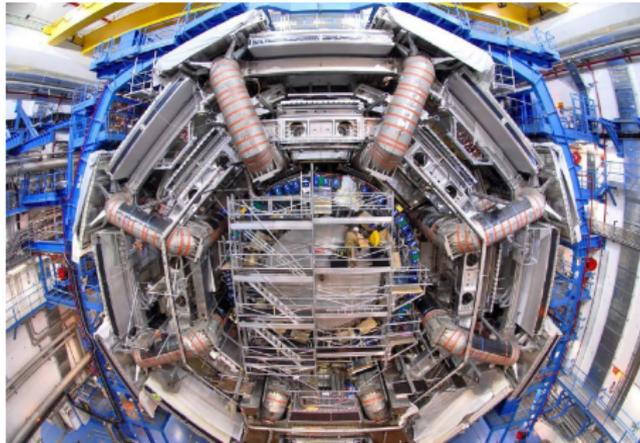


Teilchenphysik mit höchstenergetischen Beschleunigern (Tevatron und LHC)



V2: Teilchenphysik, offene Fragen und aktuelle Projekte

23. Oktober 2007

Richard Nisius (MPP München)

nisius@mppmu.mpg.de

TU München, WS 07/08, S. Bethke und R. Nisius

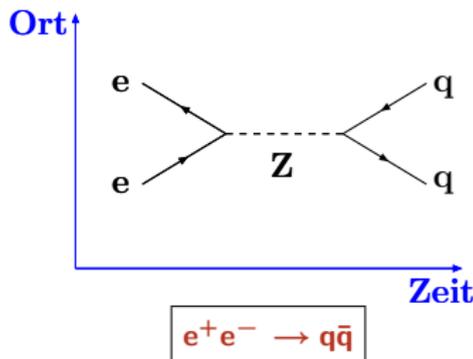


Vorlesungsthemen

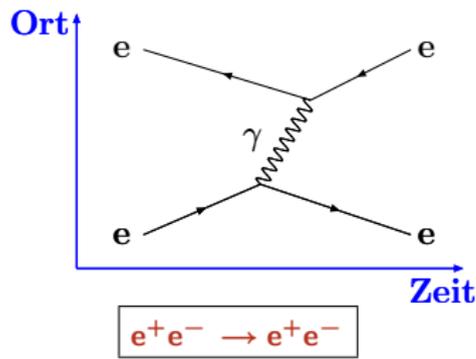
- | | | |
|-----|---|-----------------|
| 1. | Einführung: Stand der Teilchenphysik | 16.10.07 |
| 2. | Teilchenphysik: offene Fragen und aktuelle Projekte | 23.10.07 |
| 3. | Hadronenbeschleuniger: Tevatron und LHC | 30.10.07 |
| 4. | Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (I) | 06.11.07 |
| 5. | Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (II) | 13.11.07 |
| 6. | Trigger, Datennahme und Computing | 20.11.07 |
| 7. | Monte Carlo Generatoren und Detektor Simulation | 27.11.07 |
| 8. | QCD, Jets, Strukturfunktionen | 04.12.07 |
| 9. | Standard Modell Tests | 11.12.07 |
| 10. | CP-Verletzung | 18.12.07 |
| |  | |
| 11. | Top-Quark Physik | 08.01.08 |
| 12. | Suche nach dem Higgs-Boson | 15.01.08 |
| 13. | Supersymmetrie | 22.01.08 |
| 14. | Andere Erweiterungen des Standard Modells | 29.01.08 |
| 15. | Ausblick & Zukunftsprojekte | 05.02.08 |

Wechselwirkungen im Standardmodell

Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption

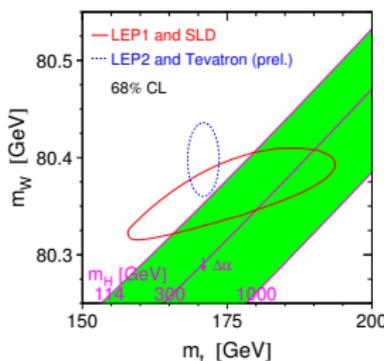
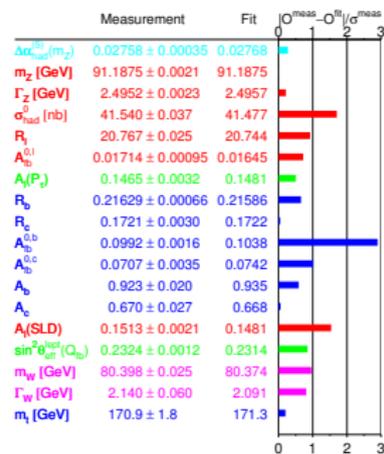


Das mathematische Konzept

- Eine Kombination von Eichgruppen: $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$ mit lokaler Eichinvarianz, und drei Kopplungskonstanten: $\alpha_1 = \frac{5}{3} \left(\frac{e}{\cos \theta_W} \right)^2$, $\alpha_2 = \left(\frac{e}{\sin \theta_W} \right)^2$ und $\alpha_3 = \alpha_s$.

Zur Beschreibung der Wechselwirkungen genügen vier fundamentale Vertices.

Das Standardmodell - seine Stärken



Eine Erfolgsgeschichte

(Stand 2007)

- Daten und Theorie stimmen perfekt überein.
- Messungen auf sub Promille Genauigkeit, z.B.
 $m_Z = (91.1875 \pm 0.0021)$ GeV entspricht 0.02 Promille!!

Konsistenz direkter und indirekter Messungen

- Direkt: $M_W = (80.398 \pm 0.025)$ GeV
- Indirekt: $M_W = (80.360 \pm 0.020)$ GeV
- Direkt: $M_t = (170.9 \pm 1.8)$ GeV
- Indirekt: $M_t = (172.6^{+13.2}_{-10.2})$ GeV

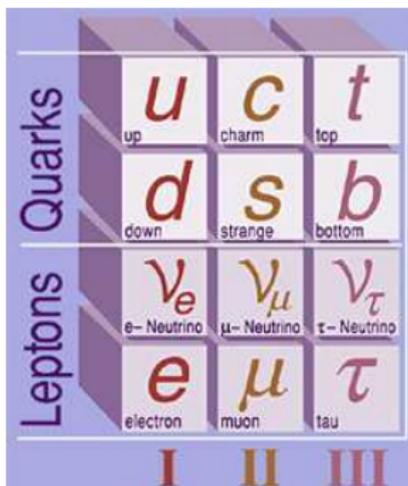
Higgs erlaubter Bereich

- Best fit: $M_H = 76^{+33}_{-24}$ GeV mit 68% CL
- Oberes Limit: $M_H < 144$ GeV mit 95% CL

Also warten wir auf die Entdeckung des Higgs-Bosons und schliessen danach das Buch?

Das Standardmodell - seine Schwächen

Bekannte Generationen

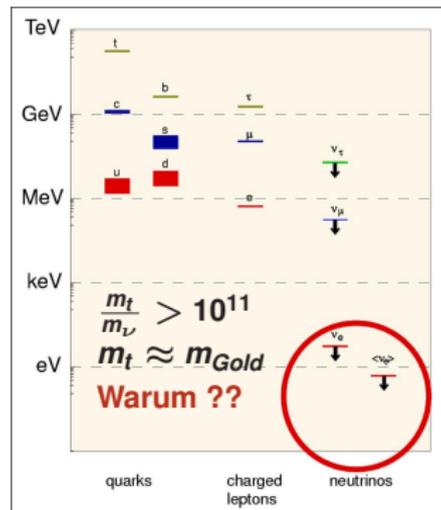


- Aus $Z \rightarrow \nu\bar{\nu} \Rightarrow$ es gibt nur drei, an das Z koppelnde, leichte Neutrinos.
- Warum drei Generationen ?
- $\Sigma Q = 0 + (-1) + 3 \cdot \frac{-1}{3} + 3 \cdot \frac{2}{3} = 0$, gut zur Vermeidung der Dreiecksanomalie, aber warum?
- Gibt es eine 4. Generation mit $m_\nu > \frac{1}{2} m_Z$?

Baryon-Anti-Baryon Asymmetrie

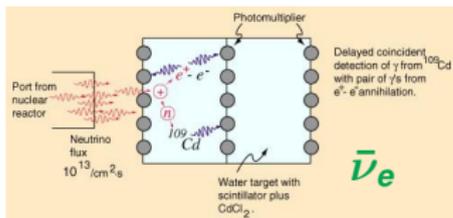
- $g \rightarrow q\bar{q}$ und $\gamma \rightarrow q\bar{q}$, $\Sigma B \equiv 0!$
Wo ist die fehlende Antimaterie?

Merkwürdige Massenhierarchie



Es bleiben viele offene Fragen.

Zur Erinnerung - die drei Flavour-Eigenzustände



– Pauli (1930):

Neutrino-Postulat

– Cowan et al. (1956):

$\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$

– Danby et al. (1962):

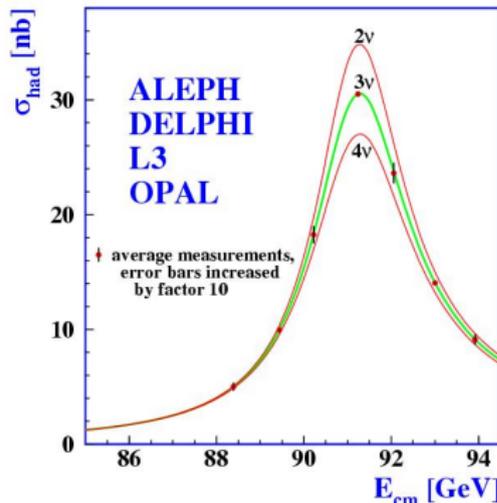
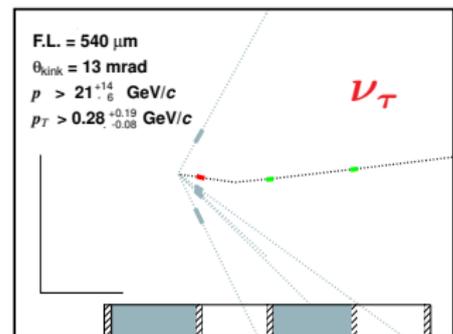
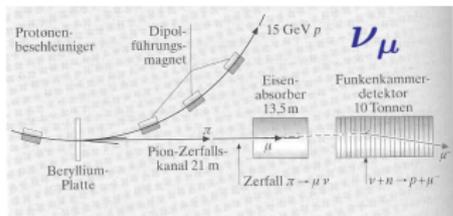
$\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p + X$

– LEP (1990):

$N(\nu_W) \equiv 3$, mit $m_{\nu_W} < m_Z/2$

– DONUT (2000):

$\nu_\tau \rightarrow \tau^- + X$



Im SM gibt es drei leichte Flavour-Eigenzustände.

Die Massen- und Flavour-Eigenzustände

- Die Flavour-Eigenzustände sind Superpositionen der Massen-Eigenzustände:

$$|\nu_\alpha\rangle \equiv \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad \text{mit} \quad \alpha = e, \mu, \tau \quad \text{und} \quad i = 1, \dots, N.$$

- Drei Flavour

$$\Rightarrow \text{MNS-Matrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad \text{mit} \quad U = U_{23} U_{13} U_{12}$$

- Die Ausbreitung in Raum und Zeit wird durch die Massen-Eigenzustände bestimmt.

Wählt man $\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{r}$ und benutzt $m_i \ll p_i \equiv p \approx E$ und $v = c$ so folgt

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p_i + \frac{m_i^2}{2E}, \quad \text{und damit} \quad |\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \vec{p}\vec{r})} |\nu_i(0)\rangle = e^{-i \frac{m_i^2 t}{2E}} |\nu_i(0)\rangle.$$

- Die Wechselwirkung mit Materie ist durch die Flavour-Eigenzustände gegeben.

Ein Beispiel ist die Neutrino-Elektron Streuung: $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$.

- Die Wahrscheinlichkeit ein Neutrino, das zur Zeit $t = 0$ als α gestartet ist, im Zustand β zu finden ist: $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 = |\sum_i U_{\beta i}^* e^{+i \frac{m_i^2 t}{2E}} U_{\alpha i}|^2 \cdot |\langle \nu_i | \nu_i \rangle|^2$

- Dieser Effekt ist analog zu den Oszillationen pseudoskalarer Mesonen und wird als Neutrino-Oszillation bezeichnet.

Die Suche nach Neutrino-Massen ist ein sehr weites experimentelles Feld.

Neutrino-Oszillationen - der Zwei-Flavour Fall

- Im Zwei-Flavour Fall, z.B. ν_e, ν_μ reduziert sich die Maki-Nakagawa-Sakata Matrix auf:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}.$$

- Die Wahrscheinlichkeit ein zur Zeit $t = 0$ z.B. als ν_e in der Sonne gestartetetes Neutrino zur Zeit t , also z.B. auf der Erde, auch als ν_e wiederzufinden, ergibt sich aus:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e(t) | \nu_e(0) \rangle|^2 = 1 - \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right)$$

- Damit ist die Oszillationswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right)$$

- Mit $200 \text{ MeVfm} \equiv 1$ folgt $1/\text{eV} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Damit ergibt sich aus der Oszillationslänge $L = \pi \frac{4E}{\Delta m^2}$ das L über E Verhältnis:

$$\frac{L/\text{km}}{E/\text{GeV}} = \frac{2.5}{\Delta m^2/\text{eV}^2}$$

Das Verhältnis L/E bestimmt die Sensitivität auf verschiedene Massenbereiche.

Natürliche und künstliche Neutrinoquellen

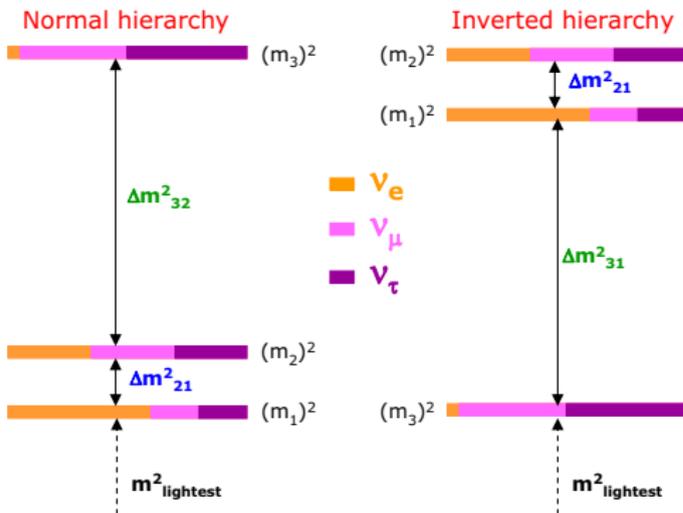
– Die Hauptquellen von Neutrinos sind:

- 1) **Atmosphärische Neutrinos** ($\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$): Die Erdatmosphäre wird ständig von hoch-energetischer kosmischer Strahlung getroffen. Diese Strahlung besteht vornehmlich aus Photonen und Protonen, aber auch aus schweren Kernen. Beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre in $\mathcal{O}(10)$ km Höhe entwickeln sich hadronische Schauer. Die Neutrinos entstehen hauptsächlich durch den Pion-Zerfall, $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \bar{\nu}_\mu^{(-)}$ und $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \bar{\nu}_\mu^{(-)} \nu_e^{(-)}$.
- 2) **Sonnen-Neutrinos** (ν_e): Bei der Wasserstofffusion in der Sonne entstehen Neutrinos in der Reaktion $4p \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$.
- 3) **Supernova-Neutrinos** ($\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$): Bei einer Supernova-Explosionen wie der Explosion der SN1987A gibt es einen sehr kurzern Ausbruch von Neutrinos aller Sorten.
- 4) **Natürliche Radioaktivität** ($\nu_e, \bar{\nu}_e$): In den Beta-Zerfällen der Kerne wie ${}^3_1\text{H}$, ${}^{187}_{75}\text{Re}$ oder ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ entstehen ν_e und $\bar{\nu}_e$.
- 5) **Beschleuniger-Neutrinos** ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$): Durch Beschuss von Be- oder Al-Targets mit Protonen werden Pionen und Kaonen erzeugt. Aus deren Zerfällen erhält man ν_μ und $\bar{\nu}_\mu$ mit einer geringen Beimischung von ν_e und $\bar{\nu}_e$ aus $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \bar{\nu}_e^{(-)}$ Zerfällen.
- 6) **Reaktor-Neutrinos** ($\bar{\nu}_e$): In den Beta-Zerfällen schwerer Kerne im Kernreaktor entstehen Elektron-Antineutrinos, $\bar{\nu}_e$.

Die verschiedenen Quellen und Experimente testen verschiedene Phasenraumbereiche.

Der Stand der Dinge

(S. Brice EPS2007)



- Aus **Sonnen- ν** (SNO, ...) verifiziert mit **Reaktor- ν** (Kamland, ...)

$$\Delta m^2_{21} = (7.0 - 9.1) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \vartheta_{12} = 0.34 - 0.62$$

- Aus **Atmosphärischen- ν** (Super-Kamiokande, ...) verifiziert mit **Beschleuniger- ν** (K2K, ...)

$$\Delta m^2_{32} = (1.9 - 2.98) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \vartheta_{23} = 0.49 - 2.2$$

- Aus **Reaktor- ν** (CHOOZ, ...)

$$\sin^2 \vartheta_{13} \leq 0.045$$

- Aus **Tritium Beta-Zerfalls- ν** (Mainz, ...)

$$\text{Min}(m_i) < 2.2 \text{ eV}$$

- Aus Unitarität folgt: e.g. $\sum_i |U_{ei}|^2 = 1$

Dieses Muster erklärt die Beobachtungen durch Neutrino-Oszillationen.

Die CP-Verletzung im frühen Universum

- Wir leben in einem Universum, in dem es mehr Baryonen als Antibaryonen gibt.
- Im Big-Bang, im thermischen Gleichgewicht, sind Teilchen und Antiteilchen in gleicher Anzahl entstanden. Damit muss es einen Effekt geben, der diese Asymmetrie erzeugt hat.
- Sakharov hat 1967 drei Bedingungen für die Entstehung dieser Asymmetrie aufgestellt:
 - 1) Die Existenz Baryonenzahl-verletzender Zerfälle.
 - 2) Das Auftreten von Reaktionen die C- und CP-verletzend sind.
 - 3) Die Abweichung vom thermischen Gleichgewicht.
- Betrachten wir den Zerfall eines Teilchens X unter Änderung der Baryonenzahl, $\Delta B \neq 0$. Die Zerfallsrate sei $f = \Gamma(X \rightarrow Y(\Delta B))$ und damit $\bar{f} = \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{Y}(-\Delta B))$.
- Die Differenz der Baryonenzahl durch die Zerfälle von X und \bar{X} ist B_{net} mit:

$$B_{\text{net}} = f \cdot \Delta B + \bar{f} \cdot (-\Delta B) = (f - \bar{f}) \cdot \Delta B \Rightarrow B_{\text{net}} \neq 0 \text{ nur für } f \neq \bar{f} \text{ und } \Delta B \neq 0.$$
- Im thermischen Gleichgewicht ist die Lebensdauer des Gesamtsystems unendlich groß im Vergleich zu den Reaktionszeiten. Deswegen würde sich nach einiger Zeit, trotz der unterschiedlichen Zerfallsraten, die gleiche Population der Zustände Y und \bar{Y} einstellen.

Die CP-Verletzung ist essentiell zum Verständnis der Baryonenasymmetrie im Universum.

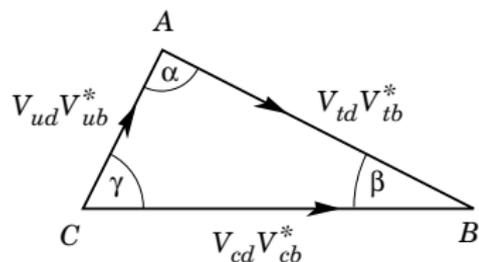
Von der CKM-Matrix zum Unitaritätsdreieck

– Unitarität: $V^\dagger V = \begin{pmatrix} V_{ud}^* & V_{cd}^* & V_{td}^* \\ V_{us}^* & V_{cs}^* & V_{ts}^* \\ V_{ub}^* & V_{cb}^* & V_{tb}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

- Die Darstellung einer Unitaritätsbedingung z.B.

$$V_{3k}^* V_{k1} = 0 = V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td}$$

in der komplexen Zahlenebene liefert ein Unitaritätsdreieck.



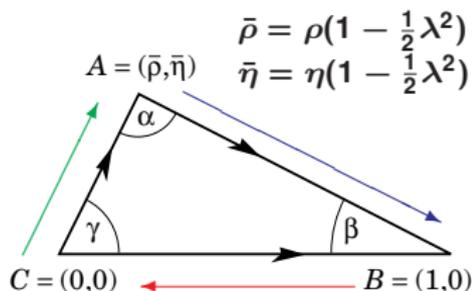
- In der Wolfenstein-Parametrisierung, entwickelt bis $\mathcal{O}(\lambda^5)$, lautet diese Unitaritätsbedingung:

$$A\lambda^3(\bar{\rho} + i\bar{\eta}) - A\lambda^3 + A\lambda^3(1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta}) = 0$$

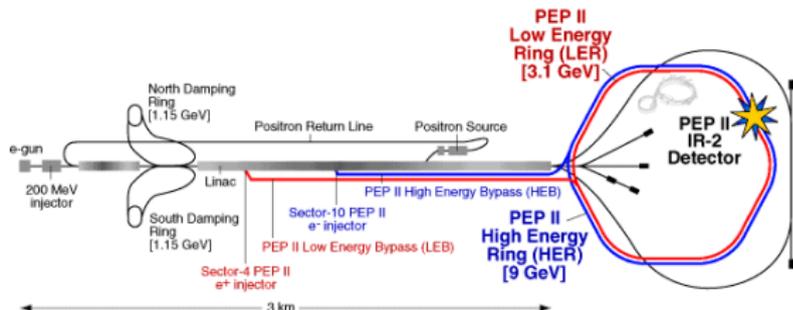
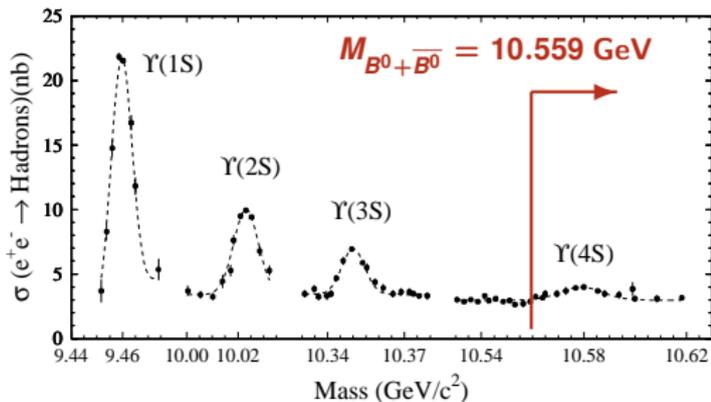
- Normiert man $V_{cb}^* V_{cd} = A\lambda^3$ auf 1 so folgt:

$$(\bar{\rho} + i\bar{\eta}) + (1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta}) - 1 = 0$$

Bei CP-Erhaltung sind die Dreiecksflächen Null.



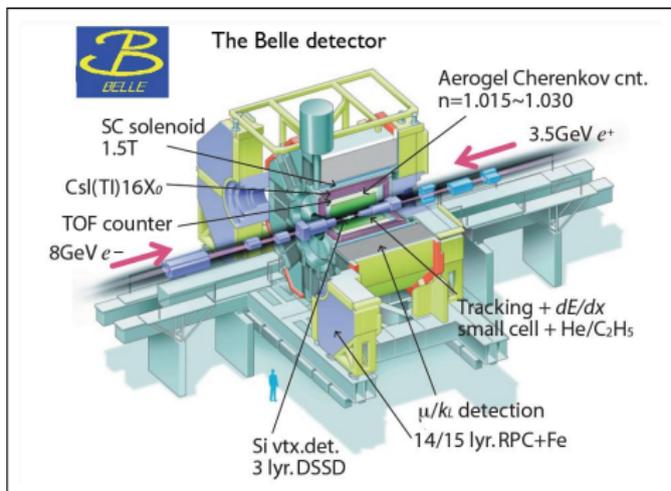
Der asymmetrische e^+e^- Beschleuniger PEP II am SLAC



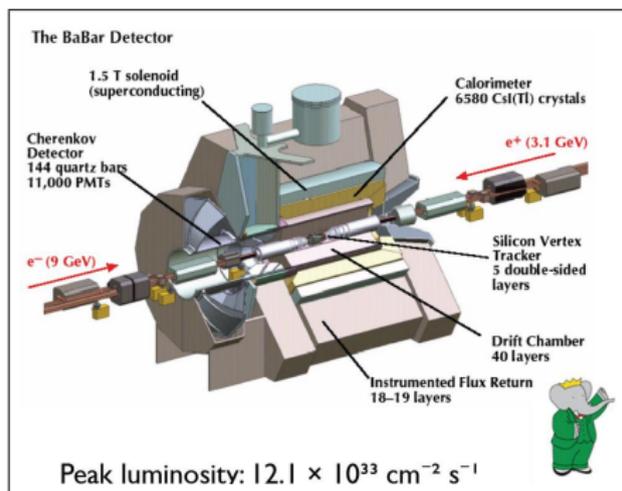
	PEP-II	KEK-B
E_{e^+} [GeV]	3.1	3.5
E_{e^-} [GeV]	9.0	8.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	460	710
$B^0 \bar{B}^0$ [10^6]	380	535

Experimente an asymmetrischen e^+e^- Speicherringen

Der Belle Detektor



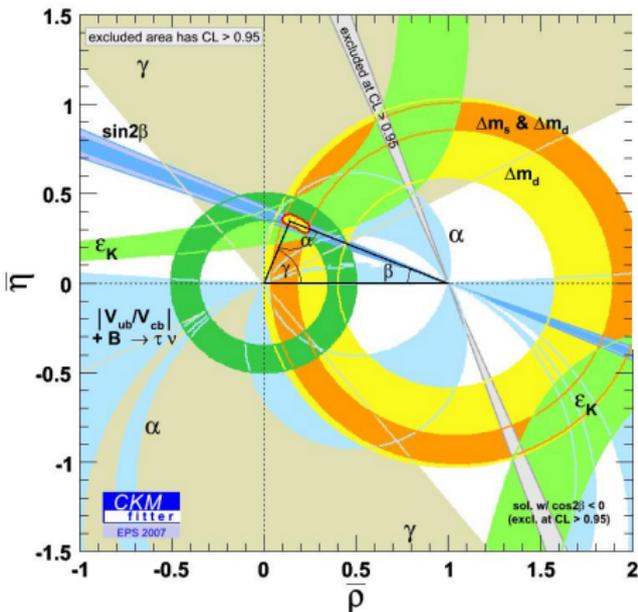
Der Babar Detektor



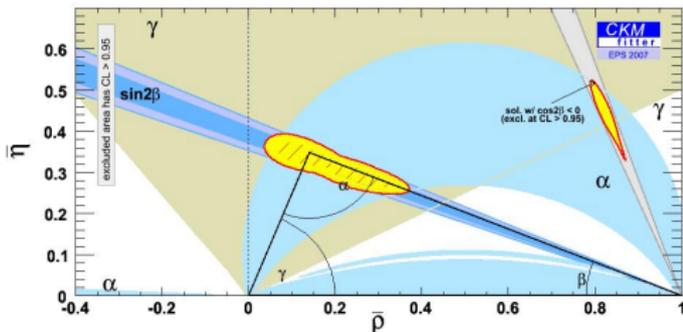
Diese beiden Experimente haben die CP-Verletzung im B-Sektor etabliert.

Ein Beispiel - das Resultat für $\sin 2\beta$

Das Unitaritätsdreieck ...



... mit der Lupe betrachtet



EPS Conference 2001

- $\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14 \pm 0.05$ (Babar)
- $\sin 2\beta = 0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$ (Belle)

EPS Conference 2007

- $\sin 2\beta = 0.668 \pm 0.028$ (Weltmittelwert)

Die Genauigkeit für $\sin 2\beta$ liegt mittlerweile bei 4%.

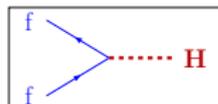
Das Standardmodell - Higgs

Das Higgs-Feld

- Skalares komplexes Dublett $\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix}$.
- Drei der vier Freiheitsgrade ergeben die longitudinalen Freiheitsgrade der W^\pm und Z-Bosonen, der vierte Freiheitsgrad liefert das skalare Higgs-Boson.

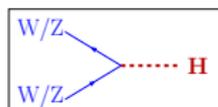
Die Kopplungen des Higgs-Bosons

- Die Yukawa Kopplung an Fermionen:



$$c_{\text{Hff}} = i \frac{m_f}{v}, \quad (v^2 = \frac{1}{G_F \sqrt{2}})$$

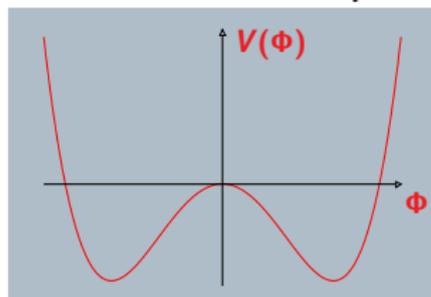
- Die Kopplung an W/Z - Bosonen:



$$\begin{aligned} c_{\text{HWW}} &= \frac{i}{2} (e \sin \theta_W)^2 v g_{\mu\nu} \\ &= i e \sin \theta_W m_W g_{\mu\nu} \\ c_{\text{HZZ}} &= c_{\text{HWW}} / (\cos \theta_W)^2 \end{aligned}$$

Symmetriebrechung

$$\mu^2 = M_H^2/2, \quad \lambda = \frac{M_H^2}{v^2}$$



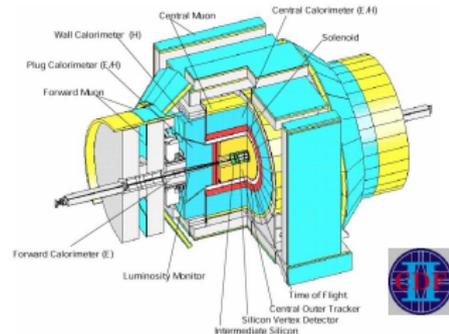
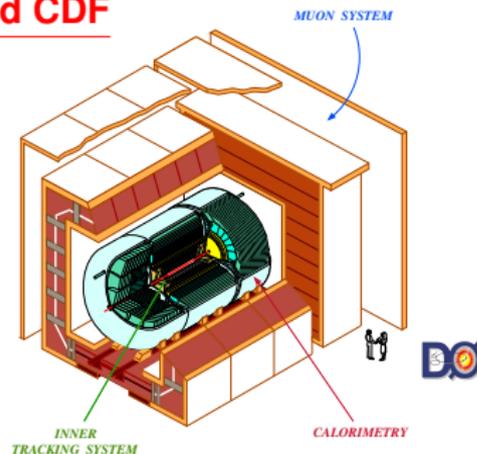
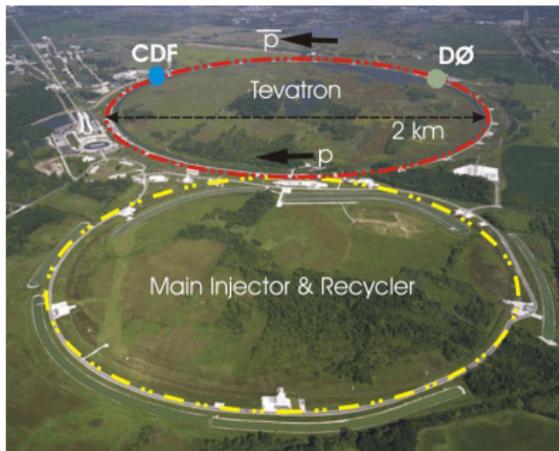
$$V_{\text{min}}(\Phi) = V\left(\frac{v}{\sqrt{2}}\right) = \frac{-M_H^2}{16v^2}$$

Einige Schwächen

- Die Kopplungen an die Fermionen sind von Hand eingeführt.
- Die Masse des Higgs-Bosons ist nicht vorhergesagt.

Nach dem Higgs wird eifrig gesucht.

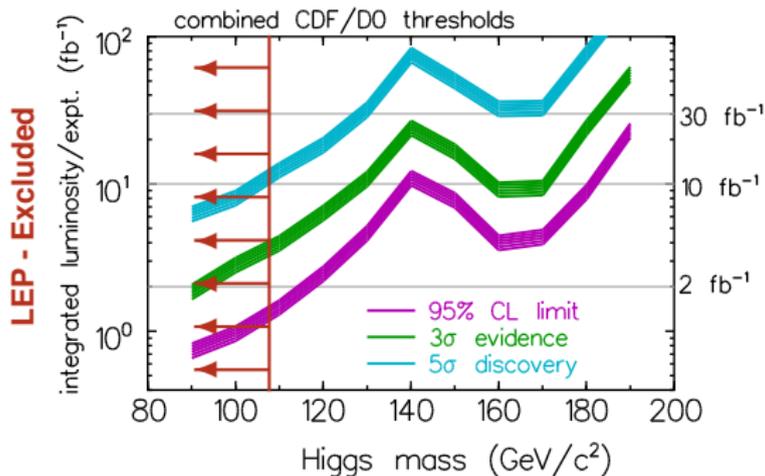
Der $p\bar{p}$ Beschleuniger Tevatron - DØ und CDF



	Run I 1992–1996	Run II 2001–20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.5
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	0.85
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30 (3=today)

Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.

Higgs-Suche am Tevatron

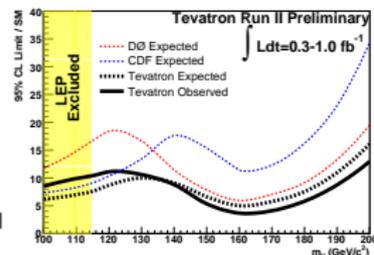


Lumi und Lumi-Erwartung

- 3.0 fb^{-1} bis heute
- 4-8 fb^{-1} bis Ende 2009

Suchkanäle

- $M_H < 135 \text{ GeV}$,
 $qq' \rightarrow Z/W \rightarrow Z/WH$.
- $M_H > 135 \text{ GeV}$,
 $gg \rightarrow H \rightarrow WW^*$.



Die Umfrage: Was kann im RUN II erreicht werden?

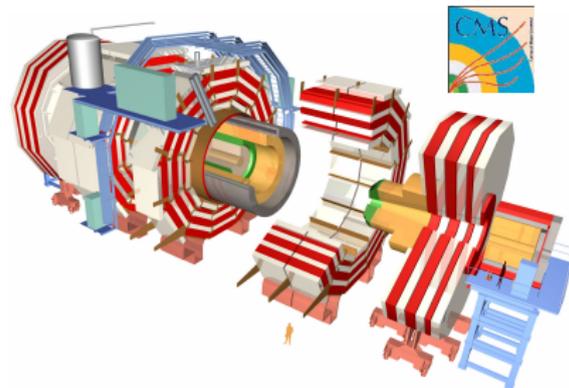
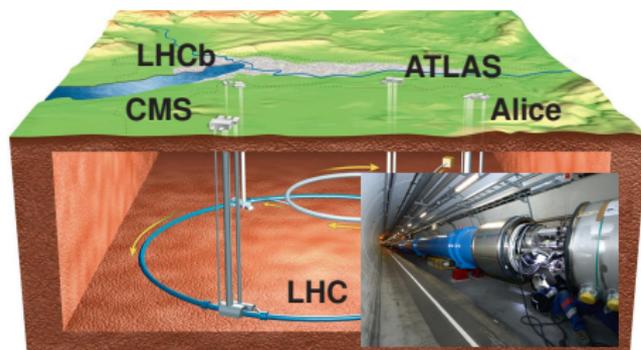
Realist: Es gibt eine Verbesserung gegenüber LEP ab ca. 2 fb^{-1}

Pessimist: Mit 10 fb^{-1} wird $M_H < 180 \text{ GeV}$ mit 95% CL ausgeschlossen.

Optimist: Für $M_H = 116 \text{ GeV}$ und 15 fb^{-1} ist eine 5 Sigma Entdeckung möglich.

Alles ist möglich, wir werden warten müssen. Und um sicher zu gehen ..

Der LHC Beschleuniger - und CMS



Der Beschleuniger

- $L = 26.7 \text{ km}$
- $E_p = 7 \text{ TeV}$
- $N_p = 1.1 \cdot 10^{11} / \text{Strahl}$
- $\mathcal{L}_{\text{int}} = 10 \text{ fb}^{-1} / \text{a Start}$
- $\mathcal{L}_{\text{int}} = 100 \text{ fb}^{-1} / \text{a nominal}$

Die Dipol-Magnete

- Länge = 15 m
- Gewicht = 23.8 t
- B-Feld = 8.3 T
- Temperatur = 1.9 K
- Strom = 12000 A
- Energie = 7.1 MJ

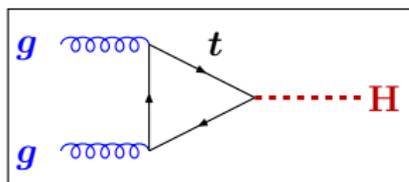
Das CMS Experiment

- B-Feld = 4 T
- Gewicht = 12500 t
- Tracker = 210 m² Silizium
- 37 Länder, 155 Institute
2000 Wissenschaftler

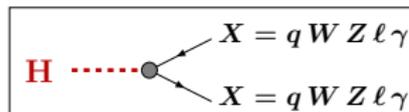
Der LHC und die LHC Experimente, ein Unterfangen ohne Beispiel, startet in 2008.

Das Higgs - Entdeckungspotential am LHC

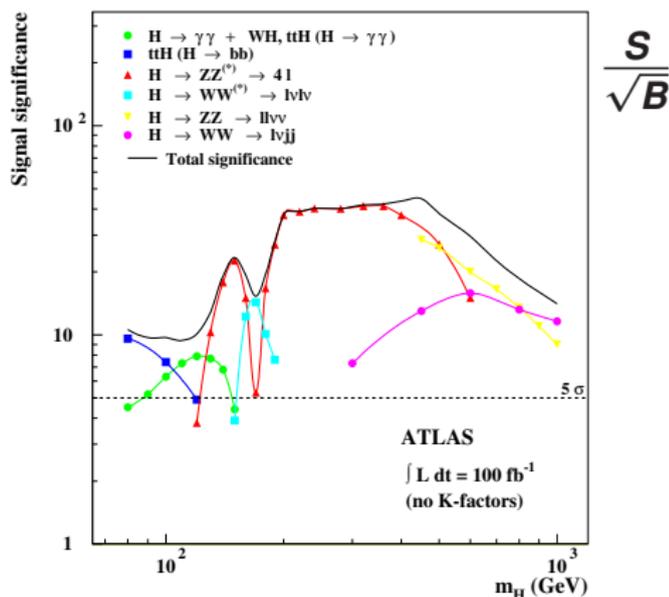
Der Haupt-Produktionskanal



Die Liste der Zerfallskanäle



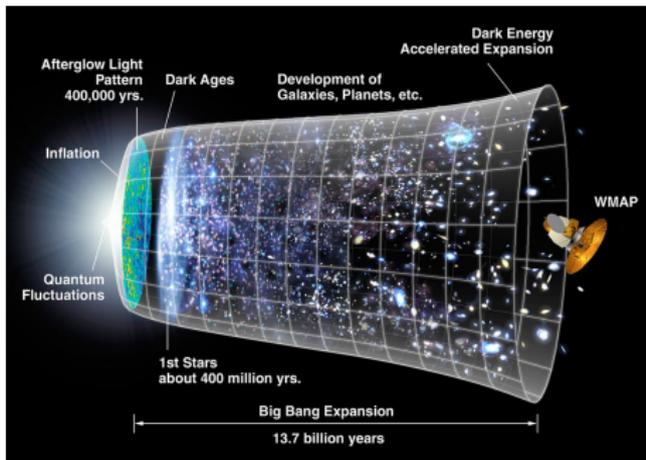
Das Entdeckungspotential



– Das ATLAS Entdeckungspotential ist besser als 10σ für ein Jahr mit Design-Luminosität.

Das Standard Model Higgs-Boson kann uns am LHC wohl nicht verborgen bleiben.

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) - das Ziel



Grundlagen (z.B. J. Lesgourgues 2005)

- Kosmologisches Prinzip: Auf großen Skalen ist das Universum homogen und isotrop.
- Allgemeine Relativitätstheorie
- Friedmann-Lemaître Lösung der

Einsteingleichung: $\Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda = \Omega_0$

Strahlung (R) + Masse (M) + Kosmologische Konstante (Λ) = Krümmung (0)

- Falls $\Omega_0 = 1 \Rightarrow$ Das Universum ist flach.

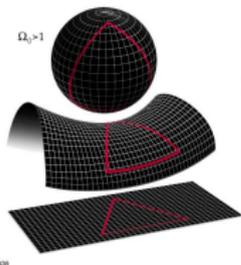
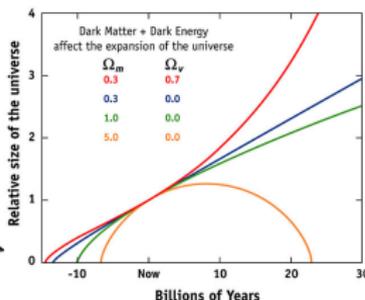
Fragestellungen

- Expansion des Universums?
- Materiedichte des Universums?
- Anteil Dunkler Materie und Dunkler Energie?

Ansatz

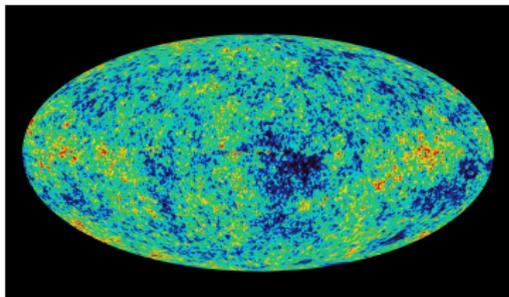
- Untersuche CMB Fluktuationen.

EXPANSION OF THE UNIVERSE



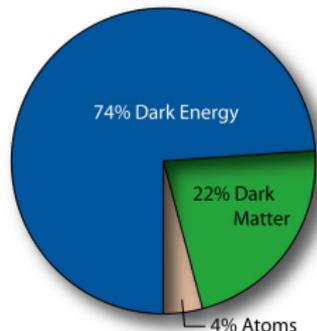
WMAP - die Resultate

Ein Bild des Raumes

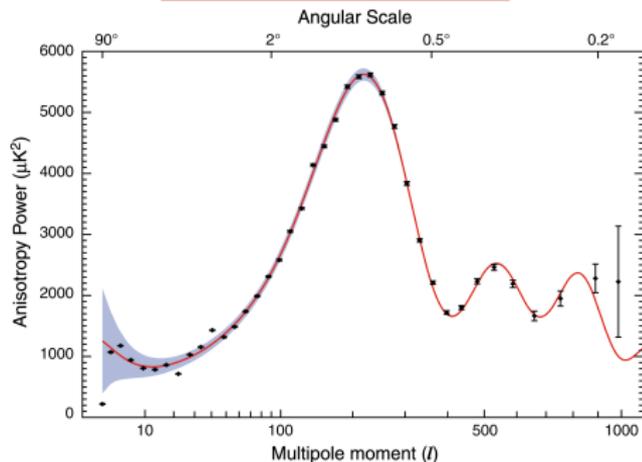


– Eine sichtbare Anisotropie

Die Zusammensetzung



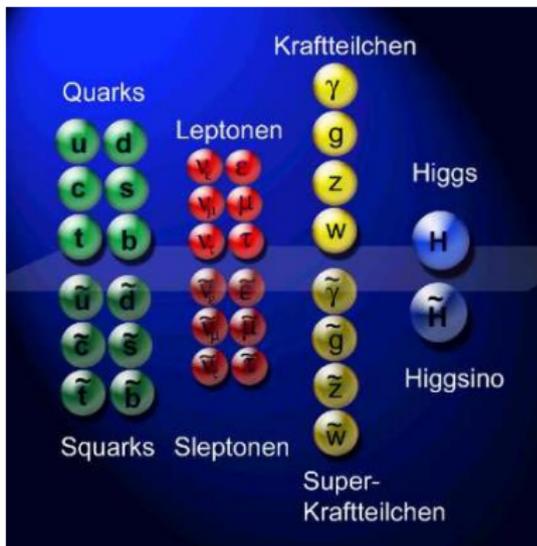
Die Partialwellenanalyse



- Krümmung: $\Omega_0 = 1$, das bedeutet: Das Universum ist flach.
- Materie: $\Omega_M = 0.234 \pm 0.035$ und davon ist nur ein kleiner Teil, $\Omega_b = 0.042 \pm 0.003$, normale baryonische Materie.
- Es gibt 20% Dunkle Materie, von der wir fast nichts wissen.
- Energy: $\Omega_\Lambda = 0.75$, damit gibt es 75% Dunkle Energie, von der wir rein gar nichts verstehen.

Der größte Teil der Welt ist Physik außerhalb des SM.

Super Symmetrie SUSY - ein Weg aus der Krise?



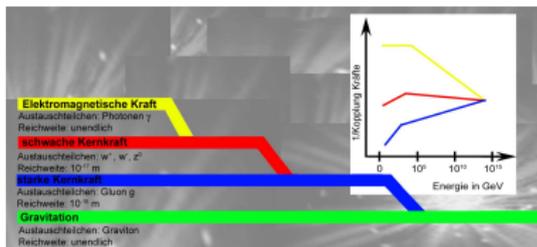
SUSY in der Nußschale

- Neue Symmetrie $O|Fermion\rangle = |Boson\rangle$.
- Neue Teilchen als Superpartner zu SM Teilchen.
- Die SUSY Teilchen mischen zu den beobachtbaren Zuständen
- Fall die R-Parität, $R_p = (-1)^{3B+L+2S}$, erhalten ist, ist das leichteste SUSY Teilchen, das LSP, stabil.
- Gebrochene Symmetrie da sonst Fermion- und Bosonmassen identisch sein müssten.

Viele nützliche Eigenschaften

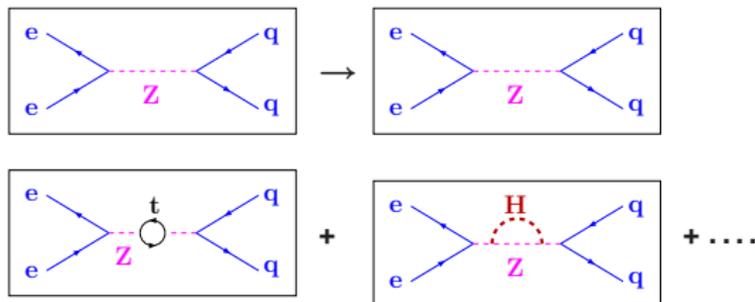
- SUSY löst das Hierarchie Problem, $M_p/M_W \approx 10^{19}$,
- ist in Einklang mit einem vom SM bevorzugten leichten Higgs-Boson,
- liefert einen Kandidaten für kalte Dunkle Materie,
- und erlaubt die Vereinheitlichung der Kopplungen.

Supersymmetrie löst einige Probleme des SM.



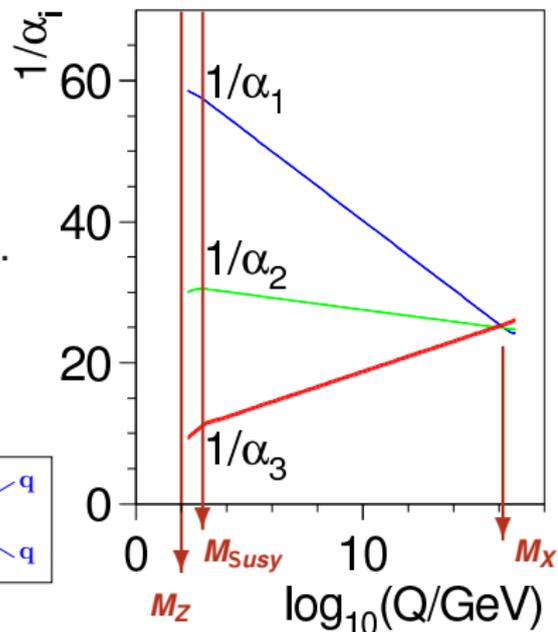
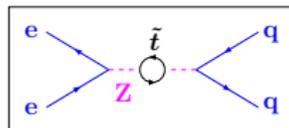
Warum ist SUSY attraktiv

- Die Kopplungen α_i werden die durch Schleifendiagramme energieabhängig, z.B.:



- Das Spektrum der SM Teilchen reicht nicht aus um die Kopplungen zu vereinigen.

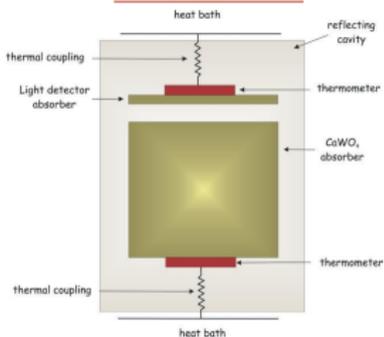
- Durch Einführung der Supersymmetrie gibt es neue Beiträge, z.B. von Stop-Quarks, und die Kopplungen treffen sich.



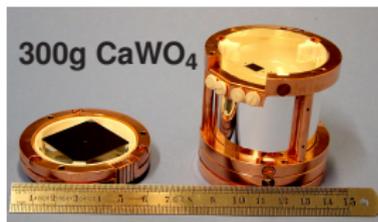
Die Vereinigung der Kopplungen ist ein gutes Argument für Supersymmetrie.

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

Prinzipskizze



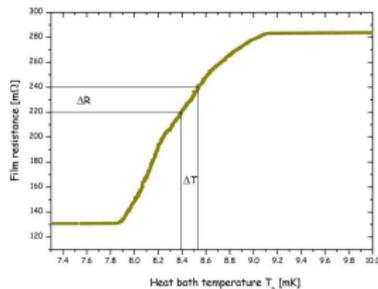
Ein Detektor



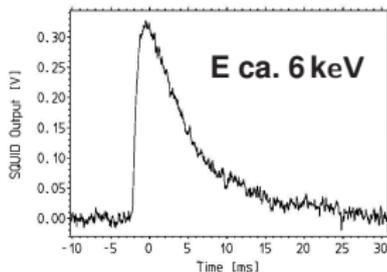
Das CRESST Experiment

- Suche nach Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs.
- Signal: WIMPs ($\sigma \propto A$), Bgd: α, β, γ und Neutronen.
- Messung von Phononen und Licht.
- Rückstoß Phononen bei 12mK, Signal proportional $E \approx$ gleich.
- Szintil.-Licht: Elektron $>$ Kerne
- Das Verhältnis Phonon/Licht selektiert das Signal.

Supra \rightarrow Normalleitung



SQUID-Signal



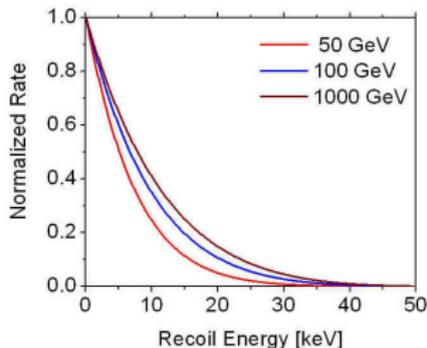
Messmethode

- Messung von ΔR in Superconducting Quantum Interference Devices, SQUIDs

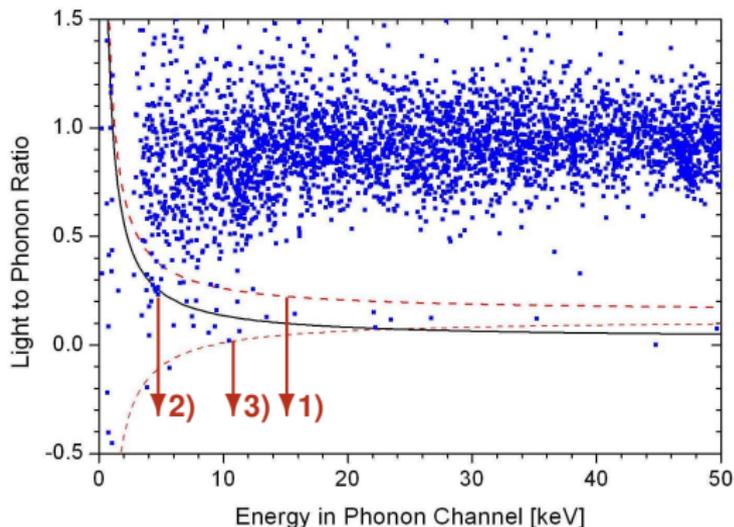
Die WIMP Sensitivität steigt mit der Unterdrückung der Untergrundreaktionen.

WIMP Suche - Resultate von CRESST

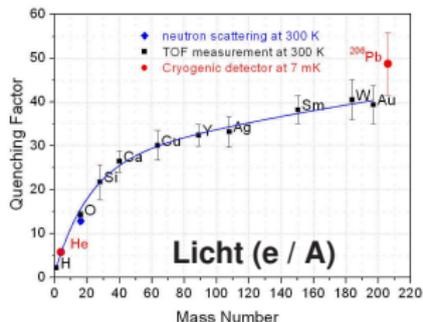
Das W-Rückstoßspektrum



Phononen vs Licht



Die Unterdrückungsfaktoren

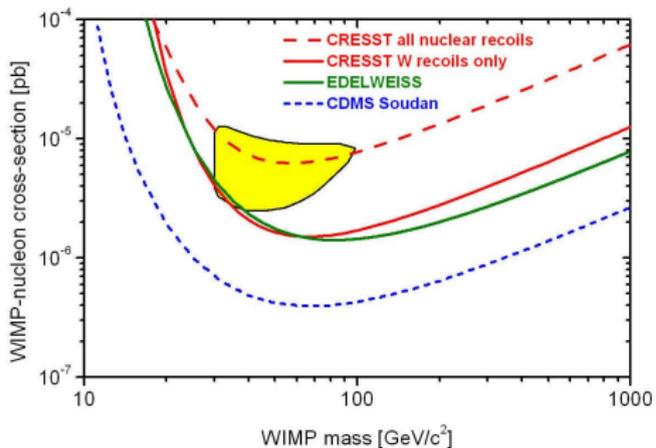


- 90% aller Rückstöße sind unterhalb von 1).
- 10% aller Rückstöße sind unterhalb von 3).
- 90% aller W-Rückstöße sind unterhalb von 2).

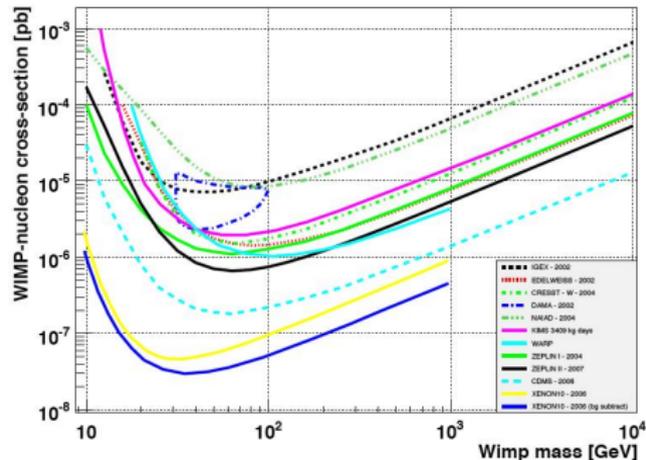
Der Signalbereich ist fast frei von Untergrund.

Direkte WIMPs Suche - Status 2007

Die CRESST Ausschlussgrenzen



Die Welt Daten zur WIMPs Suche



— Die DAMA Evidenz für WIMPs ist von den anderen Experimenten nicht bestätigt worden

Die Suche nach den WIMPs geht damit in die nächste Runde.

Zusammenfassung

- **Das Standardmodell (SM) ist auf Sub-promille genau verifiziert worden. Trotz dieses großen Erfolges wissen wir, dass es unvollständig ist.**
- **Schwächen des SM, sind die ad-hoc Einführung der Teilchenmassen, die Massenhierarchie, die Anzahl der Familien, das nicht erklärte Ladungsspektrum,**
- **Mit den Neutrino-Oszillationen wurde die erste Physik jenseits des SM gefunden. Die gemessene CP-Verletzung kann die Baryonasymmetrie erklären.**
- **Die Suche nach dem Higgs-Boson geht in die nächste Runde. Nach den ersten Jahren des LHC sollten wir besser wissen was für Teilchenmassen zuständig ist.**
- **Die WMAP Resultate sagen uns, dass Physik jenseits des SM das Universum dominiert. Baryonische Materie hat einen Anteil von nur 4%.**
- **Die Suche nach dunkler Materie geht weiter, mit bei tiefsten Temperaturen mit Kryodetektoren, und bei höchsten Energien an Beschleunigern.**

Nächste Vorlesung: Vorlesung 3, 27. Oktober 9:15 Uhr, Prof. S. Bethke.