

	<u>EM</u>	schwache	starke	G	①
Kraft					
reichweite	$\infty$	$10^{-16}$ cm	$10^{-13}$ cm	$\infty$	
stärke	$\frac{1}{137}$	$\approx \frac{1}{30}$	$\approx 1$	$\approx 10^{-38} \frac{E^2}{m_p^2}$	
teilchen	photon	W und Z	gluons	gravitron	
masse	0	$\approx 100 m_p$	0 oder $m_p$	0	

Parität ist die Symmetrie bei der man das Vorzeichen alle Raumkoordinaten ändert.

Helizität ist die Komponente des Spins in Richtung der Bewegung.

Spin in Bewegungsrichtung  $\rightarrow$  Rechtshändigkeit

Spin entgegengesetzt zu Bewegungsrichtung  $\rightarrow$  Linkshändigkeit

Paritätsverletzung - unterschiedliche Wirkung auf Rechts- und Linkshändigen Teilchen.

Massive Teilchen müssen wegen der Lorentz-Invarianz Rechts- und Linkshändige Teilchen haben.

## Elektroschwache Theorie

Die Erzeuger und Vernichter sind Operatoren unter der  $SU(2) \times U(1)$  Lie Algebra. Die Generatoren von  $SU(2)$  sind  $R_a$  ( $a=1,2,3$ ), und der Generator von  $U(1)$  ist  $S$ .

Die elektrische Ladung ist dabei gegeben durch  $Q = R_3 + S$

Jedem Generator der Lie Algebra wird ein Kräfte teilchen zugeordnet.

$$R_a \rightarrow W_a, \quad S \rightarrow X$$

Die Linearkombinationen daraus ergeben die uns bekannten Teilchen

$$W_3 + X \rightarrow \text{Photon}, \quad W^\pm = W_1 \pm iW_2, \quad W_3 - X = Z$$

$SU(2) \times U(1)$  ist nicht wirklich eine Symmetrie.

Es hat kurze Reichweite und die Kraftteilchen  $W$  und  $Z$  sind massiv. Außerdem müssten wegen der Paritätsverletzung dann die Elektronen und Quarks masselos sein.

$\Rightarrow$  Es muss ein Mechanismus geben der den Quarks und Leptonen Masse gibt, das Photon jedoch masselos lässt. Ein Hinweis liefert der Vakuumzustand. Dieser ist nämlich kein  $SU(2) \times U(1)$  Singulett. Elektromagnetismus mit der Symmetriegruppe  $U(1)$  behandelt den Vakuumzustand als ein Singulett.

### Higgs Feld ( $\phi$ )

Ein hypothetisches skalares (und damit Lorentz-invariantes) Feld, welches ein nicht-verschwindenden Betrag im Vakuumzustand haben kann ohne dabei die Rotationssymmetrie zu brechen.

Dieses Feld wechselwirkt mit sich selbst, beschrieben durch das Potential  $V(\phi)$ .  $V(\phi)$  ist invariant unter  $SU(2) \times U(1)$ .

Bsp. für  $V(\phi)$  ist

$$V(\phi) = \lambda(\phi^\dagger\phi - v^2)^2$$

$\rightarrow$  Der Vakuumzustand ist entartet.

Damit das Photon masselos bleibt muss  $R_3 + S$  mit  $\phi$  kommutieren. Alle anderen Kombinationen der Generatoren ergeben eine Kommutatorrelation  $\neq 0$ . Damit wird die Symmetrie gebrochen (die Symmetrioperationen vermitteln zwischen physikalischen und unphysikalischen Zuständen) und die Teilchen bekommen Masse.

Das Higgs Feld kann nur dann einem Spin  $\frac{1}{2}$  Teilchen Masse verleihen wenn in der Tensorprodukt Darstellung des rechtshändigen Teilchen und der dazu gehörigen Antiteilchen die Darstellung des Higgs Feldes oder des komplex konjugierten Higgs-Feldes enthalten ist

Wieso sucht man nach einer höheren Symmetrie? (3)

Die  $SU(2) \times U(1)$  Symmetrie erklärt viele physikalische Sachverhalte nicht. Zum Bsp. die Ladungsquantisierung. Diese kann man mit  $SU(2) \times U(1)$  zwar beschreiben, aber nicht erklären. Das liegt an dem  $S$  Generator. Weil  $SU(2)$  nicht-abelsch ist sind die Werte von  $R_3$  (aber auch  $R_1$  und  $R_2$ ) quantisiert.  $U(1)$  ist abelsch und damit sind die Werte von  $S$  beliebig. Wäre  $SU(2) \times U(1)$  in eine größere Gruppe eingebettet, wären die Werte von  $R_3$  aber auch von  $S$  durch die Struktur der Algebra bestimmt.

## $SU(5)$

Man versucht gleich die Gruppe  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  ( $SU(3)$  für die starke WW) zu einer größeren Gruppe  $G$  zu verallgemeinern. Der Rang von  $G$  muss mindestens 4 sein ( $\text{Rang}(SU(3) \times SU(2) \times U(1)) = 4$ ), denn es muss die vier kommutierenden Elemente  $T_3, T_8, R_3, S$  enthalten. Außerdem muss eine komplexe Darstellung besitzen, da die Darstellung von  $SU(2) \times SU(2) \times U(1)$  komplex ist (das liegt an der Paritätsverletzung der schwachen WW). Ein wichtiger Punkt den man klären muss ist, wie  $SU(5)$  zu  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  gebrochen wird.

$$SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)$$

## Protonenzerfall in $SU(5)$

Weil Quarks, Antiquarks und Elektronen in der selben irreduziblen Darstellung auftauchen erhalten einige  $SU(5)$  Wechselwirkungen die Baryonenzahl nicht.

$SU(5)$  führt damit zum Protonenzerfall.

Die errechneten Werte stehen im Widerspruch zu den experimentellen Befunden.

# SO(10)

(4)

SU(5) beinhaltet Teilchen die man bereits kennt. Das muss nicht zwingend sein. Eine Vereinheitlichung die nur ein weiteres Teilchen einführt ist SO(10). Das Teilchen ist ein rechtshändiges Neutrino. Damit wird die Paritätssymmetrie wiederhergestellt.

Man kann zeigen, dass die Spinordarstellung von SO(10) die Darstellung von SU(5) 2 mal enthält. (Einmal für rechtshändige und einmal für linkshändige Erzeuger Op.)

## Brechung SO(10) $\rightarrow$ U(1)

Die Symmetriebrechung passiert in mehreren Schritten. Zunächst wird SO(10)  $\rightarrow$  SU(5) gebrochen. Dabei wird dem rechtshändigen Neutrino eine sehr große Masse zugeschrieben, die anderen Teilchen bleiben noch masselos. Danach wird SU(5)  $\rightarrow$  SU(3)  $\times$  SU(2)  $\times$  U(1) gebrochen. In einem weiteren Schritt wird SU(3)  $\times$  SU(2)  $\times$  U(1)  $\rightarrow$  U(1) gebrochen. Wichtig ist das die Darstellung des Higgs-Feldes in jedem Schritt muss bereits in der Darstellung von SO(10) enthalten sein.

## Weiter Vereinheitlichung

Höhere Gruppen und Supersymmetrie

Außerdem etablierung von Gravitation

$\rightarrow$  Quantengravitation

- Stringtheorie
- M-Theorie
- Loop-Quantengravitation
- Twistor-Theorie