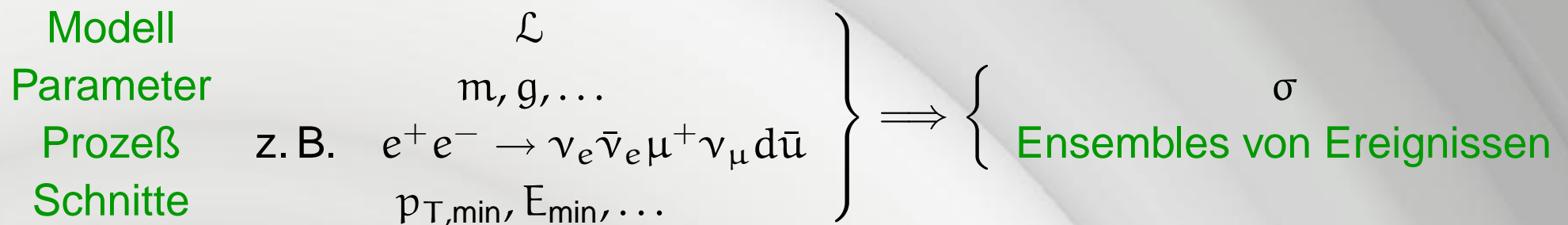
- Studium der elektroschwachen Symmetriebrechung (EWSB) erfordert **eichinvariante** Rechnungen (d. h. im allgemeinen vollständige Rechnungen)
- **Polarisationsinformation** muß berücksichtigt werden

 **qualitativ** komplizierter als bei LEP1

- die Anzahl der Feynmangraphen wächst **kombinatorisch**
- die entsprechenden **algebraischen Ausdrücke** wachsen noch schneller mit der Anzahl der Bausteine (Massen, Energien, Impulse)
- die Feinabstimmung durch die **Eichsymmetrie** wird immer diffiziler
- der **Phasenraum** wird ebenfalls deutlich komplizierter

- ∴ selbst wenn wir genügend Diplomanden, Doktoranden, PostDocs und Juniorprofessoren(?) hätten, sollten wir sie nicht für „Fließbandrechnungen“ verschwenden.
- ∴ Es empfiehlt sich, die repetitiven Teile der Rechnungen so zu **formalisieren**, daß sie **zuverlässig** an „geduldige“ Computer delegiert werden können.

**Vollständig automatisierte Simulationswerkzeuge** in der Teilchenphysik versuchen



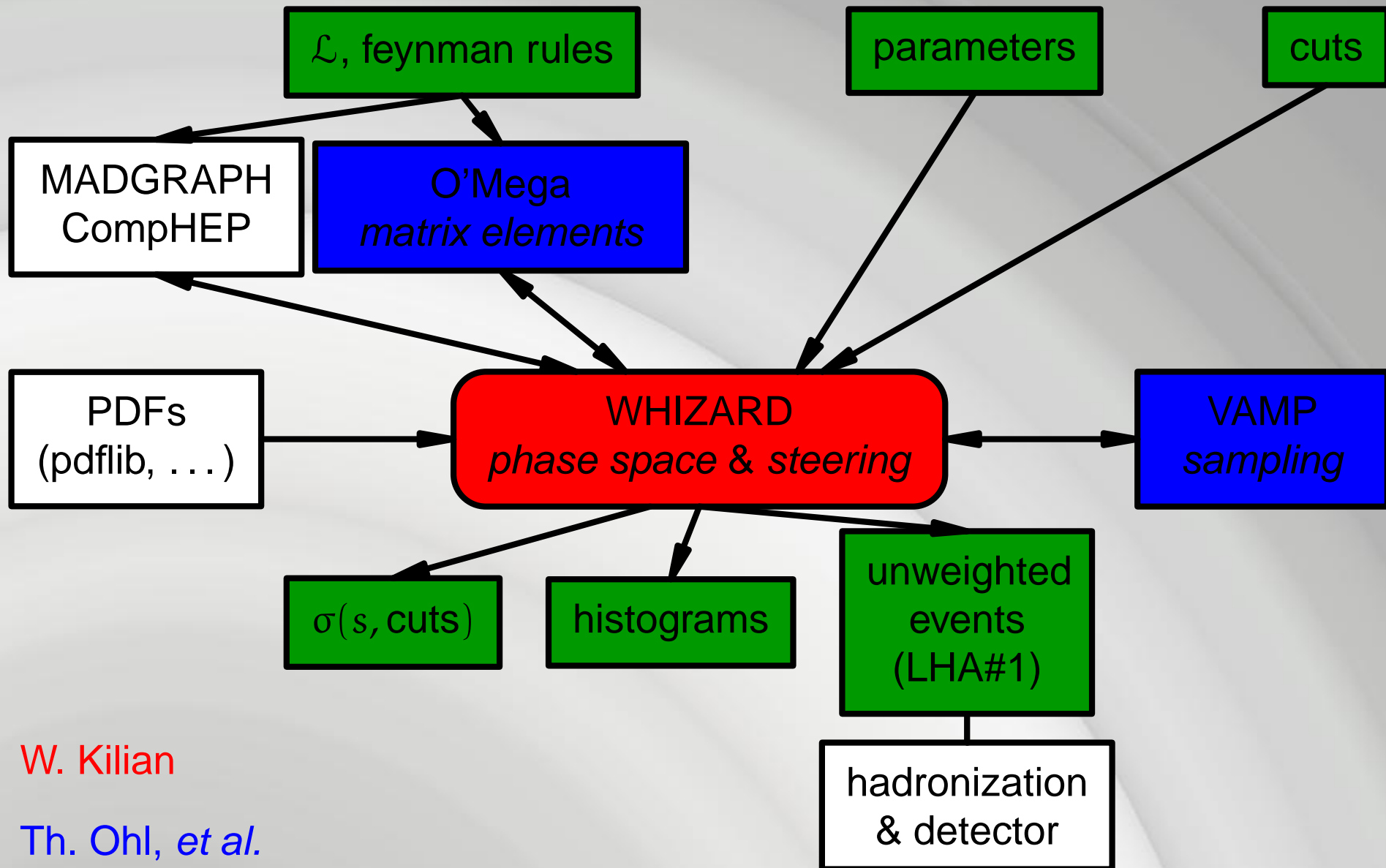
**ohne** (oder mit geringstmöglicher) **Experten-Einwirkung**.

 für **Schleifenrechnungen** mit **vielen Teilchen** liegt noch ein steiniger Weg vor uns (siehe unten)...

- ∴ es gibt noch immer keine vollständige **Einschleifenrechnung** für  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\mu d \bar{u}$  im Standardmodell, nicht einmal manuell

- **Renormierungsgruppenevolution** von der GUT-Skala zur Skala der Experimente ( $\alpha(\mu)$ ,  $m(\mu)$ ,  $\lambda(\mu)$ , ...):
  - Berechnung von **Multiloopdiagrammen** mit **Computeralgebra**
  - **numerische** Lösung von Systemen gewöhnlicher **Differentialgleichungen**
- Berechnung von harten **Streumatrixelementen**
  - Helizitätsamplituden: Baumgraphen, 1-loop, 2-loop, ...
- **Integration** von Wirkungsquerschnitten
  - **adaptive Monte Carlo** Integration, Ereignisgenerierung
- Simulation von **Partonschauern** von Gluonen und Photonen
- Simulation der **Hadronisierung** von Quarks und Gluonen
  - **klassische** stochastische Prozesse
- Support
  - **Partonverteilungen**, Strahlenergiespektren, ...

1	Neue Physik . . . . .	1
2	Neue Beschleuniger . . . . .	8
3	Neue Software (exemplarisch) . . . . .	12
	O'Mega, VAMP und WHIZARD . . . . .	12
	Feynmangraphen, DAGs und Keystones . . . . .	13
	Adaptives Monte Carlo . . . . .	16
	Anwendung . . . . .	19
4	Neue Software (systematisch) . . . . .	20
5	Ausblick . . . . .	27



W. Kilian

Th. Ohl, *et al.*

Die Anzahl der Baumgraphen mit  $n$  äußeren Linien in  $\phi^3$ -Theorie ohne weitere Quantenzahlen wächst **kombinatorisch**

$$F(n) = (2n - 5)!! = (2n - 5) \cdot (2n - 7) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 1$$

$n$	$F(n)$	$P(n)$
4	3	3
5	15	10
6	105	25
7	945	56
8	10395	119
9	135135	246
10	2027025	501
11	34459425	1012
12	654729075	2035

☹ Rechenaufwand noch für viele Jahre völlig unrealistisch

☹ Numerik zerstört subtile Aufhebungen in Eichtheorien

Anzahl der Impulse in Baumgraphen wächst nur exponentiell

$$P(n) = \frac{2^n - 2}{2} - n = 2^{n-1} - n - 1$$

- **empirisch** findet man im Standardmodell  $F^*(n) \propto (C \cdot n)!!$  und  $P^*(n) \propto 10^{n/2}$

∴ Feynmangraphen **redundante** Darstellung für Prozesse mit vielen Teilchen!

Keystones  $K$  erlauben die Summe über alle Feynmandiagramme durch Produkte von Einteilchenwellenfunktionen  $W = \text{F.T. } \langle \text{out} | \phi(x) | \text{in} \rangle$  auszudrücken:

$$T = \sum_{i=1}^{F(n)} D_i = \sum_{k,l,m=1}^{P(n)} K_{f_k f_l f_m}^3(p_k, p_l, p_m) W_{f_k}(p_k) W_{f_l}(p_l) W_{f_m}(p_m) + \text{quartic} + \dots$$

Am Beispiel **CC20**:  $e^+ e^- \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}$  mit mehrfacher Bremsstrahlung:

Prozeß	Graphen		O'Mega	
	#	Vertices	#prop.	Vertices
$e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}$	20	80	14	44
$e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}\gamma$	146	730	36	151
$e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}\gamma\gamma$	1112	6672	94	468
$e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}\gamma\gamma\gamma$	12420	86940	168	1246
$e^+ \bar{\nu}_e d\bar{u}\gamma\gamma\gamma\gamma$	138816	1110528	344	3746

sieht man die Ersparnis im Rechenaufwand im **Verhältnis der Anzahl der zu berechnenden Vertices**.

Auch für Vektorteilchen sind die Wellenfunktionen „**beinahe**“ physikalische Objekte und erfüllen **einfache Ward-Identitäten**

$$\frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle \text{out} | A_\mu(x) | \text{in} \rangle_{\text{amp.}} = 0$$

bzw. für spontan gebrochene Eichtheorien in  $R_\xi$ -Eichung

$$\frac{\partial}{\partial x_\mu} \langle \text{out} | W_\mu(x) | \text{in} \rangle_{\text{amp.}} = \xi_W m_W \langle \text{out} | \phi_W(x) | \text{in} \rangle_{\text{amp.}} \cdot$$

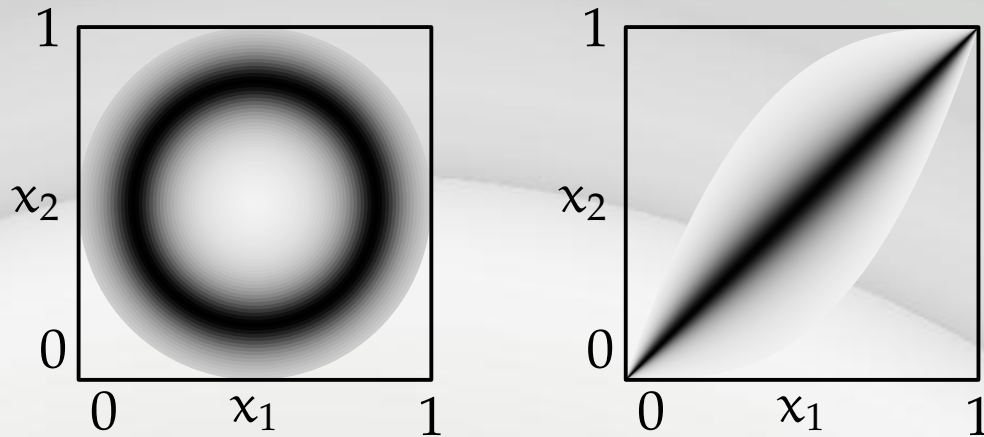
😊 O'Mega kann die erzeugten Programme für die Streuamplituden mit numerischen Tests der Ward-Identitäten **instrumentieren** und so sowohl **Konsistenz** als auch **numerische Stabilität** überprüfen.

Von der Massenschale fortgesetzte Streuamplituden erfüllen kompliziertere Gleichungen, weil Kontaktterme nicht verschwinden:

😊 **Slavnov-Taylor-Identitäten** können auch numerisch getestet werden, weil **Operatoreinsetzungen** für BRST-Transformationen unterstützt werden

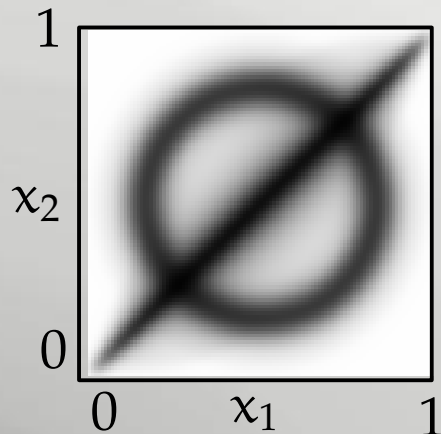
Analoge Konsistenztests auch aus Ward-Identitäten für **Supersymmetrie**.

VEGAS' Faktorisationsansatz paßt auf



nach Koordinatentransformationen.

☹ aber ungeeignet für sich überlagernde Singularitäten



was der typische Fall für die Teilchenphysik ist

∴ adaptives Mehrkanalverfahren

$$\begin{aligned}
 I(f) &= \int_{\mathcal{M}} d\mu(p) f(p) \\
 &= \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_i \int_0^1 g_i(x) d^n x \frac{f(\phi_i(x))}{g(\phi_i(x))}
 \end{aligned}$$

mit

$$g = \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_i \cdot (g_i \circ \phi_i^{-1}) \left| \frac{\partial \phi_i^{-1}}{\partial p} \right|$$

😊 funktioniert mit faktorisierten  $g_i$  die von VEGAS angepaßt werden und die  $\alpha_i$  können ebenfalls numerisch adaptiert werden.

- ☺ im Allgemeinen **faktoriert**  $g \circ \phi_i$  **nicht**, auch wenn alle  $g_i$  faktorisieren.
  - $\pi_{ij} = \phi_j^{-1} \circ \phi_i$ : Transformationen zwischen den Koordinatensystemen in denen die einzelnen Singularitäten faktorisieren.
- ☺ reine Geometrie: **ressourcenschonende** Untersuchungen der Abhängigkeit von **Parametern** und **kinematischen Schnitten**
  - ∴ die  $\pi_{ij}$  sind **universell** und ein geeigneter Satz kann automatisch (z. B. von **WHIZARD**) ausgewählt werden
  - ∴ **VEGAS** kann anschließend die  $g_i$  und  $\alpha_i$  für jeden Parametersatz selbstständig numerisch optimieren

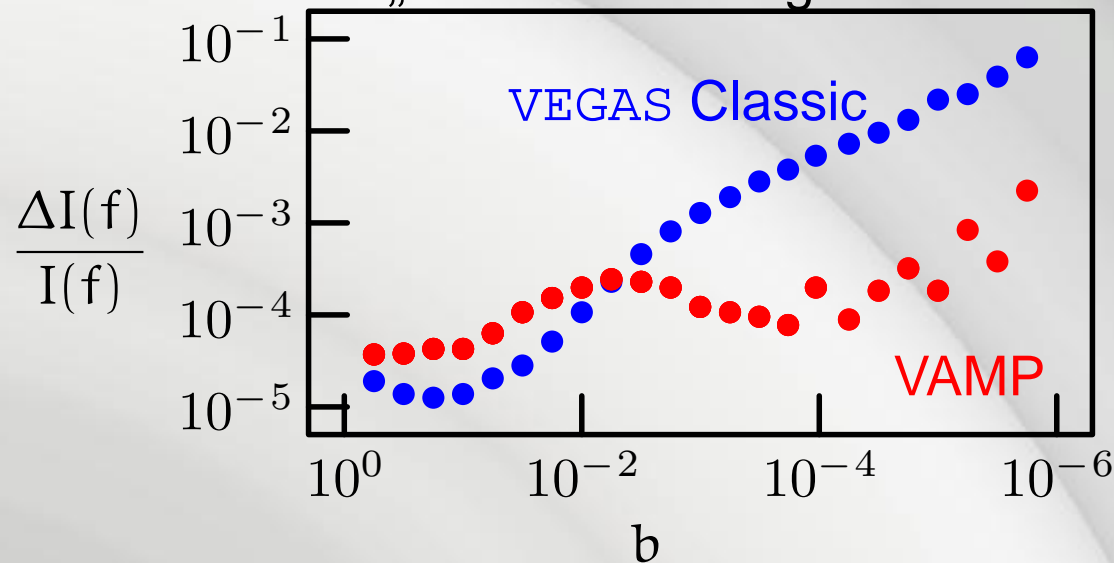
VAMP → Vegas **AMP**lified →

- **anisotropy**: unterschiedlich starke Fluktuationen in verschiedenen Richtungen
- **multi-channel sampling**: dramatische Verbesserung gegenüber VEGAS in der Behandlung von nicht-faktorisierenden Singularitäten
- **parallelization**: effiziente und **völlig transparente** Nutzung von Rechnerfarmen und des „**Grids**“ für Präzisionssimulationen

Beispiel (normierte Lorentz-Verteilung um Kugelschale, Zylinderschale und Ebene):

$$f(\mathbf{x}) = \frac{b}{144 \operatorname{atan}(1/2b)} \left( \frac{3\pi\Theta(r_3 < 1)}{r_3^2((r_3 - 1/2)^2 + b^2)} + \frac{2\pi\Theta(r_2 < 1, |x_3| < 1)}{r_2((r_2 - 1/2)^2 + b^2)} + \frac{\Theta(-1 < x_1, x_2, x_3 < 1)}{x_1^2 + b^2} \right)$$

Integrationsfehler als Funktion der „Breite“  $b$  für vergleichbare Rechenzeit:

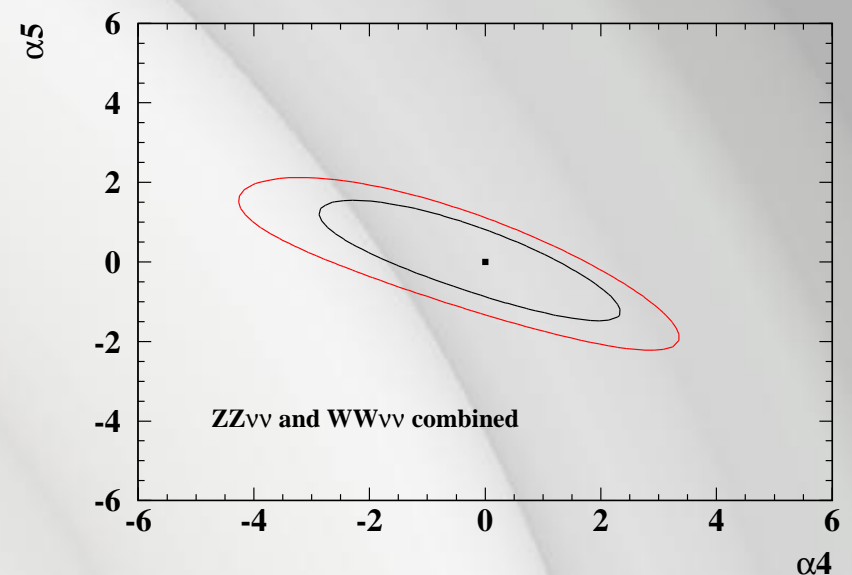
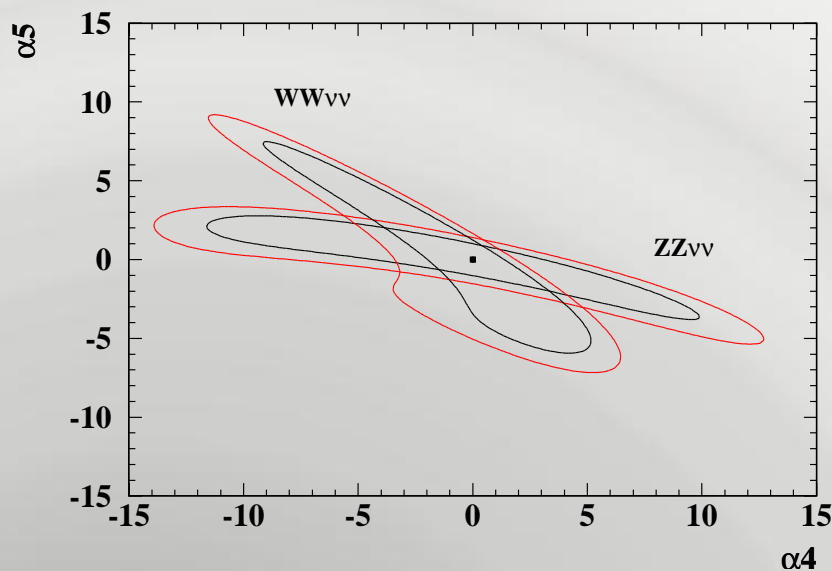


zwei Größenordnungen in der Genauigkeit entsprechen vier Größenordnungen in der Geschwindigkeit!

Erste vollständige experimentelle Simulation von  $e^+e^- \rightarrow 6f$  mit **WHIZARD** und **O'Mega** für den **Tesla TDR** (Chierici, Rosati & Kobel (CERN & Bonn)):

$$\mathcal{L}_4 = \frac{\alpha_4}{16\pi^2} \left( \frac{g^4}{2} \left( (W_\mu^+ W^{-,\mu})^2 + W_\mu^+ W^{+,\mu} W_\mu^- W^{-,\mu} \right) \right. \\ \left. + \frac{g^4}{\cos^2 \theta_w} W_\mu^+ Z^\mu W_\nu^- Z^\nu + \frac{g^4}{4 \cos^4 \theta_w} (Z_\mu Z^\mu)^2 \right)$$

$$\mathcal{L}_5 = \frac{\alpha_5}{16\pi^2} \left( g^4 (W_\mu^+ W^{-,\mu})^2 + \frac{g^4}{\cos^2 \theta_w} W_\mu^+ W^{-,\mu} Z_\nu Z^\nu + \frac{g^4}{4 \cos^4 \theta_w} (Z_\mu Z^\mu)^2 \right)$$



1	Neue Physik . . . . .	1
2	Neue Beschleuniger . . . . .	8
3	Neue Software (exemplarisch) . . . . .	12
4	Neue Software (systematisch) . . . . .	20
	Komponentenorientierung . . . . .	20
	Problemzonen . . . . .	21
	Typensysteme . . . . .	22
	Funktionale Programmierung . . . . .	25
5	Ausblick . . . . .	27

**Monolitische** Softwarearchitektur für LHC und LC unrealistisch:

- ∴ Aufgabe zu umfangreich für eine **einzelne** Arbeitsgruppe
- ∴ „**world experts**“ für die Komponenten sind geographisch verteilt
- ∴ streng hierarchische Organisation über Universitätsgrenzen funktioniert mit Theoretikern nicht (z. B. Autorenschaft und **Publikationen** für Teilsysteme)
- ∴ Zerlegung der Software in (heterogene) **Komponenten**
  - (möglichst) gemäß bestehender wissenschaftlicher **Kompetenzen**
  - mit **wohldefinierten Schnittstellen**
- ☹ viele existierende Beispiele für Schnittstellen sind **ad-hoc**
  - „**Les Houches Accords**“ (Partonschauer, PDFs, SUSY)
    - 😊 Schritte in die richtige Richtung
    - ☹ physikalisch noch **unvollständig**

- Protokolle zum **Vermeiden von Doppeltzählen** noch unterentwickelt, z. B.
  - **Partonschauer** und **Schleifenkorrekturen im Matrixelement**, schematisch

$$d\sigma = \underbrace{\sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \cdot PS^{\otimes n}}_{\text{Partonsschauer}} \otimes d\sigma_0 + \underbrace{\alpha \cdot d\sigma_1}_{\text{Matrixelement}} - \alpha \cdot PS^* \otimes d\sigma$$

- ☹️ Bestimmung des gemeinsamen Anteils erfordert detaillierte Kenntnis der verwendeten Schnitte etc.
  - analog: **Renormierungsgruppenlogarithmen** und **Schleifenkorrekturen im Matrixelement** enthalten gemeinsame Anteile
  - Idealzustand (nicht erreicht):
    - \* Code für Kopplungskonstanten bietet eine **vollständige** Definition des Renormierungsschemas
    - \* Code für Matrixelemente kann zwischen Schemata wählen
- 😊 erfordert präzisere **Formalisierung** des theoretischen Rahmens

Eine Abbildungsvorschrift wie

$$f : x \mapsto x^2$$

genügt **nicht**, um eine mathematische Funktion  $f$  eindeutig zu definieren. Drei Beispiele für Funktionen mit der gleichen Abbildungsvorschrift und **sehr unterschiedlichen Eigenschaften** sind

- **injektiv**, nicht surjektiv:

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{N}} : \mathbf{N} &\rightarrow \mathbf{N} \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned}$$

- stetig differenzierbar, **surjektiv**, nicht injektiv:

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{R}} : \mathbf{R} &\rightarrow [0, \infty) \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned}$$

- analytisch, **bijektiv**:

$$\begin{aligned} f_{\mathbf{C}} : \mathbf{C} &\rightarrow \mathbf{C} \text{ (2 Riemann-Blätter)} \\ x &\mapsto x^2 \end{aligned}$$

Was für die meisten Physiker eine **mathematische Spitzfindigkeit** aus der Grundvorlesung ist, ist für Software entscheidend:

- die **physikalische Darstellung** der Daten (Bitfolge) hängt vom Typ ab
- die Abbildungsvorschrift muß für **alle** Werte aus dem Definitionsbereich **wohldefiniert** sein!
  - typisches Beispiel: **Theoretiker** glaubt **zu wissen, daß alle wissen**, daß ein Parameter  $\lambda = O(1/(16\pi^2))$  ist, **Experimentalphysiker** probiert  $\lambda = O(1)$  aus und findet im negative Wirkungsquerschnitte oder Schlimmeres ...
- ☹️ solche Probleme können für kleine Systeme durch Selbstdisziplin und „social engineering“ behandelt werden, wachsen aber **sehr** schnell für große Systeme
- numerische Parameter können in der Praxis nur durch **Laufzeittests** (z. B.  $|\lambda| \leq 10/(16\pi^2)$ ) überprüft werden
- 😊 für algebraische Parameter kann oft von geeigneten Compilern **bewiesen** werden, daß **nie** illegale Parameter übergeben werden: **Typensysteme**.

- Compiler kann für frei beliebige endliche **frei erzeugte Typen** beweisen, daß eine Funktion **total** ist. Ein triviales Beispiel aus **O'Mega**

```

let stat_fuse s1 s2 f =
  match s1, s2 with
  | Boson l1, Boson l2 -> Boson (l1 @ l2)
  | Boson l1, Fermion (p, l2)
  | Fermion (p, l1), Boson l2 -> Fermion (p, l1 @ l2)
  | Boson l1, AntiFermion (p, l2)
  | AntiFermion (p, l1), Boson l2 -> AntiFermion (p, l1 @ l2)
  | AntiFermion (pbar, l1), Fermion (p, l2)
  | Fermion (p, l1), AntiFermion (pbar, l2) ->
    Boson ((Some pbar, Some p) :: l1 @ l2)
  | Fermion _, Fermion _ | AntiFermion _, AntiFermion _ ->
    invalid_arg "Lagrangian has fermion number <> 0"

```

Ohne die letzte Alternative meldet der Compiler, daß die Funktion `stat_fuse` für  $s_i \in \{\text{Boson}, \text{Fermion}, \text{AntiFermion}\}$  nicht total sei.

- ☹ NB: die Bedingung, daß die Fermionzahl verschwindet, entspricht **nicht** einem frei erzeugten Typ und erzwingt eine Ausnahmebedingung.

## Programmierparadigmen

- **imperativ:**
  - Programme strukturiert als Abfolge von **Befehlen** zur Manipulation von **Variablen**
  - **Fortran77, C, ...**
- **objektorientiert:**
  - Programme strukturiert als Wechselwirkung von **Daten** und **Zustandsänderungen**
  - **C++, Java, ...**
- **funktional:**
  - Programme strukturiert als Hintereinanderausführung von Funktionen, **Rekursion** statt Iteration, **keine Variable**
  - **ML, Scheme, ...**

- **Objektorientierung** **ideal** zur Modellierung von **Experimenten** der Hochenergiephysik:
  - Apparative Komponenten lassen sich natürlich auf Objekte abbilden
- **Funktionale Programmierung** mächtiges Werkzeug für **theoretische Anwendungen**:
  - **Korrektheitsbeweise** nur für kleine Funktionen ohne Nebeneffekte praktikabel
  - ☺ **Semantik** einer funktionalen Programmiersprache kann **knapp und vollständig** definiert werden
  - ☺ **Funktionsauswertungen** ohne Nebeneffekte **kommutieren**: transparente Parallelisierung (z. B. **VAMP** in **Fortran95**)
  - ☺ Compiler können mächtige Typensysteme (Hindley-Milner) unterstützen
- **keine** Frage der Programmiersprache **du jour**, aber idiomatische Sprachen helfen bei der Erweiterung des Horizontes.
- ☺ funktionale Programmiersprachen sind gutes Lehrmaterial, weil sie für fast alle Studenten neu sind ...

1	Neue Physik . . . . .	1
2	Neue Beschleuniger . . . . .	8
3	Neue Software (exemplarisch) . . . . .	12
4	Neue Software (systematisch) . . . . .	20
5	Ausblick . . . . .	27
	„Loops & Legs“ . . . . .	27
	„Terra Incognita“ . . . . .	28



- Prinzipien für Rechnungen mit vielen **äußeren Linien** gut verstanden:
  - **MADGRAPH, ALPHA**, etc.
  - **O'Mega** (gegenwärtig am schnellsten und flexibelsten)
- Rechnungen mit 3- und 4-Schleifen für statische Größen, Selbstenergien,  $\beta$ -Funktionen usw. mit wenigen Massenskalen oder als Massenentwicklung

☹️ Rechnungen mit mindestens einer Schleife **und** mindestens 6 äußeren Linien im Standardmodell stellen aus praktischen Gründen mit der gegenwärtigen „Technologie“ (**Tensorreduktion** und Rückführung auf **Masterintegrale** und spezielle Funktionen) die äußerste Grenze dar:

- formal kann die Streuamplitude berechnet werden ...
- ... aber der Ausdruck ist so komplex, daß **keine Aussagen über die numerische Präzision** mehr möglich sind

Hier verstärken sich zwei Probleme gegenseitig:

1. **kombinatorische** Komplexität der Feynmangraphen
  2. analytische Schwierigkeit, **Integrale mit vielen schwach separierten Skalen** (d. h. ohne Hierarchie) zu berechnen.
- ∴ Entwicklung neuer Methoden zur **Komplementierung** der gegenwärtigen Methoden erforderlich

**Numerische** Ansätze gewinnen in jüngerer Zeit zunehmend an Interesse, z. B.

- **Passarino**: numerischer Zugang zu Zwei-Schleifen-Integralen mit mehreren Skalen
  - interessante **Umkehrung** der **Tensorreduktion**: Kombination in **numerisch stabile Ausdrücke** anstelle Zerlegung in analytisch einfache Ausdrücke
- **Soper, Krämer**: numerische Auswertung geschnittener Diagramme
- **TO, Kilian** (Helmholtz-Projekt, gerüchteweise bewilligt . . . ):
  - $n$ -Teilchen-Phasenraum hat  $3n - 4$  Dimensionen
  - der 14-dimensionale 6-Teilchen-Phasenraum kann schon heute (mit **VAMP**) **vollautomatisch** behandelt werden

∴ weitere vier Dimensionen aus einer numerischen Schleifenintegration stellen **kein** unüberwindliches Problem dar — sofern der Integrand in „**hinreichend regulärer Form**“ geschrieben werden kann

  - \* Zerlege  $d^4k$  in Phasenraum  $\times$  offshellness und subtrahiere den Integranden so, daß **Slavnov-Taylor-Identitäten** erfüllt sind

*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]