

Klaus R. Schubert
Abschiedsvorlesung
27. Juni 2006

Die Physik
des Vakuums

Luftleerer Raum
Licht und Wärme darin
Hohlraumstrahlung, auch bei $T=0$
Casimir-Effekt
Energiedichte des Vakuums
Kosmische Hintergrundstrahlung
Antimaterie
Virtuelle Teilchen im Vakuum
und wie daraus reale werden
Der Zoo der Elementarteilchen
warum auch Higgs-Teilchen?
Dunkle Materie und dunkle Energie

Maxwells Definition als Leitmotiv



Vakuum ist das, was in einem Gefäß übrig bleibt, wenn wir daraus alles entfernt haben, was wir entfernen können.

Vakuum ist das, was im Raum übrig bleibt, wenn wir aus ihm alles entfernt haben, was die Naturgesetze erlauben.

Raum mit nichts darin ist nicht mein Thema.

Mein Raum liegt zwischen materiellen Wänden, diese definieren

x , y , z (ihre Uhren dazu t) auch im leeren (Zwischen-)raum.

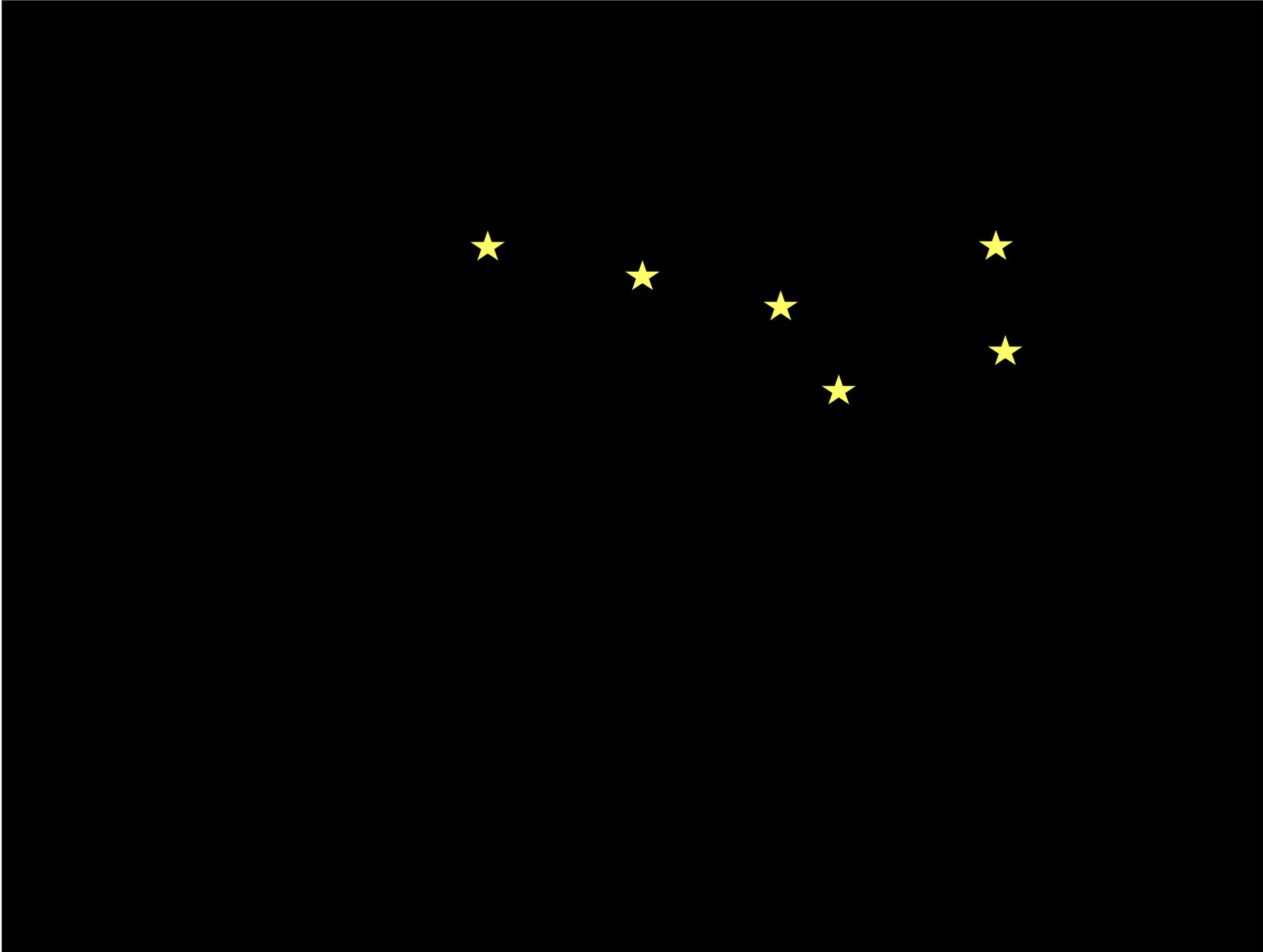
Dieser Raum **könnte** leer sein, d. h. nichts Beobachtbares enthalten.

Ob die Natur solchen leeren Raum zulässt, kann nur experimentell entschieden werden.

Beinahe-leeren Raum zu beobachten, ist mit einigem Aufwand möglich:



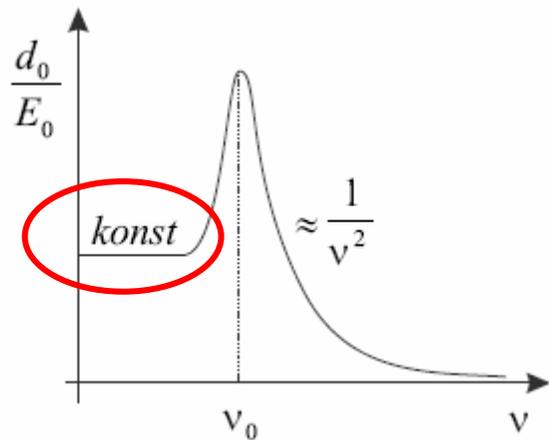




Erklärungen für Blau und Schwarz

Das Blau des Himmels hat Rayleigh 1871 erklärt:

Luftmoleküle werden durch weißes Sonnenlicht zum Mitschwingen ange-
regt, und ihre Resonanzfrequenzen sind höher als die Lichtfrequenzen.



$$\frac{dI}{I} = -\frac{N}{V} \cdot \sigma \cdot dx, \quad \sigma = \frac{8\pi^3}{3\varepsilon_0^2 \lambda^4} \left(\frac{d_0}{E_0} \right)^2$$

$$\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) = \frac{N}{V} \cdot \frac{d_0}{E_0}$$

Rayleigh

$$\frac{N}{V} \cdot \sigma = \frac{1}{18 \text{ km}} \Rightarrow N_A = 6 \cdot 10^{23} / \text{mol}$$

Dember
1914

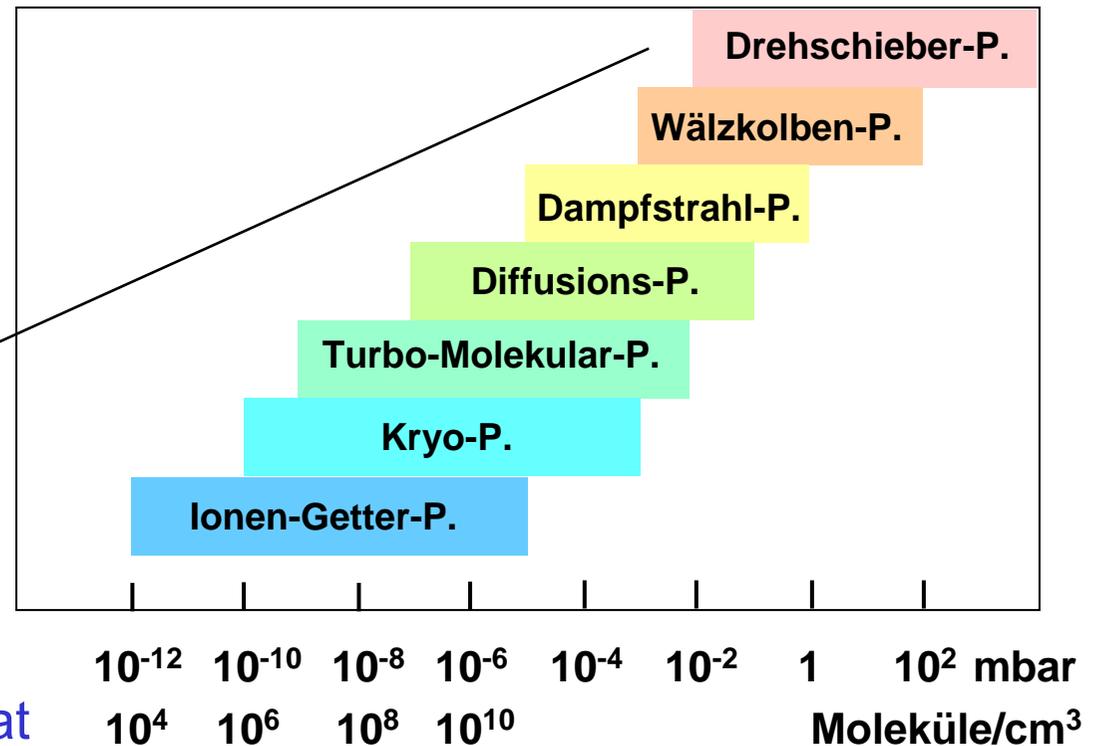
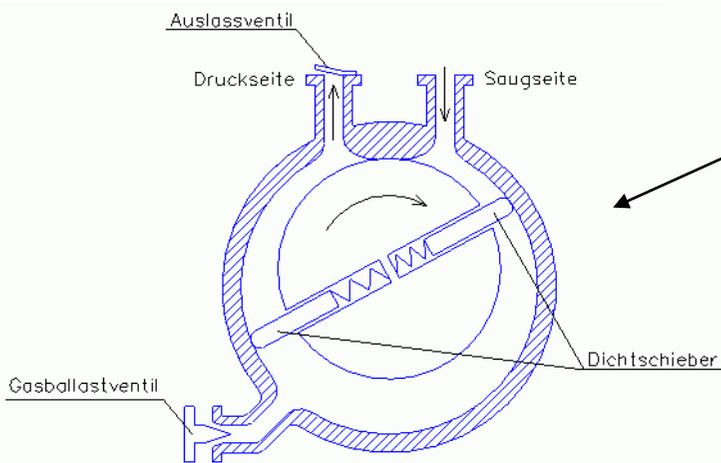
Den schwarzen Nachthimmel hat Olbers 1826 erklärt:

Ein unendlich ausgedehntes, unendlich altes Universum mit im Mittel
homogener Sterndichte erzeugt einen sonnenhellen Nachthimmel;
also ...

Entfernen von Luftmolekülen



Pioniere: Galilei, Torricelli,
von Guericke ...



Die meisten Vakuumpumpen hat
Gaede ~ 1910 erfunden.

Eines der größten Hochvakuum -
Systeme ist das e^+e^- -Strahlrohr
von LEP, 60 m^3 mit $\sim 3 \cdot 10^{-11} \text{ mbar}$.

Interstellare Dichte: $\sim 1 \text{ H/cm}^3$. Mittlere Dichte im Universum: $\sim 10^{-7} \text{ H/cm}^3$.



das Vakuum beschäftigt mich seit langem



hier ~ 1964
als Lecksucher
im Heidelberger
Tandem -
van de Graaff -
Beschleuniger,

und dann erneut seit meiner Pensionierung,
z. B. mit dem „Vacuum Wine Saver“ von www.vacuvin.nl

was bleibt im luftleeren Raum?



Seit ~ Newton 1680: der Äther, um **Licht und Wärme** zu transportieren.

Seit ~ Michelson 1881: einen Äther brauchen wir nicht.

Seit ~ Hertz 1888: Licht und Wärme sind electromagn. Wellen, die aus den
Maxwellschen Gleichungen (~ 1864) folgen.

Maxwells E- und B-Felder werden vom ätherfreien Raum aufgenommen.

Die Maxwell-Gleichungen erlauben $E=0$ und $B=0$.

Der leere Raum **kann** E- und B-Felder aufnehmen, **muss** aber nicht.

Wie gut sich gegen electromagn. Wellen aller λ mit Gefäßwänden abschirmen lässt, ist mir unbekannt; ist aber mit genügend dicken Wänden denkbar.

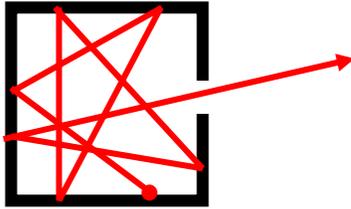
Es bleibt nur die Wärmestrahlung der Gefäßwand mit deren Temperatur.

Vor ~ Nernst 1906: Im Limes $p_{\text{Luft}} \rightarrow 0$ und $T_{\text{Wand}} \rightarrow 0$ ist der Raum **leer**.

Hohlraumstrahlung: von Kirchhoff bis Rubens



Beste Strahlungsquelle: Schwarzer Hohlraumstrahler



Kirchhoff 1859 ... Lummer 1898

Bester Wärmemengenmesser: Linearbolometer

Langley 1880 ... Lummer 1892

Intensive Arbeiten an der PTR Berlin wegen eines Forschungsauftrags der deutschen Gaslampenindustrie.

Immer präzisere Messungen von $dW / dVd\lambda$, zuletzt durch Rubens \Rightarrow

1899 Formel von Wien, Planck sucht und veröffentlicht Begründung, ist sich „nicht ganz sicher“.

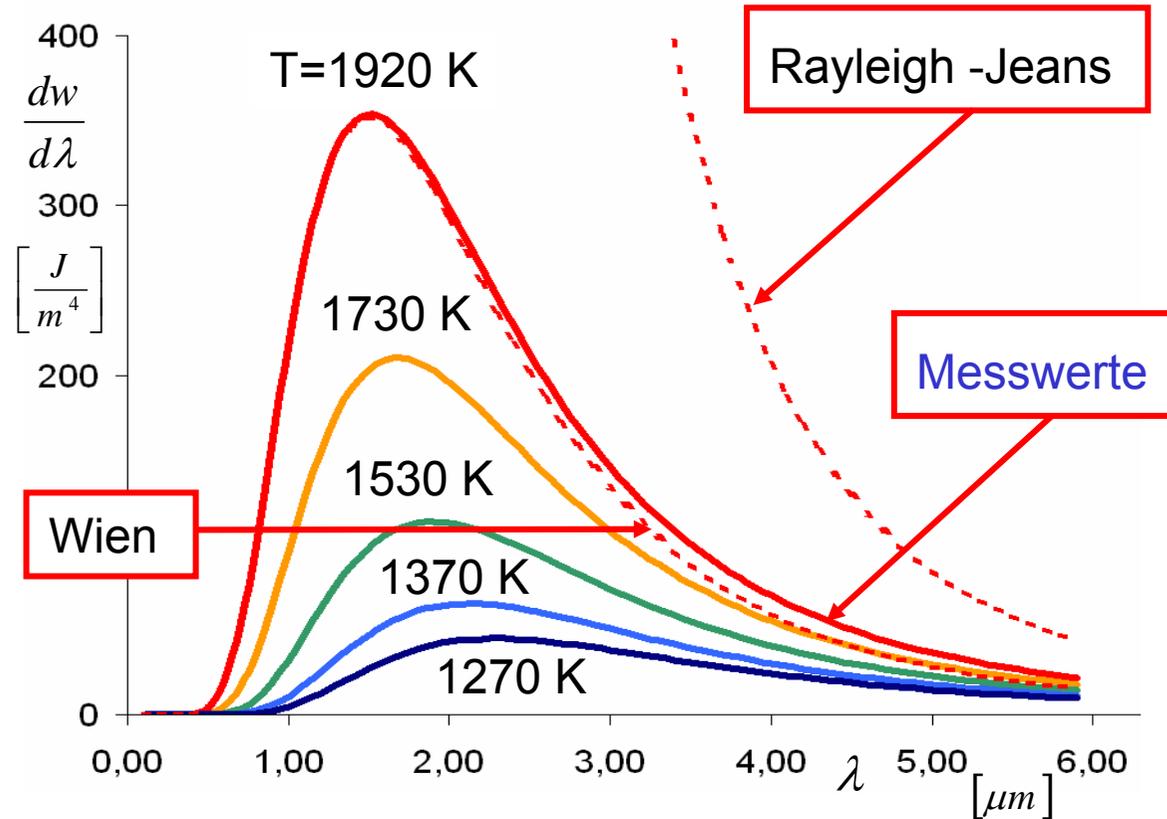
1900 auf Maxwell beruhende Formel von Rayleigh und Jeans.

Hohlraumstrahlung am 7. Oktober 1900



Wissensstand
am Nachmittag
(Rubens bei Plancks
zum Kaffee):

Planck schickt
am Abend
eine Postkarte
an Rubens, die
Geburtsurkunde
der Quantentheorie:



$$\frac{dw}{d\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$\frac{dw}{d\nu} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Oktober - Dezember 1900



Planck weiß am Abend des 7.10.00:

- Meine Formel passt perfekt auf Rubens' Messwerte.
- Die Vorstellung von Rayleigh & Jeans, dass elektrisch geladenes heißes Material Maxwellsche Wellen abstrahlt, stimmt nicht.

Er weiß nicht, was seine Formel bedeutet; „eine theoretische Begründung musste um jeden Preis gefunden werden und wäre er noch so hoch.“

Zwei Monate später findet er, in „einem Akt der Verzweiflung“, dass die Hohlraumwand mit Energien schwingt, die gequantelt sind. Energieaustausch mit dem Strahlungsfeld findet nur durch Quanten mit $W = h\nu$ statt.



AN DIESER STELLE BEFAND SICH BIS 1945 DAS PHYSIKALISCHE INSTITUT DER BERLINER UNIVERSITÄT.

MAX PLANCK BEGRÜNDETE HIER AM 14.12.1900 IN EINEM VORTRAG DIE QUANTENTHEORIE

Und wie sieht die Hohlraumstrahlung bei T=0 aus?

in der Planckformel wird $\frac{dw}{d\nu}(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} = 0$ für T = 0.

Wenn die Ladungen der Wand-Atome nicht mehr schwingen, senden sie keine Quanten mehr aus. Im Limes $p_{\text{Luft}} \rightarrow 0$ und $T_{\text{Wand}} \rightarrow 0$: Raum bleibt leer.

Seit ~ Heisenberg 1925 wissen wir es besser: Atome in kondensierter Materie bewegen sich wegen $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$ auch bei T=0 und tragen $W_0 = h\nu/2$.

Diese quantenmechan. Nullpunktsenergie ist makroskopisch messbar. In Ne: 6,8 meV/Atom.

Im Hohlraum erwarten wir Analoges.



Hohlraumstrahlung bei T=0 (2)



Planck:

$$\frac{dw}{d\nu}(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \xrightarrow{T \rightarrow 0} 0$$

Erwartung
der QFT:

$$\frac{dw}{d\nu}(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \right) \cdot h\nu \xrightarrow{T \rightarrow 0} \frac{4\pi h \nu^3}{c^3}$$

Bei T=0 trägt auch das el. Feld wegen $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$ Nullpunktsenergie mit Spektrum $\sim \nu^3$. **Im Limes $p_{\text{Luft}} \rightarrow 0$ und $T_{\text{Wand}} \rightarrow 0$ ist der Raum nicht leer.**

Wie lässt sich diese Erwartung beobachten?

Die Wand um den Hohlraum definiert ein Ruhesystem. Lässt Bewegung des Bolometers im Hohlraum die Mess-Temperatur steigen?

Ergebnis: Nein, $4\pi h \nu^3 / c^3 \rightarrow 4\pi h (\nu')^3 / c^3$ bei Bewegung mit $\vec{v} = \text{const}$

Aber: bei Bewegung im Hohlraum mit $T \neq 0$ verschiebt sich das Spektrum.

Es bleibt plancksch, aber mit größerer oder kleinerer T (Doppler-Effekt).

Ultraviolett-Katastrophe: $w = \frac{W}{V} = \int \frac{dw}{d\nu} d\nu = \infty$ bei jedem T. Was ist

Der Casimir - Effekt

Als Folge von $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$ und $\Delta W \cdot \Delta t \approx \hbar$ für beliebig kleine x- und t-Bereiche darf das E-Feld im Vakuum auch bei T=0 nicht konstant Null sein.

Damit sagt Casimir 1948 vorher, dass sich zwei Metallplatten im Vakuum mit

$$\frac{F(d)}{A} = \infty - \infty = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 \cdot d^4} \text{ anziehen,}$$

d. h. $2 \cdot 10^{-6} \text{ N/cm}^2$ bei $5 \mu\text{m}$ Abstand.

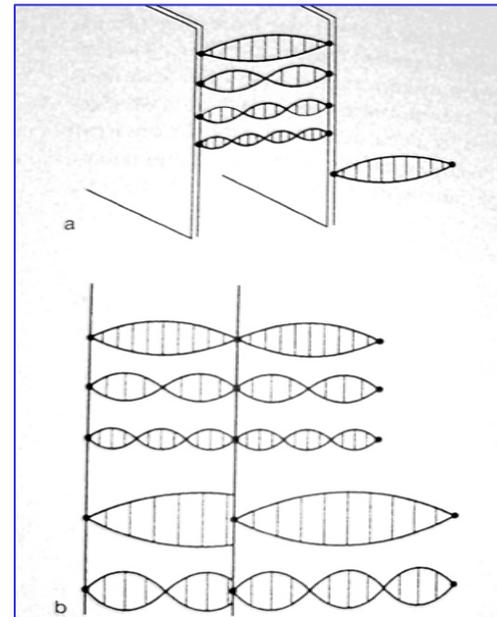
Mit großen Unsicherheiten 1958 von Sparnaay beobachtet, überzeugend mit Platte + Kugel 1997 von Lamoreaux,

$d = 0,6 - 6 \mu\text{m}$ [Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 5], Differenz zur Erwartung: $(1 \pm 5)\%$.

Die Energiedichte des Vakuums kann nicht unendlich sein. Auswege z.B.:

$dw/d\nu = 4\pi\hbar\nu^3/c^3$ gilt nur bis $\nu = \nu_{\text{max}}$, darüber kompensieren Felder mit

$dw/d\nu < 0$ das Gesamtintegral w zu ≈ 0 . Oder die Geometrie ist gequantelt.



aus H. Genz
„Nichts als
das Nichts“
Wiley 2004.

Darin auch: zwei
nebeneinander
liegende Schiffe
auf dem Meer
ziehen sich an.

Demonstration des Casimir-Effektes 1997

S. K. Lamoreaux, U of Washington, Seattle

Phys.Rev.Lett. 78(1997)5, subm. 28. 8. 1996



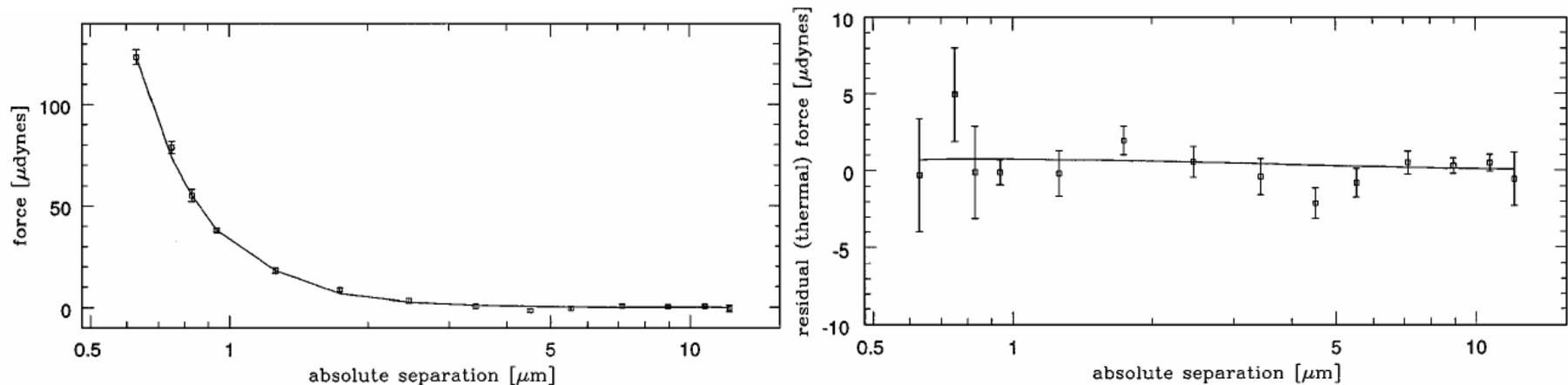
$R = 11,3 \text{ cm}$, $d = 0,6 - 10 \text{ } \mu\text{m}$, $p(\text{Vakuum}) = o(10^{-4} \text{ mbar})$, $T \approx 300 \text{ K}$

$$F = \frac{\pi^2 \hbar c}{240} \cdot \frac{A}{d^4} \rightarrow \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{\pi^2 \hbar c}{240} \cdot \frac{R}{d^3}$$

Kraft mit Torsionspendel gemessen, 0 - 120 μdyn .

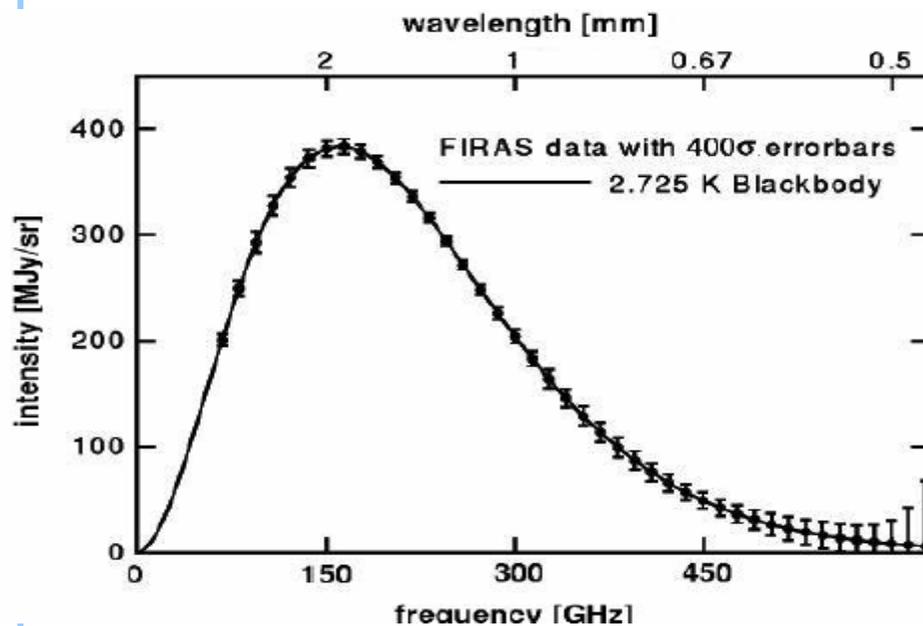
Exper. Korrekturen: Elektrostatik, $F_{\text{el}} \sim 1/d$

Theor. Korrekturen: $T \neq 0$ und Leitfähigkeit = $f(\nu)$, beide $<$ Messfehler.



Kosmische Hintergrundstrahlung

Im Auftrag von Bell Telephone nach dem erfolgreichen Start von Satelliten gehen Penzias und Wilson der Frage nach, ob sich diese fürs Telefonieren einsetzen lassen. 1964 finden sie einen „Dreckeffekt“, der die Telefonie stört: **Der Himmel leuchtet im Handy-Frequenzbereich.**

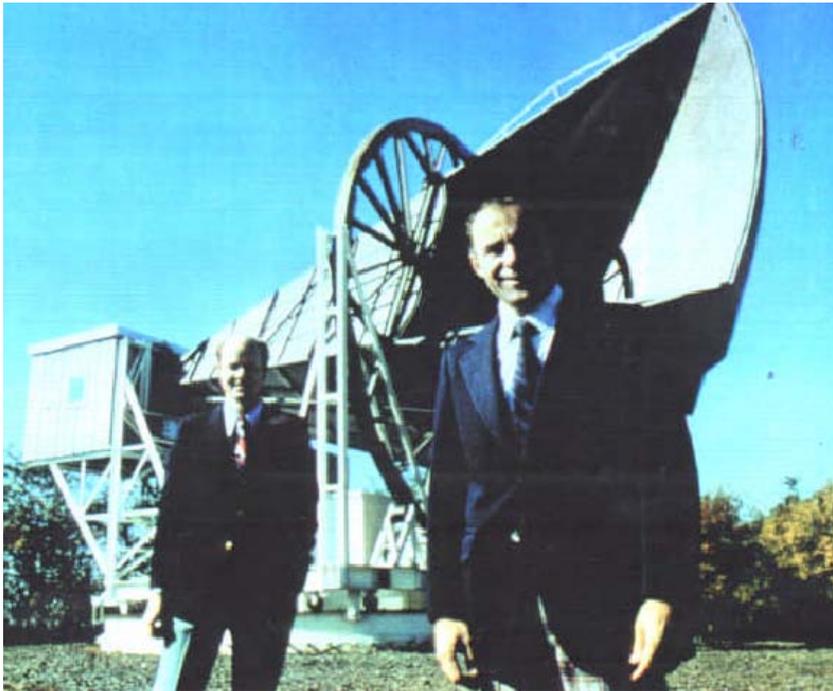


FIRAS der NASA etwa 20 Jahre später: Spektrum ist plancksch mit **$T = (2,725 \pm 0,002) \text{ K}$** .

Daraus folgt auch $dN(\gamma)/dV$.

Der Weltraum (das beste realisierte Vakuum) enthält 1 p/cm^3 , 1 e/cm^3 , $410 \text{ } \gamma/\text{cm}^3$ und eine unendliche [?] Dichte von Casimir-Photonen.

Gamovs Vorhersage: Materie-Antimaterie-Vernichtung

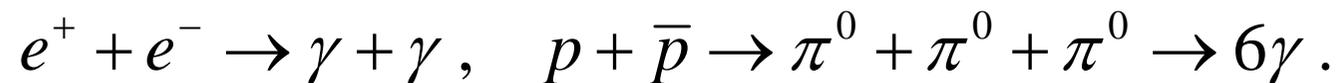


← Penzias und Wilson ~ 1964.

Sie wussten nicht, was sie entdeckt hatten. Frage an die U Princeton ergab, dass sie schneller waren als ein Team, das nach der Vorhersage von Gamov et al. 1948 suchte.

Im frühen Universum haben sich ~1 s n. U. Materie und Antimaterie

vernichtet und dabei entstand ein heißes Gas von Photonen, z. B. aus

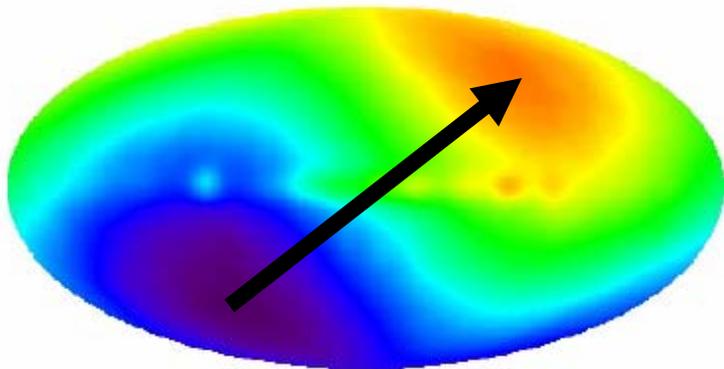


Durch die Expansion des Universums (Hubble 1929) kühlt sich das Gas von $T \approx 10^{10}$ K auf $T \approx 2,7$ K ab [Zahlen von heute].

Hintergrundstrahlung definiert absoluten Raum



Messungen mit dem FIRAS- Nachfolger COBE nach 1990 zeigen $T = 2,725$ K in jeder Richtung des Raumes. Einzige Anisotropie in der 4.Stelle:



$$v = (371 \pm 1) \text{ km s}^{-1}$$

in Richtung

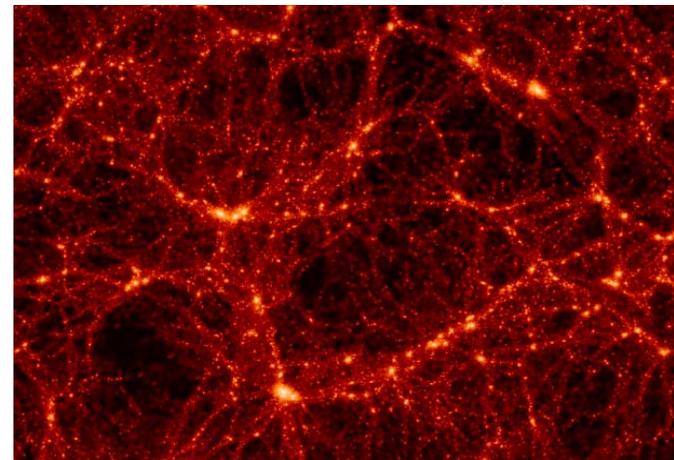
$$l = (264.3 \pm 0.2)^\circ, b = (48.1 \pm 0.1)^\circ$$

1990 war klar, wann sich γ und Materie entkoppelt haben, $(p, \text{He}) + e \rightarrow \text{Atome}$.
 $kT \approx 1 \text{ eV}$, $T \approx 10^4 \text{ K}$, $t \approx 4 \cdot 10^5 \text{ y}$.

Aus dieser Zeit stammt obiges Bild, bis auf den Dipol des Beobachters.

Wie entstehen aus homogener Materie

Galaxien & lokales „re-heating“ & Sterne? **Gibt es noch etwas im Vakuum?**



Wie kann so etwas entstehen?



etwas so Heißes in einem Universum, das sich immer weiter abkühlt?

Was muss dafür zusätzlich im Vakuum sein? Doch zuvor zur Antimaterie:

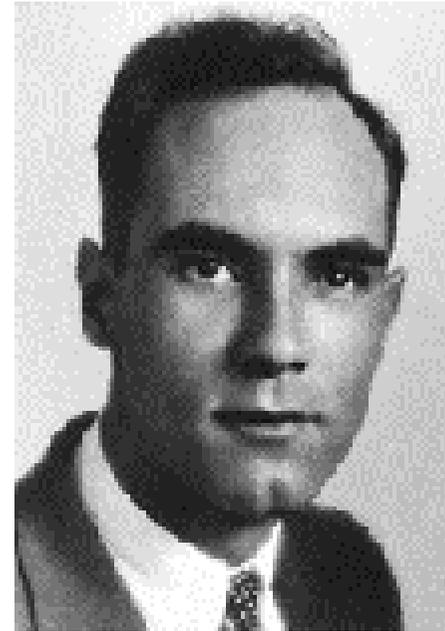
Die Entdecker der Antimaterie



Paul Adrien Maurice Dirac
(1902 – 1984)

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0, 1927$$

Nobelpreis 1933

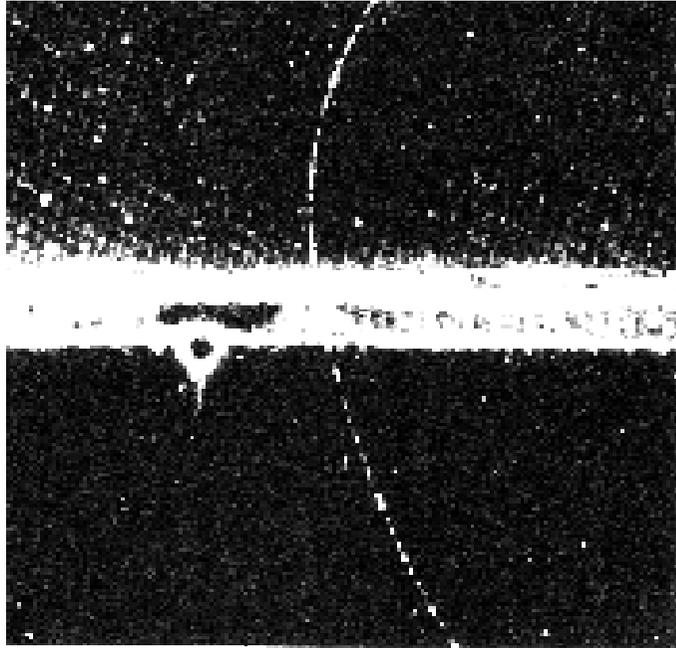
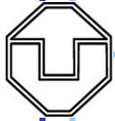


Carl D. Anderson
(1905 – 1991)

Positron, 1933

Nobelpreis 1936

Andersons erstes Positron 1933



Nebelkammer, Kamera

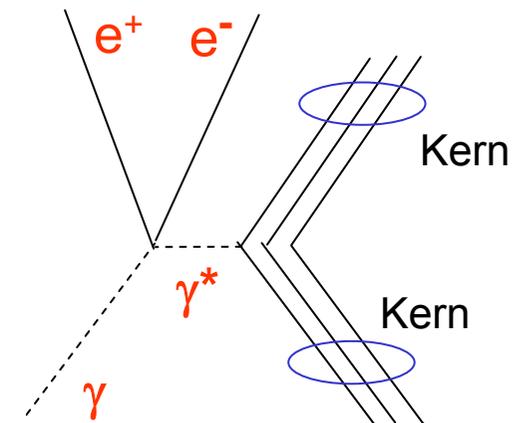
5 mm Blei

Tiefenschärfe \Rightarrow Bahn in der Bildebene,
B & Krümmung \Rightarrow p_1 & p_2 & **Ladung**,
Energieverlust & Ionisation \Rightarrow **Masse**.

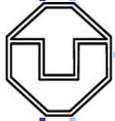
$q(e^+) = -q(e^-)$, $m(e^+) = m(e^-)$. Entstehung?

Für radioaktiven Zerfall zu hohe Energie.

Vermutlich Paarbildung durch γ hoher Energie
aus der Höhenstrahlung im Coulombfeld
eines Atomkerns umgebender Materie \Rightarrow



Bausteine und Antibausteine



e^-	1897	e^+	1933	Leptonen, Antileptonen
μ^-	1937	μ^+	1937	
τ^-	1975	τ^+	1975	
p	1911	\bar{p}	1955	Quarks, Antiquarks
u, d, s	1964	$\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$	1964	
c	1974	\bar{c}	1974	
b	1977	\bar{b}	1977	
t	1995	\bar{t}	1995	

Dies sind, außer p \bar{p} und bis auf die Neutrinos ν , alle elementaren Bausteine der Materie, die wir heute kennen, alle mit Spin $\frac{1}{2}$. Zu jedem Fermion gehört ein Antifermion mit $m(\bar{f}_i) = m(f_i)$ und $q(\bar{f}_i) = -q(f_i)$. Bei den drei ν ist noch unbekannt, ob sie ihre eigenen Antiteilchen sind oder nicht. Photonen sind ihre eigenen Antiteilchen, sind aber Bosonen mit Spin 1.

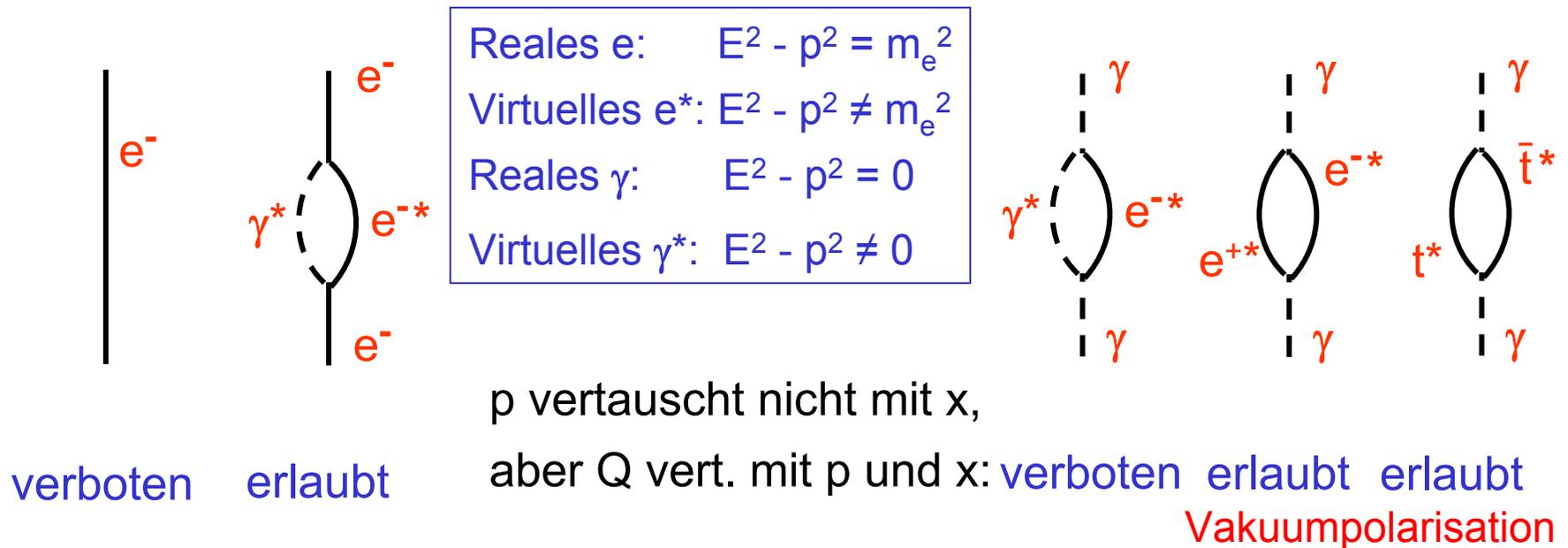
Antifermionen folgen notwendig aus der Kombination von Quantenmechanik für Fermionen und Spezieller Relativitätstheorie.

Durch Materie modifiziertes Vakuum

$$\frac{dw}{d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \right) \cdot h\nu$$

gilt im „leeren“ (Zwischen-)Raum weit weg von den Wänden. Wand-Bausteine erzeugen weitere Vakuumfluktuationen.

Ursache ist die gleiche: $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$. Das Vakuum verleiht Energie durch Erzeugung kurzlebiger Quanten und nimmt sie durch Vernichtung wieder zurück. Am einfachsten geht das mit den leichtesten Quanten γ und e :



erste gemessene Effekte von Quantenfluktuationen



1947 Kusch & Foley mit ESR: $a(e^-) = [g(e^-) - 2] / 2 = 0,001$

[Einstein & de Haas 1915, Stern & Gerlach 1921, Dirac 1928: $g(e^-) = 2$]

1949 Schwinger mit QED: $a(e^-) = \infty - \infty = \frac{\alpha}{2\pi} = 0,0012$

1984 Kinoshita: $a_{\text{QED}}(e^-) = \sum_1^4 C_n \cdot \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^n = 1159,651940 \cdot 10^{-6} \cdot (1 \pm 1,2 \cdot 10^{-7})$

1987 Dehmelt et al: $a_{\text{exp}}(e^-) = 1159,652188 \cdot 10^{-6} \cdot (1 \pm 3,4 \cdot 10^{-9})$

1947 Lamb & Retherford mit H-Atomen: $\Delta E (2s_{1/2} - 2p_{1/2}) = h \cdot 1,05 \text{ GHz}$

[Dirac 1928: $\Delta E = 0$]

1947 Bethe mit virtuellen Photonen: $\Delta E = \infty - \infty \approx \frac{\alpha^5 m_e c^2}{12} = h \cdot 2 \text{ GHz}$

Größenordnung und Vorzeichen richtig

Heute mit virtuellen Photonen und virtuellen e^+e^- -Paaren:

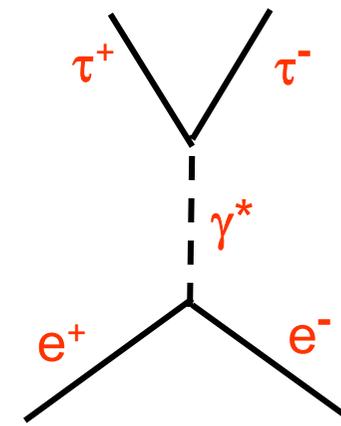
Übereinstimmung mit der durch Proton-Struktur begrenzten Genauigkeit.

wie aus virtuellen Teilchen reale werden

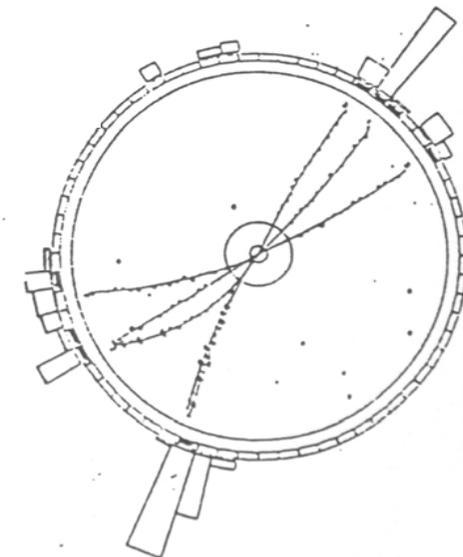
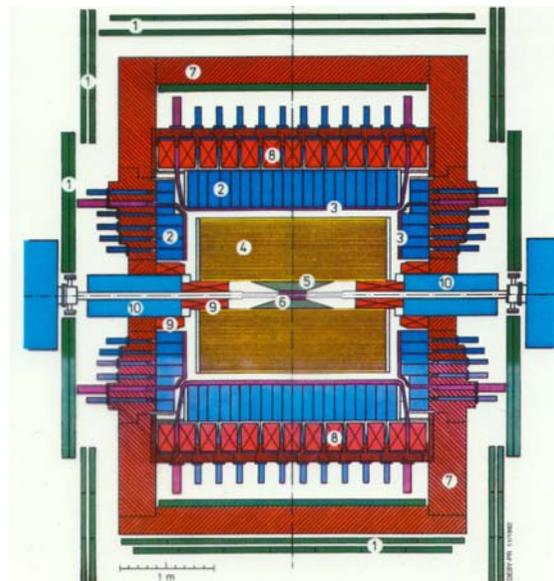
Theorem oder naive Vorstellung: Das Vakuum enthält virtuell **alle** Teilchen, die es in der Natur gibt, d. h. außer den uns bekannten alle, die noch zu finden sind.

Entdeckung durch Zufuhr hoher Energie in kleinen Vakuumbereich. Energie-Änderung kann aus virtuellem Teilchen reales machen.

„Sauberste“ Methode $e^+ - e^-$ -Vernichtung:



1975
M. Perl
(SLAC)
Nobelpr.
1995



zurück zum Teichenzoo: g + W + Z

e^-	1897	e^+	1933	Leptonen, Antileptonen
μ^-	1937	μ^+	1937	
τ^-	1975	τ^+	1975	
ν_{eL}	1965	ν_{eR}	1956	Neutrinos, D. oder M. ?
$\nu_{\mu L}$	1962	$\nu_{\mu R}$	1962	
$\nu_{\tau L}$	1999	$\nu_{\tau R}$	1999	
u,d,s	1964	$\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$	1964	Quarks, Antiquarks
c	1974	\bar{c}	1974	
b	1977	\bar{b}	1977	
t	1995	\bar{t}	1995	
				$Q = \pm 1, 0, \pm 2/3, \pm 1/3.$

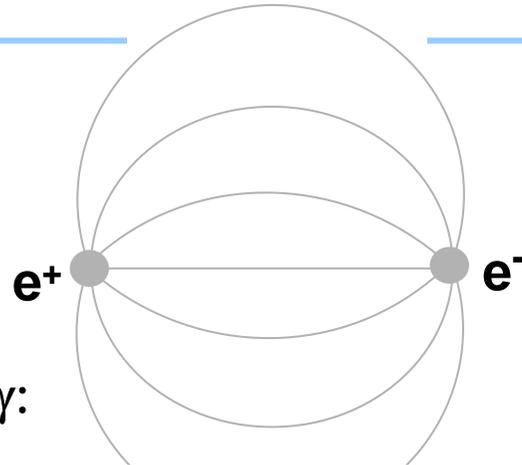
Außer den Fermionen mit $S = \frac{1}{2}$ in 3 Familien mit je 8 oder 7 Mitgliedern haben wir bisher 12 Bosonen mit $S = 1$ ($\gamma + 8 g + Z + 2 W$) entdeckt.

Die Vielfalt an Bausteinen und Kräften ist nicht Inhalt dieser Vorlesung, hier nur noch zwei Beispiele aus der e^+e^- -Vernichtung, die zeigen, was wir alles lernen können, wenn wir hohe Energie ins Vakuum einbringen.

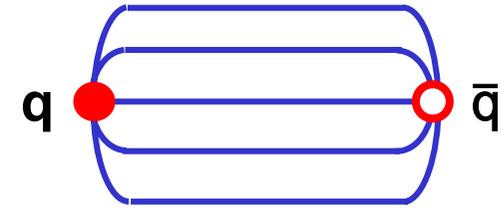
Wie Jets die Realität von Quarks zeigen



Eichtheorie
der el. Ww.
enthält
ungeladene γ :

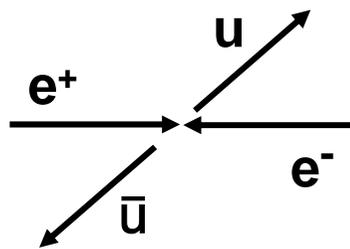


Eichtheorie
der st. Ww.
enthält farb-
geladene g :



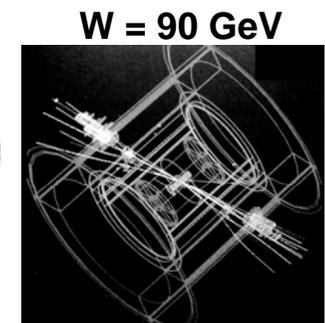
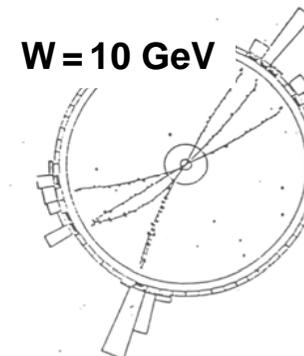
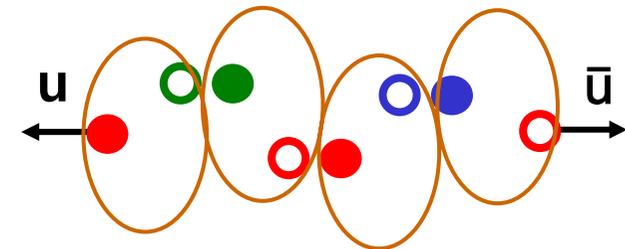
Konsequenzen \Rightarrow

- 1) Außer zerfallenden t-Quarks sind keine freien q beobachtbar. Energiezufuhr erzeugt weitere $q\bar{q}$ -Paare, z. B. $u\bar{d} + \text{Kern} \rightarrow u\bar{s} + s\bar{d} + d\bar{d} + \text{Kern}$.
- 2) In e^+e^- -Vernichtung erzeugte reale Quarks zeigen sich als „Jets“. Feld



zwischen u und \bar{u} ist W -reich,
holt reale $q\bar{q}$ - Paare aus dem
Vakuum, $\langle n_{q\bar{q}} \rangle \sim \ln W$. Feld
hat W -unabh. Breite $\Delta x \sim 1 \text{ fm}$,

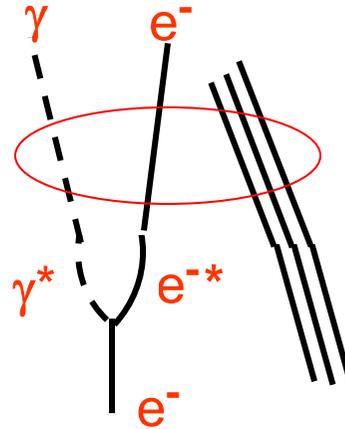
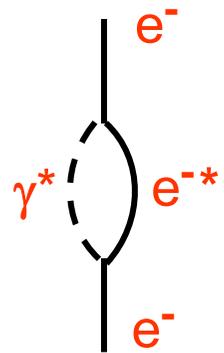
$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar$, $p_x = 0 \pm 200 \text{ MeV}/c$, unabh. von W ,
 $|p_z|$ viel größer, deshalb Ausbildung von 2 Jets.



... und die von Gluonen

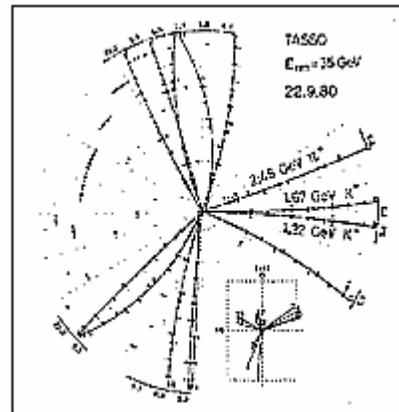
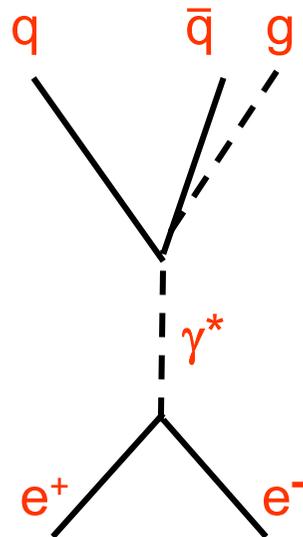


Röntgen
1895:



$e + \text{Kern} \rightarrow e + \text{Kern} + \gamma$

PETRA
@ DESY
1979:



W = 35 GeV

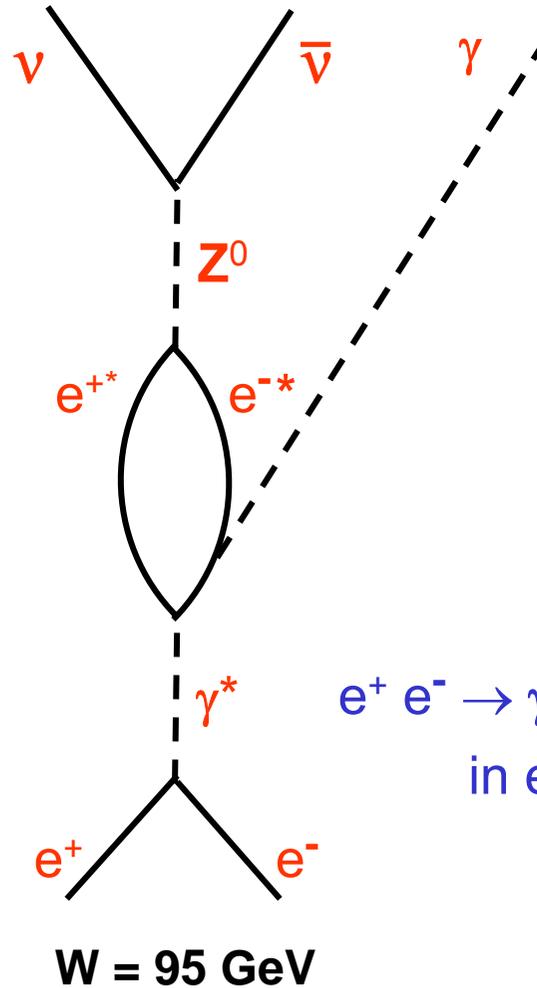
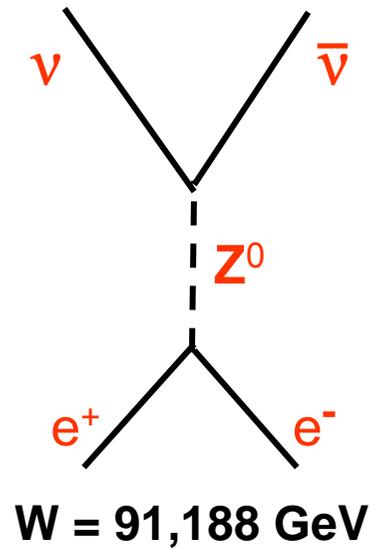


Kein Nobel-,
nur ein EPS-Preis

Wie wir Neutrinos aus dem Vakuum holen können



LEP
@ CERN
~ 1992:



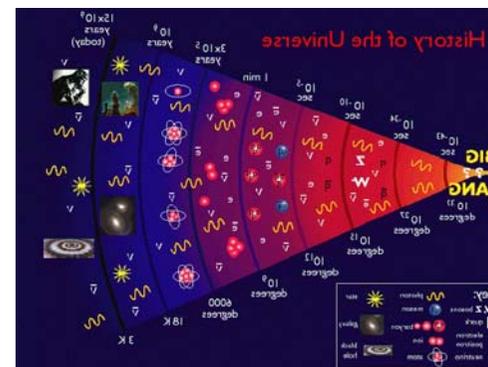
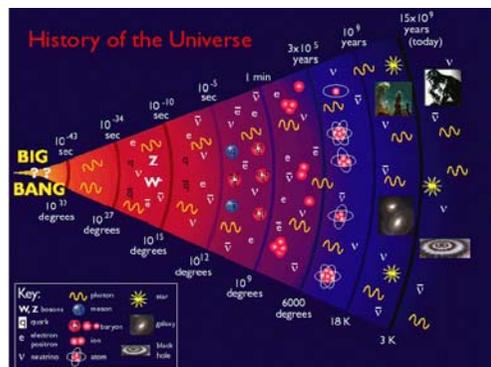
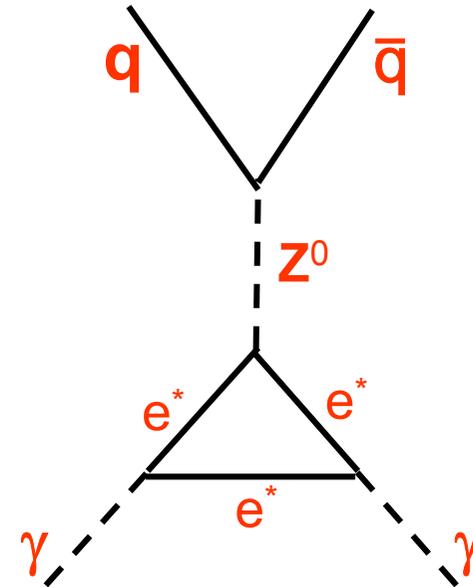
Ereignisse
 $e^+ e^- \rightarrow \gamma(4,8 \text{ GeV}) + \text{„nichts“}$
in erwarteter Häufigkeit
beobachtet.

Auch ein heißes Vakuum produziert reale Teilchen

Mit $W = 92 \text{ GeV}$ können wir virtuelle Z^0 aus dem Vakuum in reale Z^0 verwandeln.

Aufheizen der Hintergrundstrahlung von $2,7 \text{ K}$ auf 10^{15} K bewirkt das gleiche:

Aufheizen um weiteren Faktor 10 würde uns höchstwahrscheinlich neue Teilchen finden lassen. Nach heutigem Wissen wird uns das Universum diesen Gefallen mit Hilfe von Gravitation leider nicht mehr tun.



Higgs-Feld H und Higgs-Teilchen h



Diese Komponenten des Vakuums bleiben Spekulation, solange h mit $100 \text{ GeV} < m_h < 1 \text{ TeV}$ nicht gefunden ist.

Das St. Modell braucht sie, um Teilchenmassen und Eichfeld-Beschreibung der Schwachen Wechselwirkung simultan zu ermöglichen.

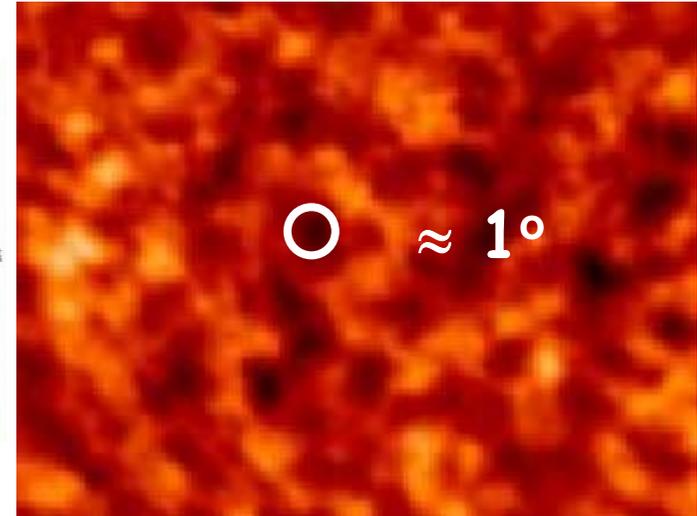
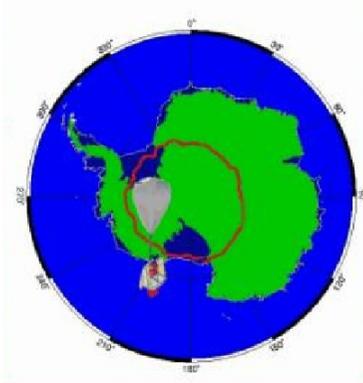
Im heißen Vakuum ($T > m_h$) soll ein Feld (H_1, H_2) mit $S=0$ und $I=1/2$ existieren, das - übrigens CP-verletzend - an fast alle anderen Felder koppelt. Bei Abkühlen auf $T \approx m_h$ wird die Rotations-Symmetrie im I-Raum gebrochen, $(H_1, H_2) \rightarrow (H_0, 0) + h$, weil das Vakuum mit gebrochener Symmetrie weniger Energie enthält als ohne. **Mit nur H_0 , ohne h, geht das wg $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$ nicht.**

Konstante H_0 erzeugt Massen; h ist ein beobachtbares quantisiertes Feld.

Außer Existenz und Masse ist von h alles bekannt. Es koppelt an alle Teilchen mit $m \neq 0$ und die Kopplungsstärken sind zu m proportional.

Warten auf LHC. Vorsicht: An die ν koppelt h nur, wenn sie Dirac-Teilchen sind ($\nu \neq \bar{\nu}$), nicht im Fall von Majorana-Neutrinos ($\nu = \bar{\nu}$).

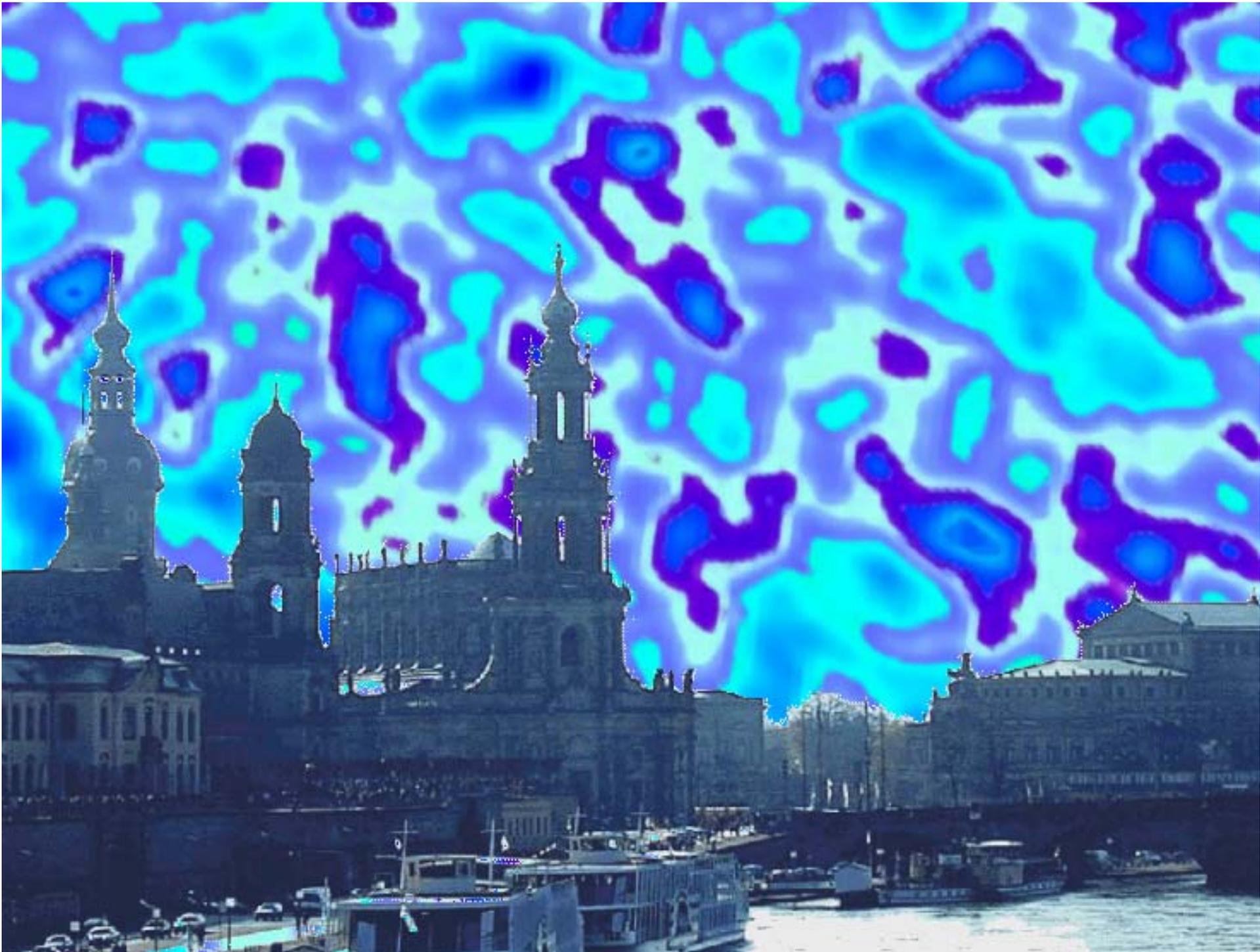
Dunkle Materie und Dunkle Energie



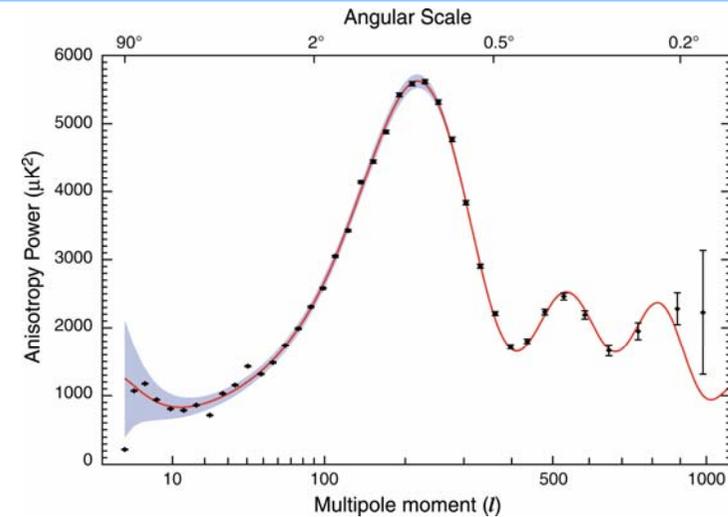
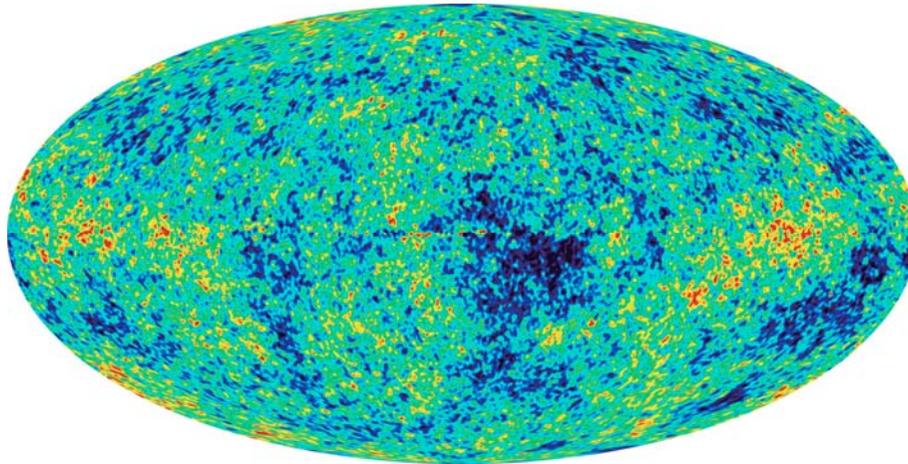
Das Experiment Boomerang misst 2000 mit Präzisions-Bolometern T der kosm. Hintergrundstrahlung in allen Richtungen: **Anisotropie $\Delta T/T = o(10^{-5})$**

Schlüsse aus dem gemessenen Winkelspektrum:

- $w_{\text{tot}} \approx w_{\text{krit}} = \frac{3c^2 H_0^2}{8\pi G_N} \approx 10^{-29} \text{g cm}^{-3} c^2$. **Die Vakuum-Geometrie ist euklidisch.**
- w (Materie mit el. Ladungen) = $w_b \approx 0,05 \cdot w_{\text{krit}}$.
- w (Materie) = $w_m \approx 0,25 \cdot w_{\text{krit}}$. **Differenz $w_m - w_b = ? = w_{\text{dm}} = \text{Dunkle Materie.}$**
- $w(\gamma) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot w_{\text{krit}}$. Rest mit $w \approx 0,75 \cdot w_{\text{krit}} = ??? = w_{\text{de}} = \text{Dunkle Energie.}$**



Etwas genauer: WMAP-Daten vom 20.3.06



Fit kosmologischer Parameter an diese Daten + 2dF + SNLS + ...

$$w_{\text{tot}}/w_{\text{krit}} = 0,990^{+0,016}_{-0,009}$$

$$w_m/w_{\text{krit}} = 0,262 \pm 0,016$$

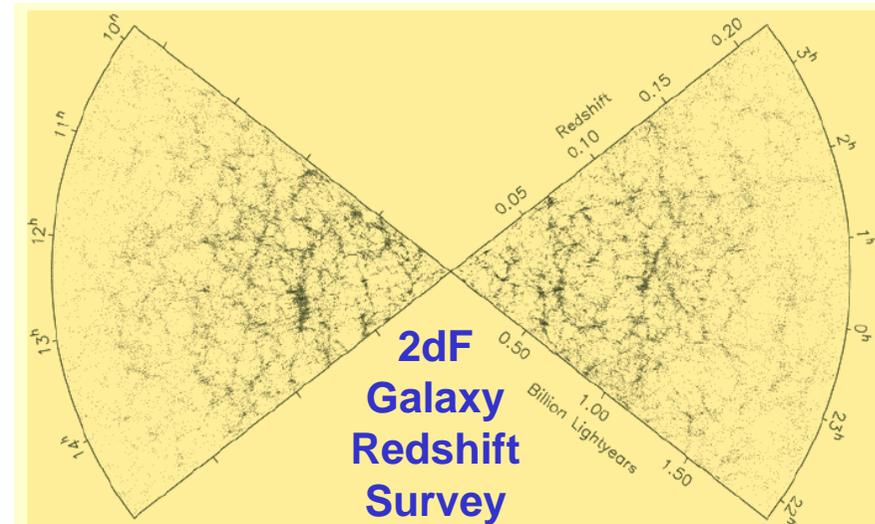
$$w_b/w_{\text{krit}} = 0,044 \pm 0,002$$

$$w_{\text{dm}} = w_m - w_b = (0,218 \pm 0,016) w_{\text{krit}}$$

$$w_{\text{de}} = w_{\text{tot}} - w_m = (0,74 \pm 0,02) w_{\text{krit}}$$

$$H_0 = (70,8 \pm 1,6) \text{ km/s/Mpc}$$

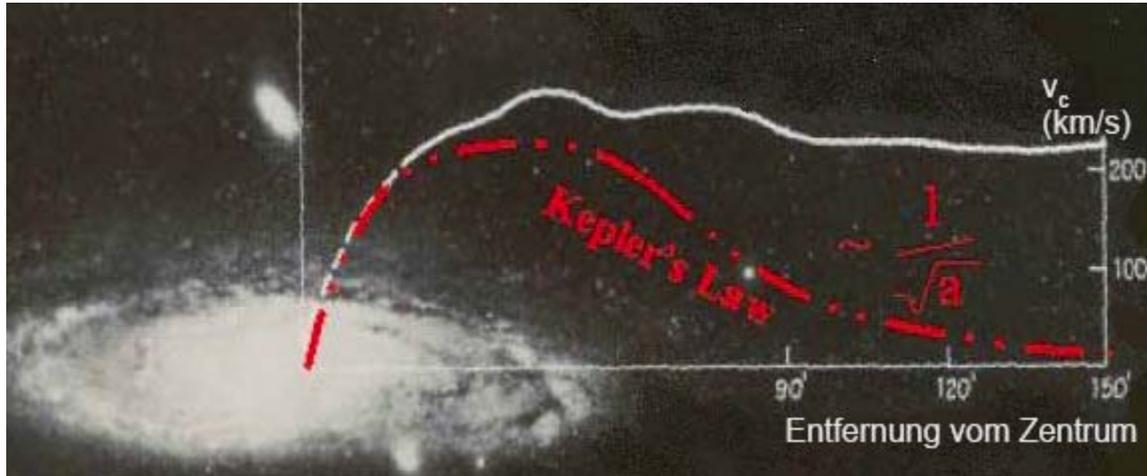
$$t_0 = (13,84 \pm 0,14) \text{ Gy}$$



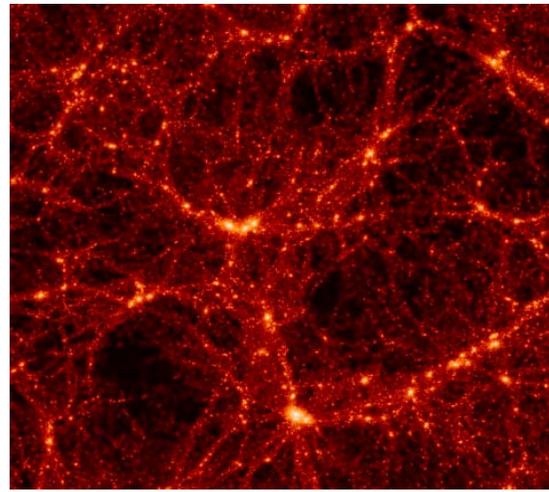
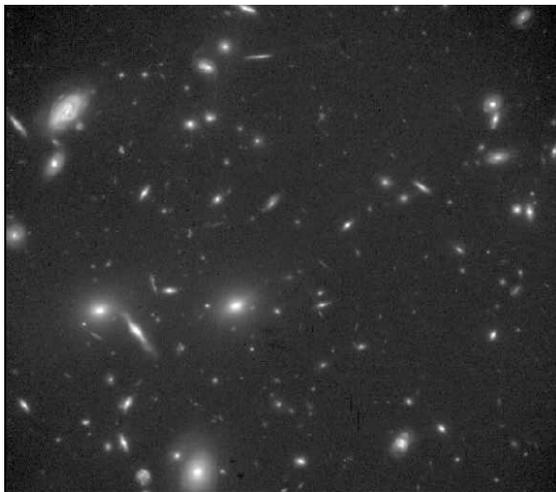
Was ist Dunkle Materie?



Dunkle Materie: 2000 nichts Neues



~ 1930 Oort und Zwicky:
Stern-Bewegung am
Galaxienrand zu schnell.
~ 1970 Bosma: Gleiches
für 21-cm-H außerhalb.



~ 1990: das gleiche für
Galaxienbewegung in
Galaxienhaufen.
~ 1995 White (MPA) u.a.:
Bildung großräumiger
Strukturen erfordert
kalte dunkle Materie

Kandidaten dunkler Materie

Begriffsklärung: dm ist Materie in Form von Teilchen, die gravitativ, aber nicht elektrisch wechselwirken. Sie ist nicht gleichmäßig im Raum verteilt, sondern klumpt. Sie muss noch heute in unserem Vakuum enthalten sein. In der Geschichte des Universums verstärkt sie früher ($\sim 1 \cdot 10^9$ y n. U.) die Anisotropie des Vakuums als die H+e -Materie. Mit nur dieser, ohne dm, würde die Sonne erst \sim heute anfangen zu scheinen.

Solche Teilchen gibt es im Zoo der Teilchenphysiker: Neutrinos.

Im heißen Vakuum waren sie bis ~ 1 s n. U. im thermischen Gleichgewicht mit allen anderen, deshalb Anzahl bekannt, heute $330/\text{cm}^3$. Falls dm nur ν :

$$\bar{W}_\nu(\text{heute}) \approx 1 \text{ eV}, \quad \bar{m}_\nu \leq 1 \text{ eV}, \quad \bar{W}_\nu(1 \text{ Gy n.U.}) \approx 6 \text{ eV}, \quad \bar{\beta}(1 \text{ Gy n.U.}) \geq 0.98$$

Für S. White und alle anderen Strukturbildungs-Simulierer viel zu schnell!

Struktur- & Sternbildung braucht „Kalte“ (d.h. langsame) Dunkle Materie.

Teilchenphysiker haben sowas in ihrem virtuellen Zoo: **Supersymmetrie.**

Suche nach su.sy. Teilchen am LHC so wichtig wie die nach dem Higgs.

Dunkle Energie



Begriffsklärung: w_{de} ist eine Eigenschaft des Raumes. Sie ist gleichmäßig über den Raum verteilt und klumpt nicht. Im Gegensatz zu w_{γ} , w_b , w_{dm} , w_v , die mit der Expansion des Universums kleiner werden, ist $w_{de} \approx$ konstant.

Spekulationen über die Natur der w_{de} : hier keine. Nur eine Vermutung:
Es könnte sehr schwer werden, über die Natur der w_{de} experimentelle Fakten zu sammeln.

Weitere Vermutung: Es könnte sein, dass wir w_{de} nicht nur für

- 1) die euklidische Geometrie des Raumes brauchen, das Winkelspektrum der kosmischen Mikrowellenstrahlung hat sein Maximum bei $\approx 1^\circ$, sondern auch für
- 2) die Kompensation der (unendlichen?) Energiedichte des elmag. Feldes im Vakuum zu ≈ 0 . Dies kann durch andere Felder geschehen wie z. B. Supersymmetrie und (?) durch eine Eigenschaft des Raumes selbst.

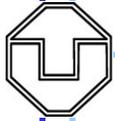
Zusammenfassung: was mindestens alles im Vakuum ist



1) **heute:** Reste von Atomen ($10^4/\text{cm}^3$ im Labor, $1/\text{cm}^3$ interstellar) und von Wärmestrahlung ($T=2,7\text{ K}$, $410\ \gamma/\text{cm}^3$), wahrscheinlich $330\ \nu/\text{cm}^3$, weiterhin Nullpunktsfluktuationen des E-Feldes (Casimir-Effekt) und aller anderen bekannten Felder („virtuelle“ g , W , Z , 6ℓ , $6\bar{\ell}$, $6q$, $6\bar{q}$), mit großer Wahrscheinlichkeit ein konstantes Hintergrundfeld mit Spin 0 und 0-Fluktuationen von dessen Restfeld (h) nach Symmetriebrechung, unbekannte reale Quanten (Dunkle Materie) und deren 0-Fluktuationen, und dazu eine **messbare** Eigenschaft des (?) Raumes (Dunkle Energie).

Die mittlere Gesamtenergie muss $\approx \frac{3c^2 H_0^2}{8\pi G_N} \approx 10^{-29}\text{ g cm}^{-3}\text{ c}^2$ sein.

2) **etwas früher:** alles wie heute (auch das, was in obiger Auflistung fehlt) und je nach T reale Quanten aller geladenen Felder i mit $2m_i < T$ und aller neutralen Felder j mit $m_j < T$.



Herzlichen Dank

für Ihre Aufmerksamkeit!

Den roten Faden für diese Vorlesung - und auch Details -
habe ich zwei Büchern von Henning Genz entnommen:

„Die Entdeckung des Nichts“ 1994, [zum Verschenken](#),

„Nichts als das Nichts“ 2004, [zum Selberlesen](#).