

Die Struktur des Vakuums

10. Juni 1996

A. Wipf
Universität Jena

- KANN ES VAKUUM GEBEN?

- VAKUUMFLUKTUATIONEN UND -POLARISATION

- SPONTANE SYMMETRIEBRECHUNG UND MASSENERZEUGUNG

- DAS PROBLEM DER KOSMOLOGISCHEN KONSTANTE

- **Leibniz:**
 - ◇ *Die Gründe, die man zugunsten des Leeren vorbringt, sind nichts weiter als Spitzfindigkeiten*

KANN ES VAKUUM GEBEN?

Leukipp, Demokrit (5. Jh. v. Chr.)

- Die Materie besteht aus kleinsten, unveränderlichen und unsichtbaren Teilchen (Atomen); Deren Bewegungen brauchen leeren Raum (Vakuum).

◇ Demokrit: *In Wirklichkeit gibt es nur Atome und den leeren Raum*

Empedokles, Aristoteles (5/4. Jh.v.Chr.):

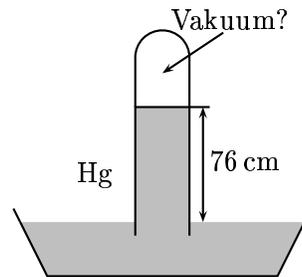
- Der leere Raum ist ein philosophisch sinnloser Begriff; Die Scheu der Natur vor dem Leeren ('horror vacui', Äther)

◇ *Im Vakuum ändert ein Körper seinen Bewegungszustand nicht: dies ist absurd*

GEZIELTE ERFORSCHUNG DES VAKUUMS

Evangelista Toricelli (1608-1647), Blaise Pascal (1623-1662)

- Toricelli-Vakuum (1644)
—→ Barometer
- Hg-Säule hängt von Höhe ab
—→ Höhenmeter
- Vakuum ist schwerelos.



Otto von Guericke (1602-1686)

- Studierte 1621/22 Jurisprudenz in Jena.
- Mitbegr. der Experimentalphysik in Deutschland.
- Magdeburger Halbkugeln, Erfinder der Luftpumpe.
- Licht durchdringt Vakuum, Schall nicht.

Mit heutigen Techniken:

Vakua mit 10^{-14} mbar (~ 100 Moleküle pro cm^3).

HERA: $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ mbar, LEAR: $\sim 10^{-12}$ mbar

Universum: $\sim 10^{-7}$ Wasserstoffatome je cm^3 .

August Hauptmann:

◇ *...daß es keinem Engel noch Teufel möglich wäre, ein Vakuum zu Wege zu bringen..., es müsste alles Wasser aus aller Tiefe, ja im untersten centro herausziehen, den Himmel selbst und alles, was zu seiner Ausfüllung notwendig wäre ...*

Otto von Guericke:

◇ *Dieses und anderes Zeug solcher Art zu widerlegen, halte ich für überflüssig, denn auf Versuche ist mehr Gewicht zu legen als auf Dummheit, welche immer Vorurteile gegen die Natur zu spinnen pflegt.*

THERMISCHE STRAHLUNG

- Hohlraumstrahlung $T > 0$: isotrop, homogen

Energie der Hohlraumstrahlung:

$$E \sim V \cdot T^4 \quad \text{Stefan/Boltzmann, 1879/84.}$$

Energiedichte je Frequenzintervall

$$\rho_\nu \sim \nu^3 f(T/\nu) \quad \text{W. Wien, 1893}$$

- f von Max-Planck gefunden \rightarrow Geburt der Quantentheorie.

Um Vakuum zu erzeugen: kein Gas (ideale Pumpen); keine thermische Strahlung (abkühlen).

- Hohlräume mit $T \sim 0.15^0\text{K}$, $\bar{n} \sim 0.06$.
- Hintergrundstrahlung $T \sim 2.7^0\text{K}$.

Vakuum: Gebiet, dem wir alle Form von Energie (Materie und therm. Strahlung) entzogen haben, die wir entziehen können.

VAKUUMFLUKTUATIONEN

Heisenbergsche Unschärferelationen:

komplementäre Messgrößen (prinzipiell) nicht gleichzeitig genau bestimmbar.

- Ort und Impuls:

$$\boxed{\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar.}$$

Auto: 10^3kg , $\Delta x \sim 1 \text{cm}$: $\Delta v \sim 10^{-35} \text{ km/s}$.

◇ Atome, Moleküle, Kristalle haben Minimalenergie wegen Nullpunktsbewegung.

- Energie und Zeit:

$$\boxed{\Delta E \Delta t \geq \hbar.}$$

◇ natürlich Breite von Spektrallinien in Atomen.

◇ $\Delta t \sim \hbar/\Delta E \rightarrow$ Je größer die Energieschwankung, desto kleiner ist ihre Lebensdauer.

- Elektrisches und magnetisches Feld:

$$\boxed{\Delta \vec{E} \cdot \Delta \vec{B} \geq O(\hbar).}$$

◇ Im Vakuum können \vec{E} und \vec{B} nicht Null sein.

Es bleiben Vakuumfelder

- ◇ Nullpunktsstrahlung ist isotrop und homogen.
- ◇ Geschwindigkeit des Experimentators relativ zum Hintergrund der Nullpunktsstrahlung nicht messbar.

- Energiedichte je Frequenzintervall

$$\rho_\nu \sim \nu^3.$$

- Gesamtenergie der Vakuumfluktuationen

$$E \sim \int d\nu \rho_\nu = \infty \quad ???$$

Wolfgang Pauli: Vakuumenergie = Quelle des Gravitationsfeldes, krümmt Raumzeit (cutoff $\lambda \sim r_0 \sim 2.8 \cdot 10^{-13} \text{cm}$)

...und das Universum reichte nicht einmal bis zum Mond.

Genauer: 31km.

- Aber: Änderungen der Vakuumenergie endlich.

PHYSIKALISCHE EFFEKTE

Casimir Effekt:

Anziehende Casimirkraft pro Flächeneinheit:

$$F/A = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4}.$$

- experimentell bestätigt.

Spontane Emission von Atomen:

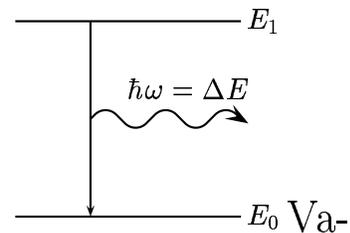
Vakuumfluktuationen von \vec{E} , \vec{B} \longrightarrow

Endliche Lebenszeit eines
angeregten Atoms im Vakuum.

Zerfallswahrscheinlichkeit je

Zeiteinheit \sim Dichte der

Vakuumfluktuationen pro Frequenzintervall.



- Hohlraum-QED: Unterdrückung und Verstärkung der spontanen Emission durch Verstimmung der Vakuumfluktuationen zwischen 2 Platten (Mikrolaser?).

Wasserstoffatom:

$$V(r) = \frac{\alpha}{r} \quad \alpha = 1/137 \quad \text{Coulombpotential}$$

Nullpunktschwankungen des elektromagn. Feldes \longrightarrow Verschiebung der Spektrallinien im Wasserstoffatom

Virtuelle Teilchen im Vakuum

Unbestimmtheitsrelation in Quantenfeldtheorie:

Alle Felder fluktuieren im Vakuum.

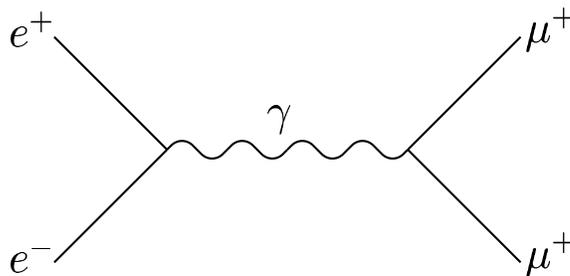
Felder \longleftrightarrow Teilchen
 elm. Feld \longleftrightarrow Photon
 Diracfeld \longleftrightarrow Elektr./Positr.

Teilchen sind Quanten der Felder.

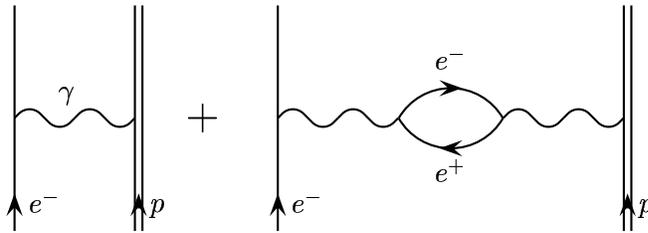
Kurzlebige Energiefluktuationen \leftrightarrow kurzlebige virtuelle Teilchen im Vakuum ($\Delta E \Delta t \leq \hbar$, $E = mc^2$).

- Den virtuellen Teilchen fehlt nur Energie um zu realen Teilchen zu werden.

Elektron-Positron Paarvernichtung: energetisch hochangeregtes Gebiet, Energiezufuhr überführt im Vakuum verborgene virtuelle Möglichkeiten in Realitäten, z.B. Paarerzeugung von Muon und Antimuon



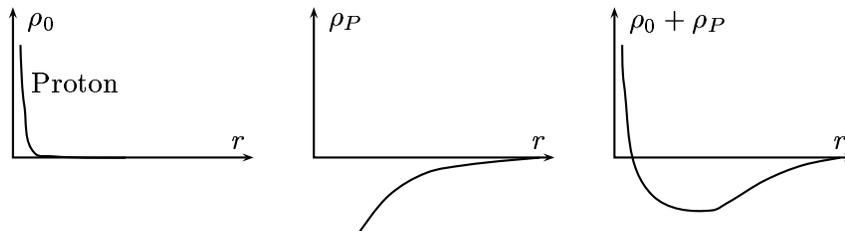
- Das Photon wird aus dem Vakuum erzeugt.
- Virtuelle Elektron-Positron-Paare ($\Delta E \Delta t \leq \hbar$) modifizieren Coulombpotential: Uehling Potential



$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} \left[1 - \frac{\alpha}{4\sqrt{\pi}} \frac{e^{-r/\lambda}}{(r/\lambda)^{3/2}} + \dots \right]$$

$\lambda \sim 0.4 \cdot 10^{-10} \text{cm}$: Compton-Wellenlänge.

- Änderung der elektr. Ladungsdichte des Protons durch Vakuumfluktuationen \rightarrow



- Lamb-Verschiebung (Laser Spektroskopie) des $1s_{1/2}$ Niveaus im Wasserstoffatom:

Theorie: $8149.43 \pm 0.08 \text{MHz}$ Exp.: $8161 \pm 29 \text{MHz}$.

Vakuumpolarisation:

Vakuum: Elektron von Wolke von virtuellen Elektron-Positron Paaren umgeben \rightarrow Polarisation des Vakuum durch Elektron, Abschirmung der el. Ladung e .

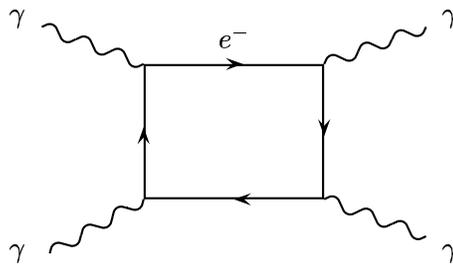
kleinere Abstände $\rightarrow e$ wir größer

Elektron 'auflösen': Sondenteilchen mit kleinen Wellenlängen bzw. hohen Impulsen q :

$$e = e(q) \quad \text{wächst mit } q.$$

Streuung von Licht an Licht

Streuung von Photonen an Photonen:



- Vakuum = polarisierbares Medium.

Korrekturen der Maxwellgleichungen (Heisenberg, Euler):

$$D_i = \left[\delta_{ik} + \frac{\alpha^2 \lambda^4}{45\pi \hbar c} \left(2(\vec{E}^2 - \vec{B}^2) \delta_{ik} - 7B_i B_k \right) + \dots \right] E_k$$

- Experimentelle Verifikation?

VEREINHEITLICHUNG DER WECHSELWIRKUNGEN

starke/schwache Wechselwirkungen: g_s/g_w .

- Vakuumpolarisation $\longrightarrow g_s(q), g_w(q)$

- asymptotischen Freiheit

kleinere Abstände $\rightarrow g_{s,w}$ werden kleiner.

- Bei etwa $10^{14} - 10^{15}$ GeV ($\sim 10^{-29}$ cm):

$$\boxed{\alpha_{em} = \alpha_w = \alpha_s.}$$

- Indiz für vereinheitlichte Theorie der nichtgravitativen Wechselwirkungen? (Supersymmetrie?)
- Umgekehrt: Für $r \gg 10^{-13}$ cm: starke Wechselwirkung wird stark \longrightarrow Quarks untrennbar (Confinement)
- Confinement theoretisch noch unverstanden (DFG-Projekt in Jena).

SPONTANE SYMMETRIEBRECHUNG, MASSEN DER ELEMENTARTEILCHEN

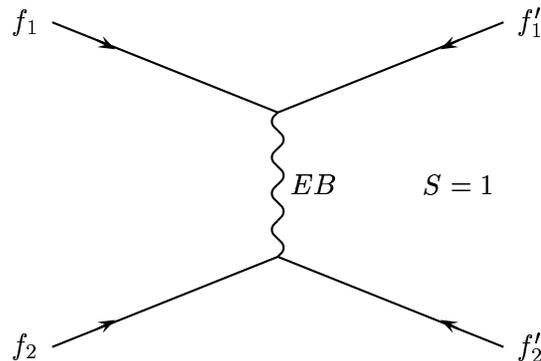
$r \sim 10^{-16}$ cm:

	u	d	s	c	b	t
Quarks:	u	d	s	c	b	t
	u	d	s	c	b	t
Leptonen:	e	ν_e	μ	ν_μ	τ	ν_τ

- Protonen, Neutronen, Pionen: farblose Kombinationen der Quarks.

ähnlich der Mischung von 3 Farben, die im Ostwaldschen Farbkreis um 60° gegeneinander versetzt sind (rot+grün+blau), erhält man im Ergebnis den Eindruck weiß.

- Kräfte: Austausch von Eichbosonen (EB)



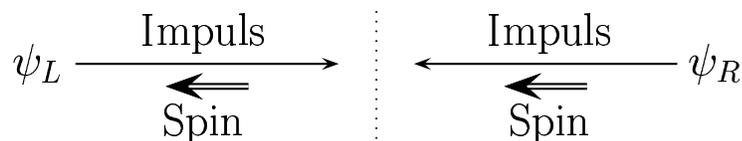
$$EB = \begin{cases} \gamma & \text{Photon, QED} \\ G & \text{Gluonen, QCD} \\ W^\pm, Z & \text{intermediäre Bosonen, QFD} \\ h & \text{Gravitonen?} \end{cases}$$

unterliegende theoretische Struktur:

lokale Eichsymmetrie.

- fundamentale Eigenschaft des Standardmodells: Kräfte zwischen 'linkshändigen' und 'rechtshändigen' Teilchen verschieden (Verletzung der Spiegelsymmetrie).

Zustände von Quarks und Leptonen:



linkshändig \iff rechtshändig

Umwandlung über Wechselwirkung mit Higgsfeld.

Higgsfeld/Higgsteilchen: sehr wichtig im Standardmodell.

Spontane Symmetriebrechung.

Potential $V(\phi)$ in Energie des Higgsfeldes

$$H \sim \int d^3x (\dot{\phi}^2 + (\nabla\phi)^2 + V(\phi))$$

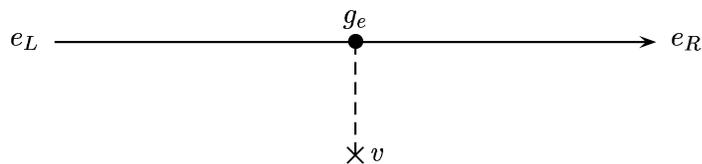
Vakuum: Energie minimal

$$\langle \phi \rangle_{vac} = v = \text{Minimum des Potentials.}$$

Vakuum zeichnet Richtung im Raum der Teilcheneigenschaften aus.

- Massen der Elementarteilchen: Folge ihrer Bewegung im Higgsfeld-Hintergrund v .

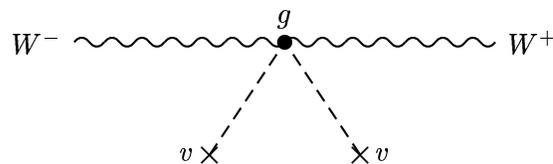
Leptonen und Quarks:



Massen:

$$m_l = g_l v \quad m_q = q_q v$$

Vektorbosonen:



Massen:

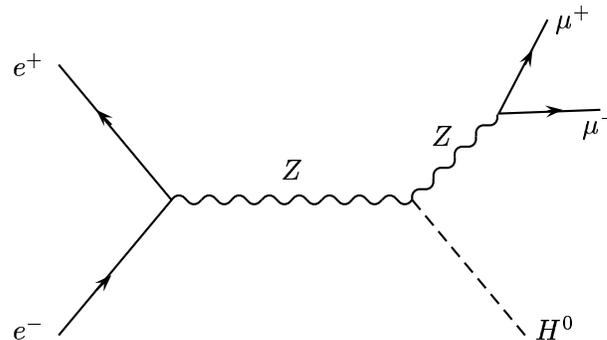
$$m_W \sim gv$$

g_l, g_q, g : dimensionslose Konstanten \longrightarrow Massen proportional zu Higgsfeld im Vakuum

$$v \sim 174 \text{ GeV}/c^2.$$

Experimentelle Tests des Higgs-Mechanismus

- Suche nach dem Higgs-Boson (LEP, LHC):



- Verdampfen des Vakuumerwartungswertes bei hohen Energien oder großen Dichten:

◇ pp -Kollisionen an Supercollidern \longrightarrow W -Boson-Plasma (LHC nicht ausreichend)

◇ Phasenübergang im frühen Universum:

Wegen

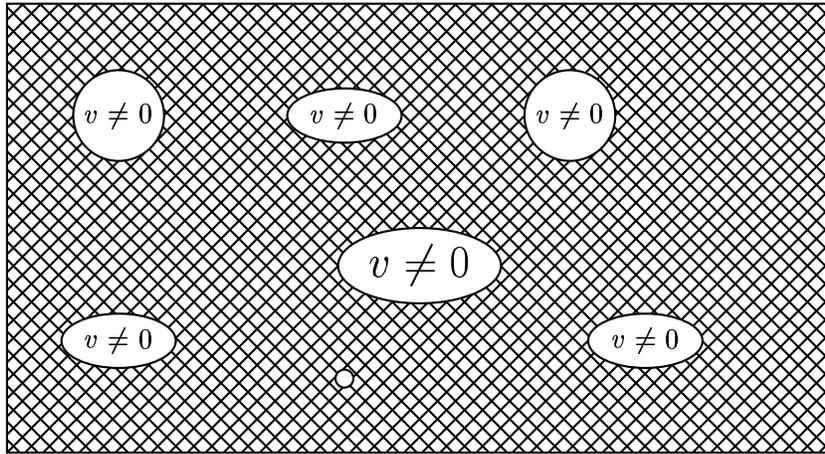
$$t = c/T^2 \quad 1\text{s} \sim 10^{10} \text{ } ^0\text{K} \sim 1\text{MeV}$$

$$\langle \phi \rangle \equiv v(T) \longrightarrow 0 \quad \text{für } T > 10^{15} \text{ } ^0\text{K}$$

(permanenter Magnet: Magnetisierung verschwindet oberhalb Curie-Temperatur.)

→ Teilchen masselos für $T > 10^{15} \text{ } ^\circ\text{K}$.

Abkühlung des Univ.: $t > 10^{-12} \text{ sek}$ → $v(T) > 0$ →
Tröpfchenbildung.



Phasenübergang von masseloser zu massiver Phase.

Kurzzeitig kein Gleichgewicht → Baryonen- und Leptonenzahlverletzende Prozesse.

- Erklärung, warum mehr Materie als Antimaterie im Universum? (Hoffnung, Science Fiction?).

DAS PROBLEM MIT DER KOSMOLOGISCHEN KONSTANTE

Was ist die kosmologische Konstante:

Einsteinsche Feldgleichungen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

- zwei Konstanten: Gravitationskonstante G [L/M]; kosmologische Konstante Λ [$1/L^2$].

$g_{\mu\nu}$ metrischer Tensor
 $R_{\mu\nu}$ Krümmung der Raumzeit
 $T_{\mu\nu}$ Energie-Impuls-Dichte der Materie

$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)}$$

- kosmologisches Glied \sim Energie-Impuls des materiefreien Raumes (Vakuums).

Vakuum = ideale Flüssigkeit mit

$$\rho_v = -\frac{\Lambda}{8\pi G} g_{00}$$

Einstein: statisches Weltmodell, geschlossenen dreidimensionalen Raum (Machsches Prinzip) \longrightarrow kosmologische Konstante.

- Friedmann (1922-24): expandierendes Universum (ohne kosm. Glied).

Postkarte von Einstein an H. Weyl (1923):

◇ *Wenn schon keine quasi-statische Welt, dann fort mit dem kosmologischen Glied*

Später: ◇ *Mein größter Fehler.*

Heute ist expandierender Kosmos allgemein akzeptiert.

Problem:

- Beobachtung: Λ keinen wesentlichen Effekt auf großen Skalen \longrightarrow

$$\Lambda \leq 10^{-56} \text{cm}^{-2} \implies \rho_v \leq 10^{-29} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \sim 10^{-47} (\text{GeV})^4.$$

- Quantenfeldtheorie: Vakuumfluktuationen der Materiefelder \longrightarrow Beitrag zur kosmologischen Konstante:

$$\boxed{\Lambda_{eff} = \Lambda + 8\pi G \langle \rho \rangle_v.}$$

Natürliche Längen: Plancklänge oder typische Länge in Teilchenphysik.

Plancklänge

$$l_p = \sqrt{\hbar G} \sim 10^{-33} \text{cm} \implies \Lambda \sim \frac{1}{l_p^2} \sim 10^{66} \text{cm}^{-2}$$

Also

$$\Lambda_{theor} \sim 10^{122} \Lambda_{beob.}$$

Phasenübergänge mit spontane Symmetriebrechung: Vakuumenergie \rightarrow thermische Energie.

- Elektroschwachen Phasenübergang:

$$\langle \Delta\rho \rangle \sim 10^6 \text{GeV}^4 \longrightarrow \Lambda_{theor} \geq 10^{53} \Lambda_{exp.}$$

Problem der kosmologischen Konstante:

- Physiker: Warum ist $\Lambda \sim 10^{122}$ -mal kleiner als erwartet bzw. eventuell: Warum ist Λ exakt gleich Null?
- Astronomen: messe Λ (neue Altersbest., $H_0 \rightarrow \Lambda \neq 0$).
- Moderne Physik liefert bisher keine befriedigende Lösung des Problems der kosmologischen Konstante.
- Grundlegendes Problem in der Physik.



Vakuum hat Struktur; Eigenschaften des Vakuums beeinflussen entscheidend die Eigenschaften der Materie und die Entwicklung des Universums (Inflationäre Universen). Verschiedene Phasen des Vakuums sind möglich.

- Verständnis der Vakuumstruktur hat uns in der theoretisch-physikalischen Grundlagenforschung viele Einsichten eröffnet. Wird es auch weiterhin tun.

- Im Vakuum sind noch viele ungelöste Rätsel der Natur verborgen (Vereinheitlichung, Entstehung von Strukturen,

