

# Der Antimaterie auf der Spur

Michael Schmelling – MPI für Kernphysik

e-Mail: [Michael.Schmelling@mpi-hd.mpg.de](mailto:Michael.Schmelling@mpi-hd.mpg.de)

## Übersicht

- *Einführung*
- *Teilchen, Felder und Beschleuniger*
- *Antimaterie*
- *Gibt es Antimaterie im Universum?*
- *Zusammenfassung und Ausblick*



- Was sind die die fundamentalen Bausteine der Welt?
- Welche Kräfte wirken zwischen Ihnen?

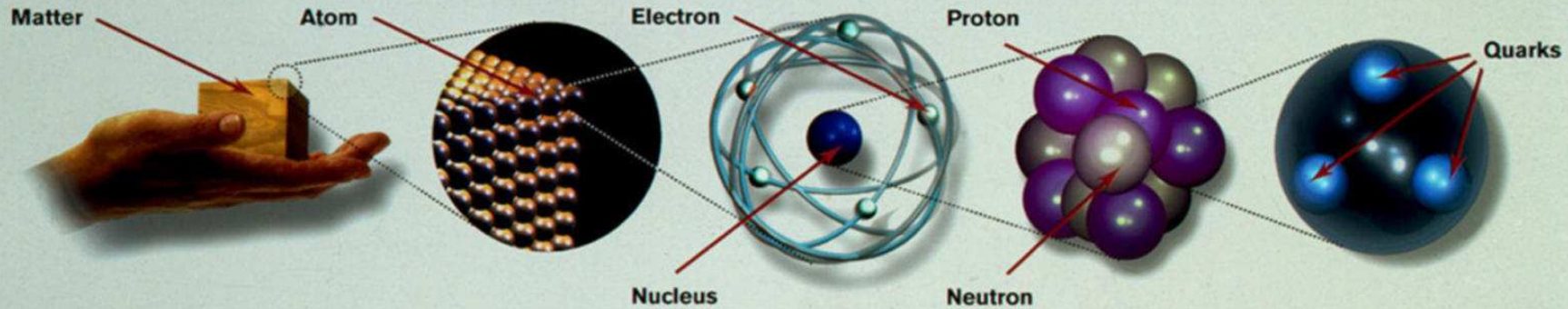
“Erforschen was die Welt im Innersten zusammen hält”



“Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit, wirklich sind nur Atome und Leeres”

Demokrit, ca. 400 v.Chr.

heutiger Kenntnisstand – das Standardmodell der Teilchenphysik →



**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

		LEPTONS	
FIRST FAMILY	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second
SECOND FAMILY	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay
THIRD FAMILY	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist

		QUARKS	
	<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one		<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
	<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974		<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964
	<b>Top</b> Heavier still		<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

**Gluons**  
Carriers of the strong force between quarks

Felt by: quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force

**Photons**  
Particles that make up light; they carry the electromagnetic force

Felt by: quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of electro-magnetic force

**Intermediate vector bosons**  
Carriers of the weak force

Felt by: quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the weak force

**Gravitons**  
Carriers of gravity

Felt by: all particles with mass

All the weight we experience is the result of the gravitational force

GRAPHICS: PETER CROWTHER

## → Baryonen

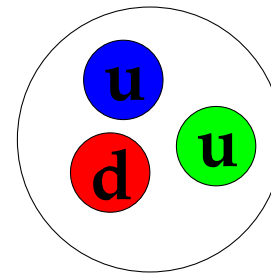
- Systeme aus 3 Quarks
- alle Kombinationen erlaubt
- viele nachgewiesen
- die meisten sind instabil

## ❖ Beispiele

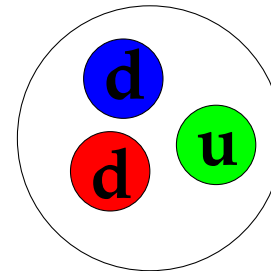
- Proton
- Neutron
- Lambda
- Omega-Minus
- Lambda-c, Lambda-b
- und viele mehr...

u   
 c   
 t   
 Ladung +2/3

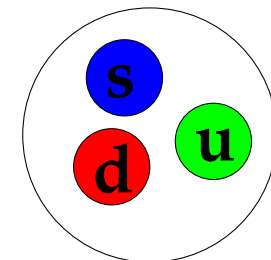
d   
 s   
 b   
 Ladung -1/3



**Proton – Ladung +1**



**Neutron – Ladung 0**



**Lambda – Ladung 0**



## ■ typische Ausdehnung eines Atoms

$$10^{-10}\text{m}$$

→ Nehme eine Stecknadel und steche ein Loch in ein Blatt Papier ( $D = 1\text{mm}$ ). Dann bilde eine Menschenkette mit allen Einwohnern Baden Württembergs (ca. 10 Millionen) und verkleinere jeden Menschen auf die Größe eines Atoms. Die gesamte Kette würde durch das Loch passen.

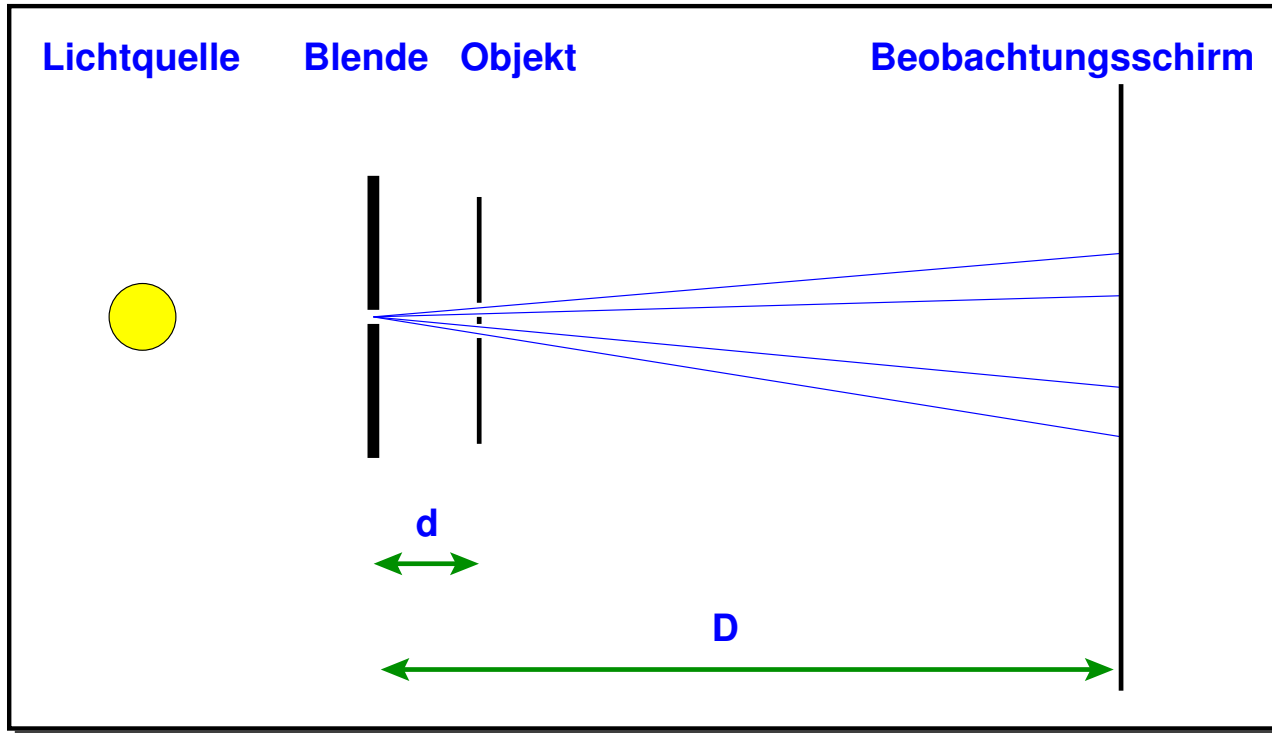
## ■ typische Größe des Atomkerns im Vergleich zum Atom

$$10^{-15}\text{m}$$

→ Nehme einen Ballon und blase ihn auf bis der Durchmesser so groß ist wie ein Fussballstadion. Der Atomkern wäre dann ein Stecknadelkopf in der Mitte.

woher weiss man das – bzw., **wie kann man ins Innere der Materie schauen?**

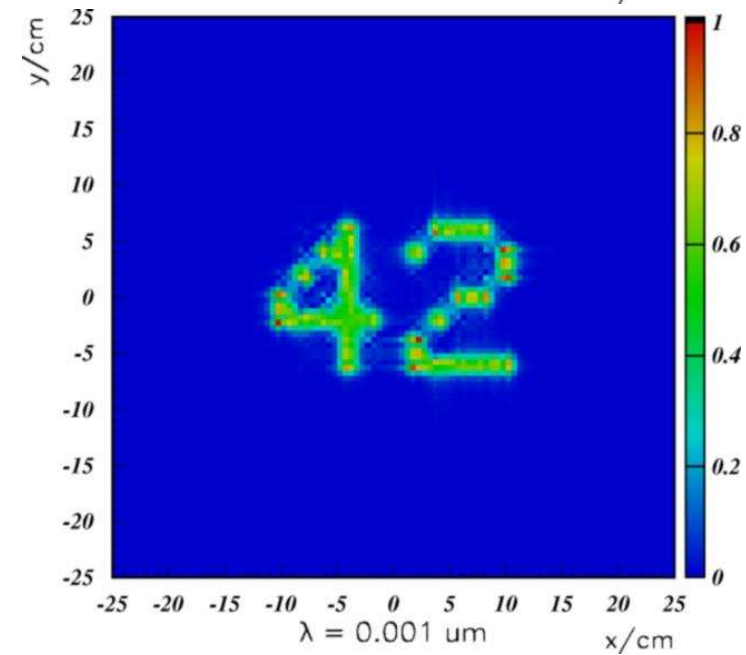
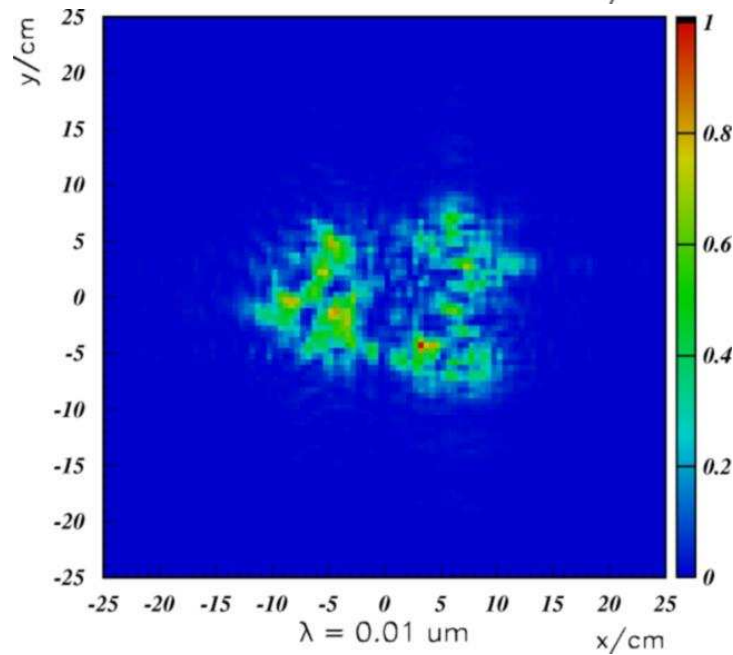
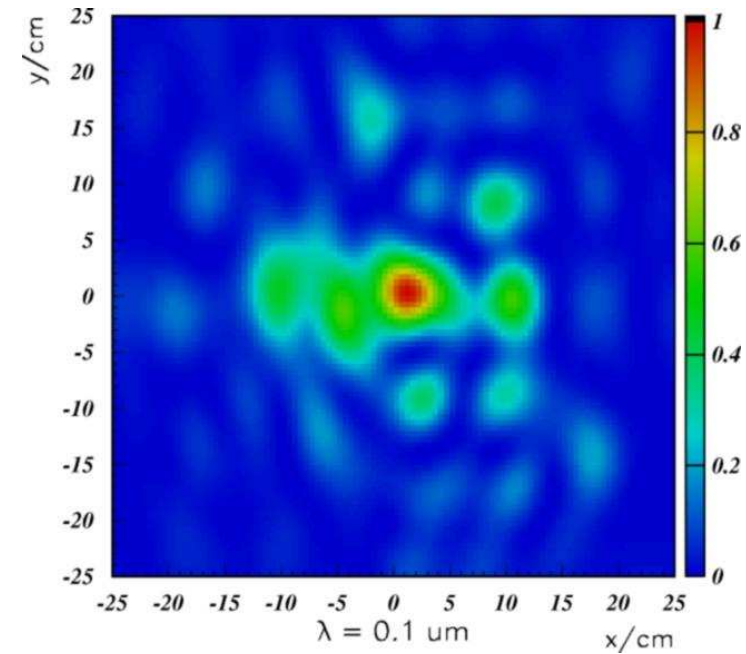
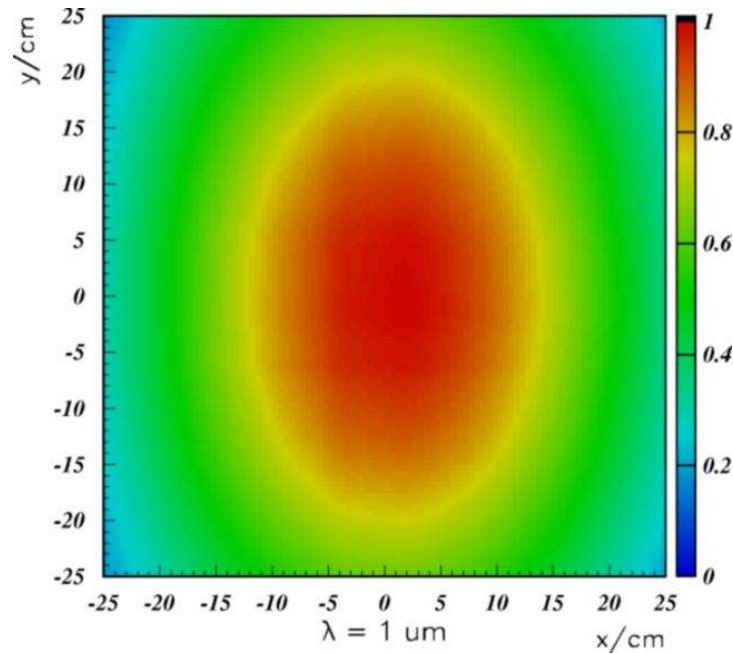
→ Ein Gedankenexperiment:



Dimensionen:

$$d = 1\text{mm}$$
$$D = 10\text{m}$$

- beobachte ein Objekt (Blende) mit Ausdehnung von einigen  $\mu\text{m}$
- Vergrößerung nach Strahlensatz:  $V = D/d = 10000$
- was sieht man wirklich?
  - berechne mittels Huygens Prinzip in Fresnel'scher Näherung das Schirmbild für verschiedene Wellenlängen  $\lambda$



- große Wellenlängen für grobe Strukturen
- kleine Wellenlängen für feine Strukturen

Problem: Wie erzeugt man möglichst kleine Wellenlängen?

Für Licht (Photonen) gilt:

$$E = h \cdot \nu = p \cdot c \quad \text{sowie} \quad c = \lambda \cdot \nu \quad \text{und damit} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

de Broglie:

- $\lambda = h/p$  gilt allgemein, d.h. auch für Elektronen, Protonen, ...
  - hochenergetische Teilchen liefern kurze Wellenlängen
  - große Beschleuniger zur Untersuchung kleinster Abstände

... was heisst das konkret?



## ❖ Energie-Einheit in der Teilchenphysik: eV

1 eV ist die kinetische Energie welche ein Elektron beim Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 V gewinnt

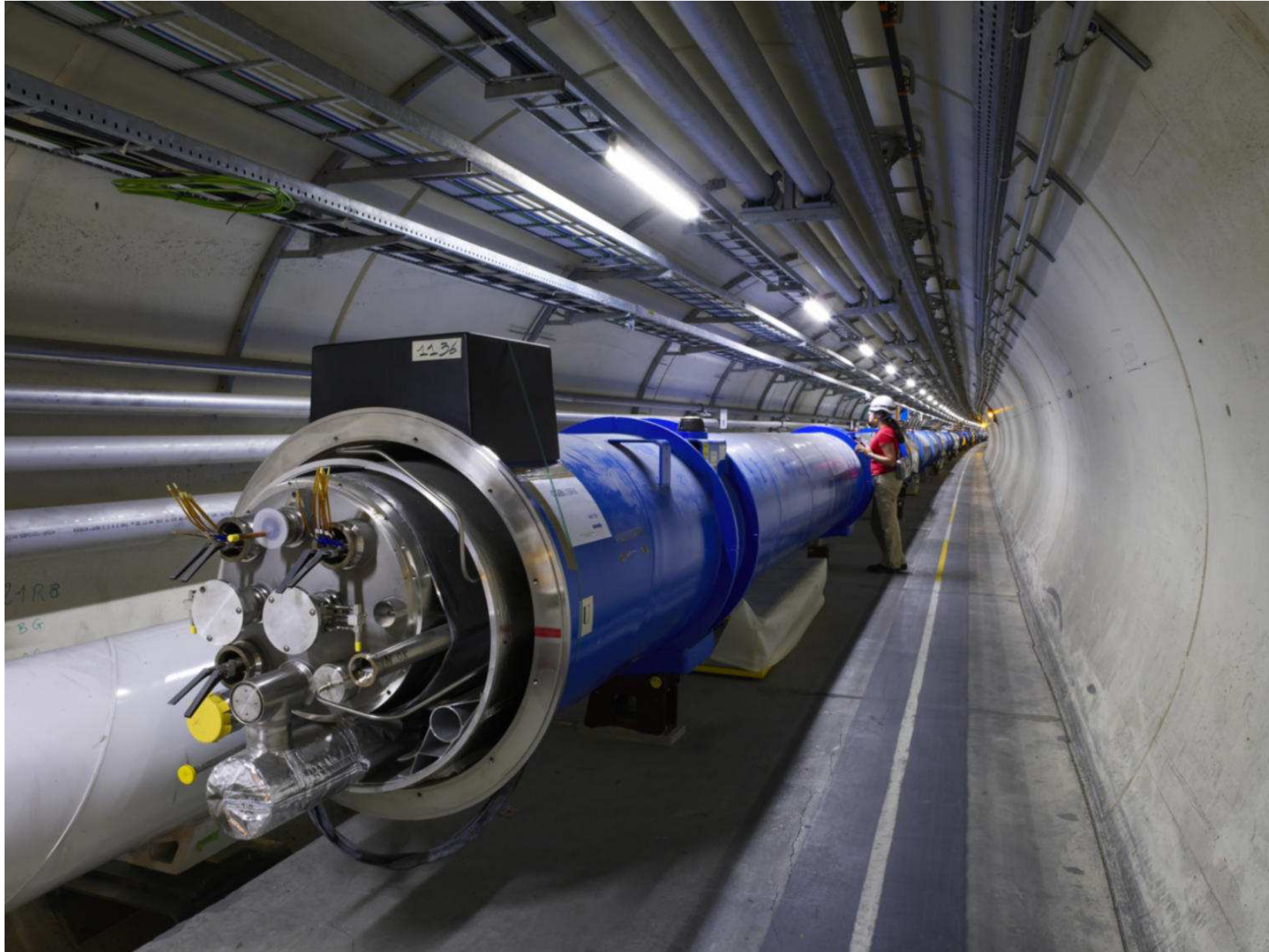
Strahlung	Wellenlänge	Energie
MW	300 m	$4.1 \cdot 10^{-9}$ eV
UKW	3 m	$4.1 \cdot 10^{-7}$ eV
Handy/GPS	0.3 m	$4.1 \cdot 10^{-6}$ eV
Infrarot	$10^{-5}$ m	0.12 eV
sichtbares Licht	$6 \cdot 10^{-7}$ m	2 eV
UV	$1.2 \cdot 10^{-7}$ m	10 eV
Röntgen-Strahlung	$1.2 \cdot 10^{-10}$ m	$10^4$ eV
$\gamma$ -Strahlung	$1.2 \cdot 10^{-12}$ m	$10^6$ eV
Elektronen in LEP ( $c - v = 1$ mm/s)	$1.2 \cdot 10^{-17}$ m	$10^{11}$ eV
Protonen in LHC ( $c - v = 3$ m/s)	$1.8 \cdot 10^{-19}$ m	$7 \cdot 10^{12}$ eV





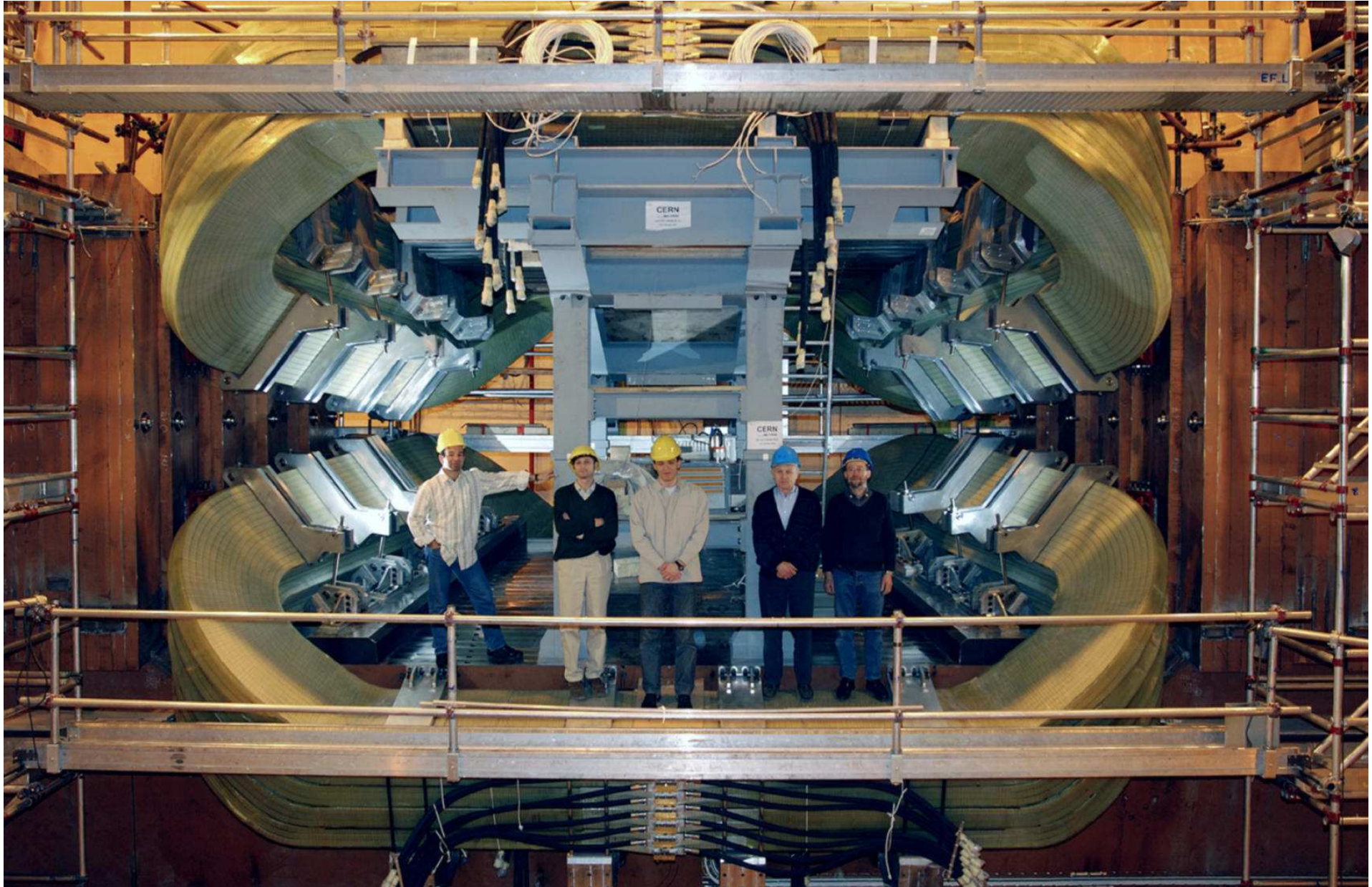
(c) CERN





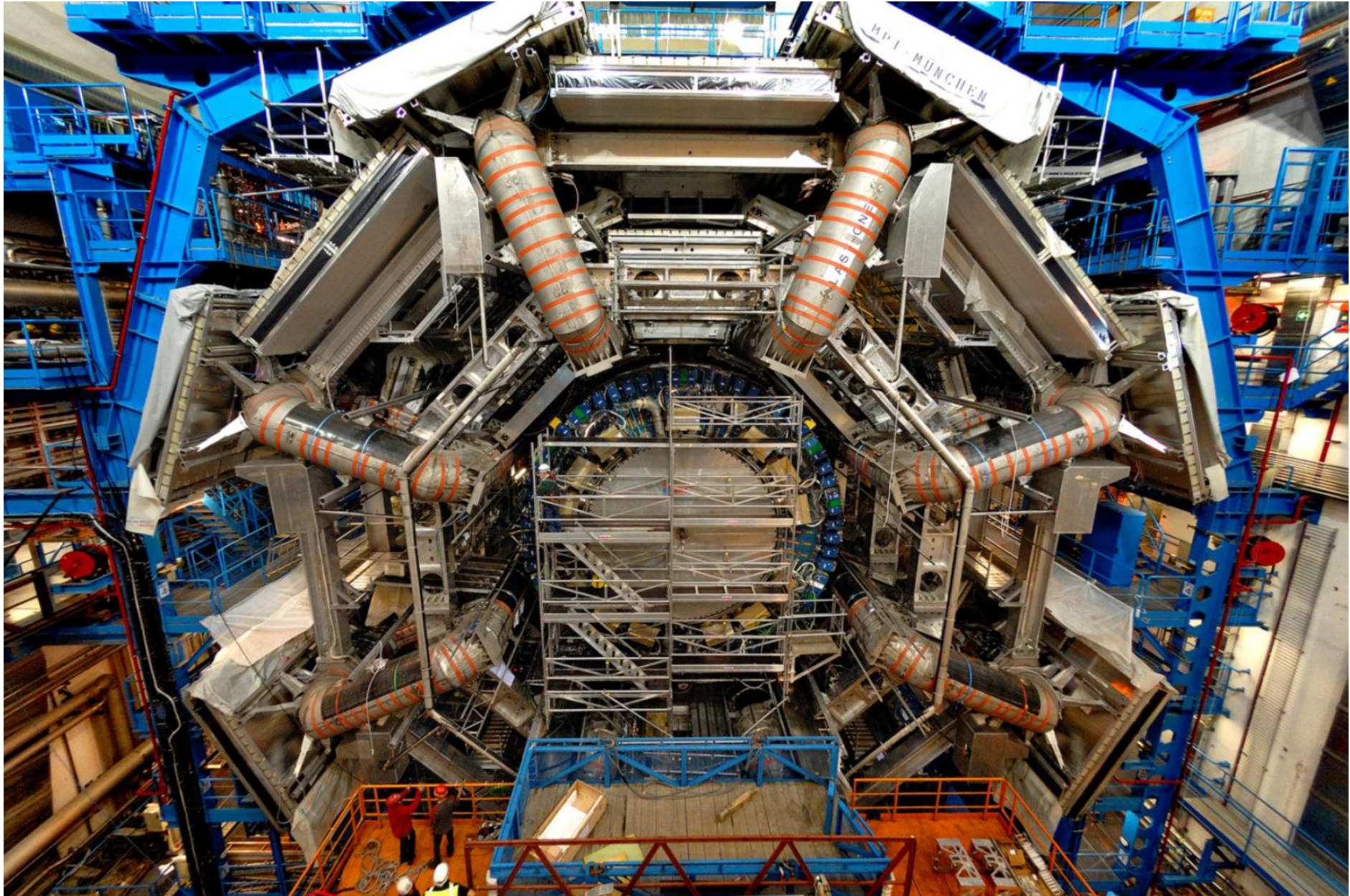
(c) CERN





(c) CERN





(c) CERN



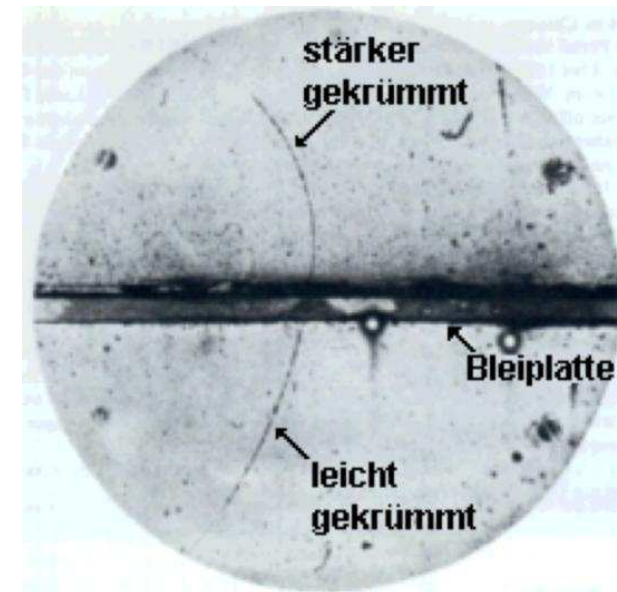
- Protonen in LHC: ca.  $6 \cdot 10^{14}$ 
  - Wasserstoff gefüllter Ballon mit einem Durchmesser von 1/3 mm.
- Gesamtmasse dieser Protonen: 1 nanogramm
  - Masse eines Eiswürfels mit einer Kantenlänge von  $1 \mu\text{m}$ .
- Beschleunigung mittels elektromagnetischer Felder
  - ähnlich wie in einem nicht-LCD Fernseher
- Startgewicht einer chemischen Rakete zur Beschleunigung eines Mikro-Eiswürfels auf LHC Endgeschwindigkeit
$$10^{267394} \text{ kg}$$
  - Im gesamten Weltall gibt es "nur" ca.  $10^{50} \text{ kg}$  ...
- im LHC-Strahl gespeicherte Energie:  $6.72 \cdot 10^8 \text{ J}$ 
  - kin. Energie der USS-Enterprise bei  $v = 7.7 \text{ Kn}$



Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit . . .

- gleicher Masse
- gleichem Eigendrehimpuls
- aber entgegengesetzter Ladung

1931: Dirac – Vorhersage aus relativistischer Quantenmechanik



1932: Anderson – erster Nachweis des Positrons,  $e^+$

## → Die Äquivalenz von Masse und Energie

- Lichtgeschwindigkeit ist Grenzgeschwindigkeit
- bei  $v \rightarrow c$  bedeutet mehr kinetische Energie → Massenzunahme
- höhere Energie bedeutet größere Masse
- Einstein's exaktes und allgemeines Resultat:

$$E = m c^2$$

## ❖ Umwandlungsmöglichkeiten

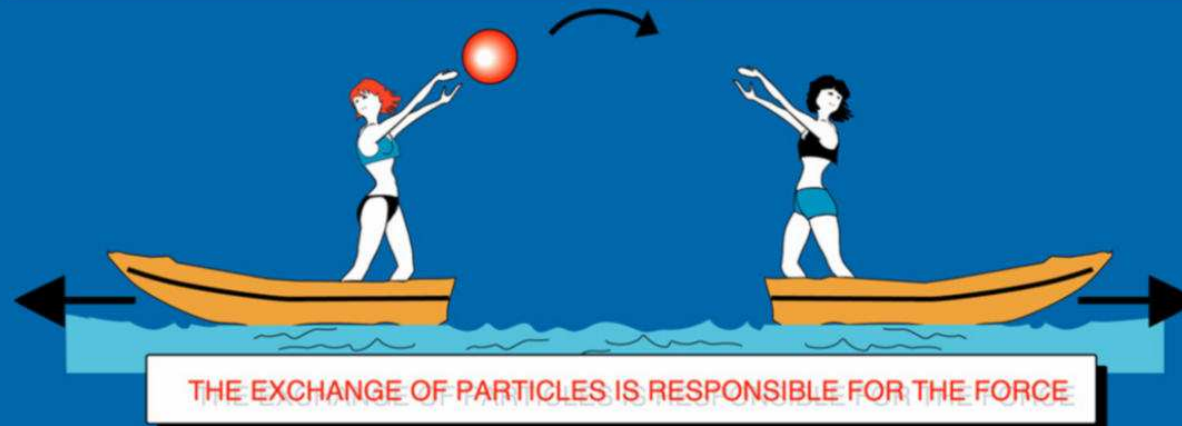
Masse → Energie

Energie → Masse

- “Energiewirtschaft”: 1 g Materie =  $9 \times 10^{13}$  J = 25 Milliarden kWh
- Elementarteilchenphysik: 25 Milliarden kWh = 1 g Materie

## The forces in Nature

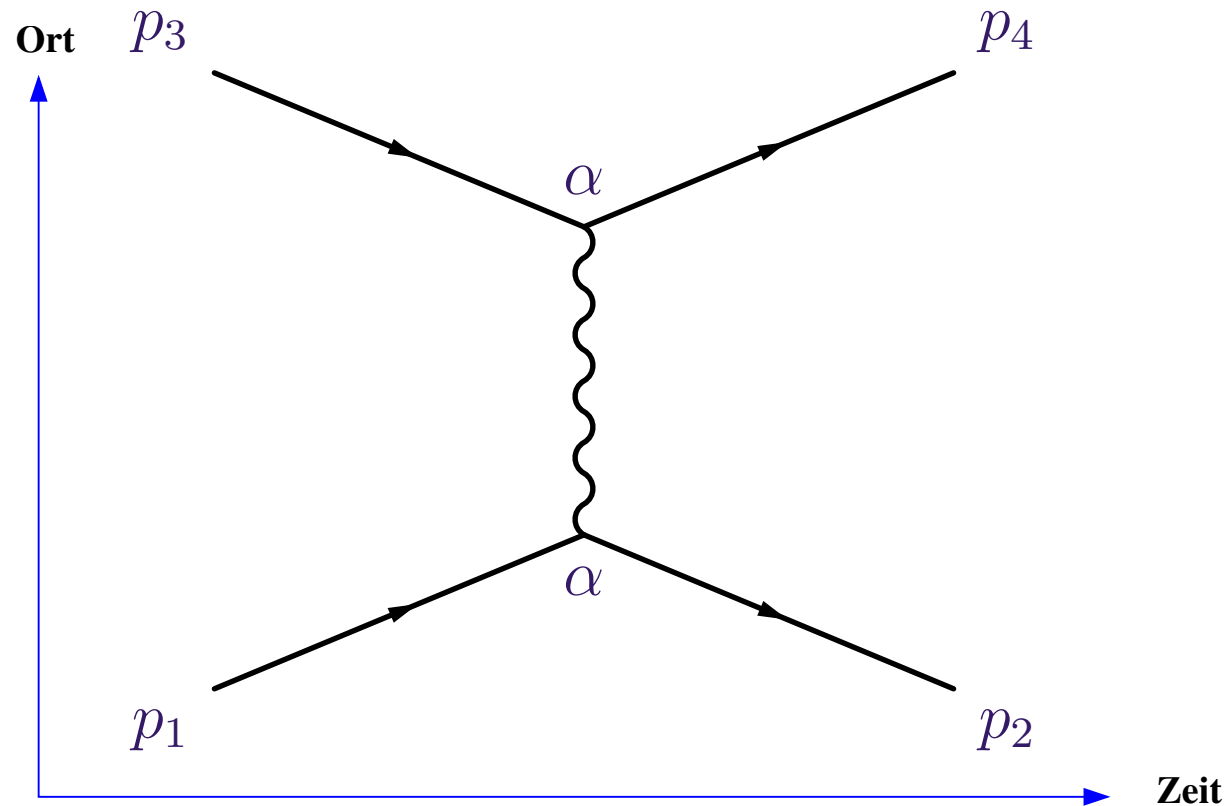
TYPE	INTENSITY OF FORCES ( DECREASING ORDER )	BINDING PARTICLE ( FIELD QUANTUM )	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS ( NO MASS )	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS ( NO MASS )	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ ( HEAVY )	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS ( ? )	HEAVENLY BODIES



CERN AC\_Z04\_V25/8/1992

Wechselwirkungen sind durch die Art des Austauschteilchens charakterisiert

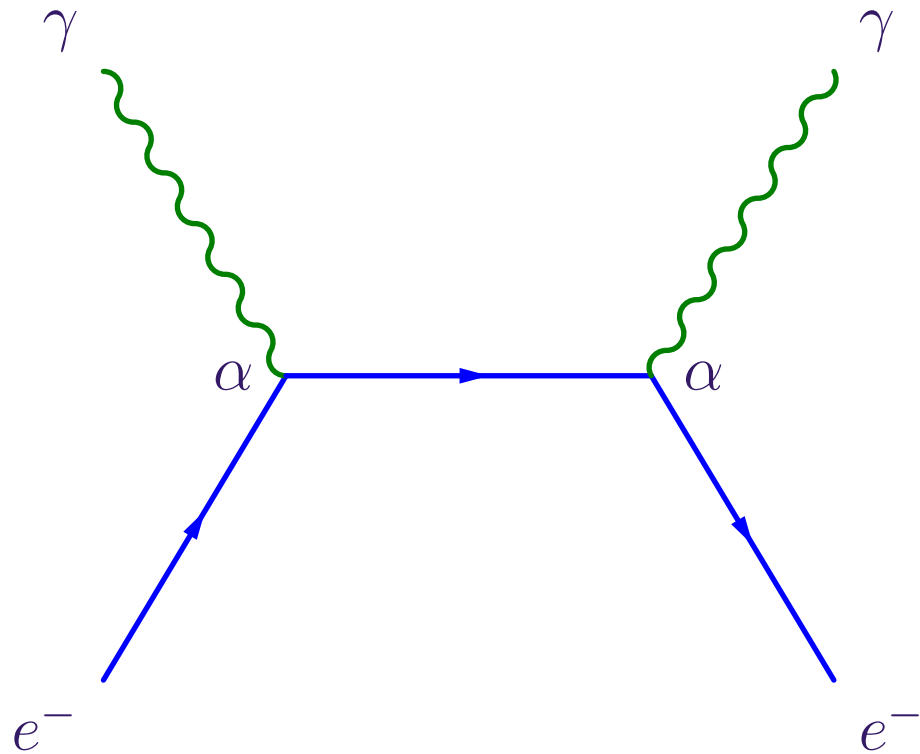
## → "Feynman Diagramme"



- Linien beschreiben die Teilchen, Knotenpunkte die Wechselwirkungen
- Energie und Impuls sind an jedem Vertex erhalten

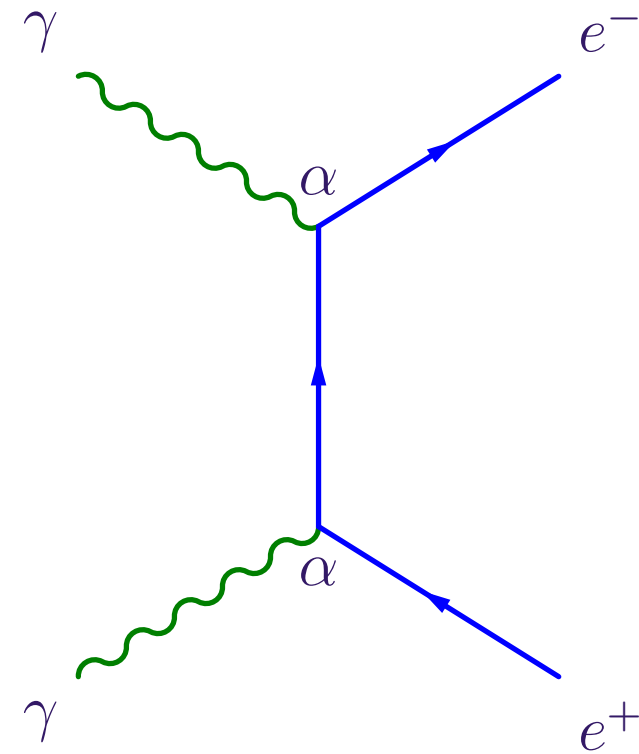


## → Wechselwirkungen von Licht und Elektronen



Compton - ( $e^- \gamma$ ) - Streuung

Symmetrie zwischen Raum und Zeit impliziert, dass auch das gedrehte Feynman-Diagramm einen physikalischen Prozess beschreibt ...



- Masse aus Energie!
- gleiche Mengen von
  - Materie und
  - Antimaterie

## → Randbedingungen für mögliche Reaktionen

- Energieerhaltung

- Impulserhaltung

- Drehimpulserhaltung

- Ladungserhaltung

- Beispiele:

- $\gamma \leftrightarrow m$  **verboten** wegen Impulserhaltung

- ✗ brauche mindestens 2 Energiequanten

- $\gamma\gamma \leftrightarrow e^-$  **verboten** wegen Ladungserhaltung

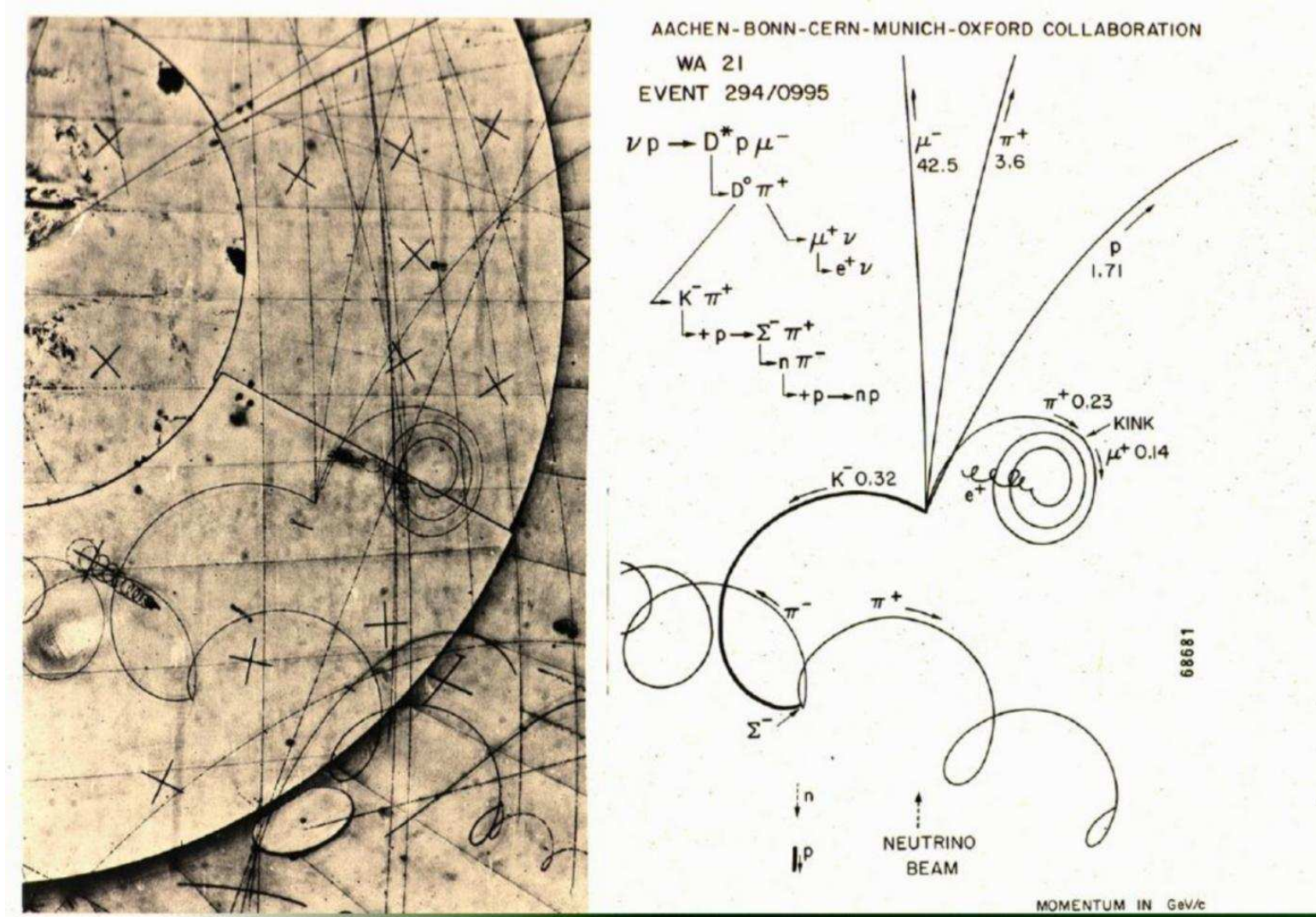
- $\gamma\gamma \leftrightarrow e^- p$  glücklicherweise **nicht beobachtet**

- $\gamma\gamma \leftrightarrow e^- e^+$  **geht**

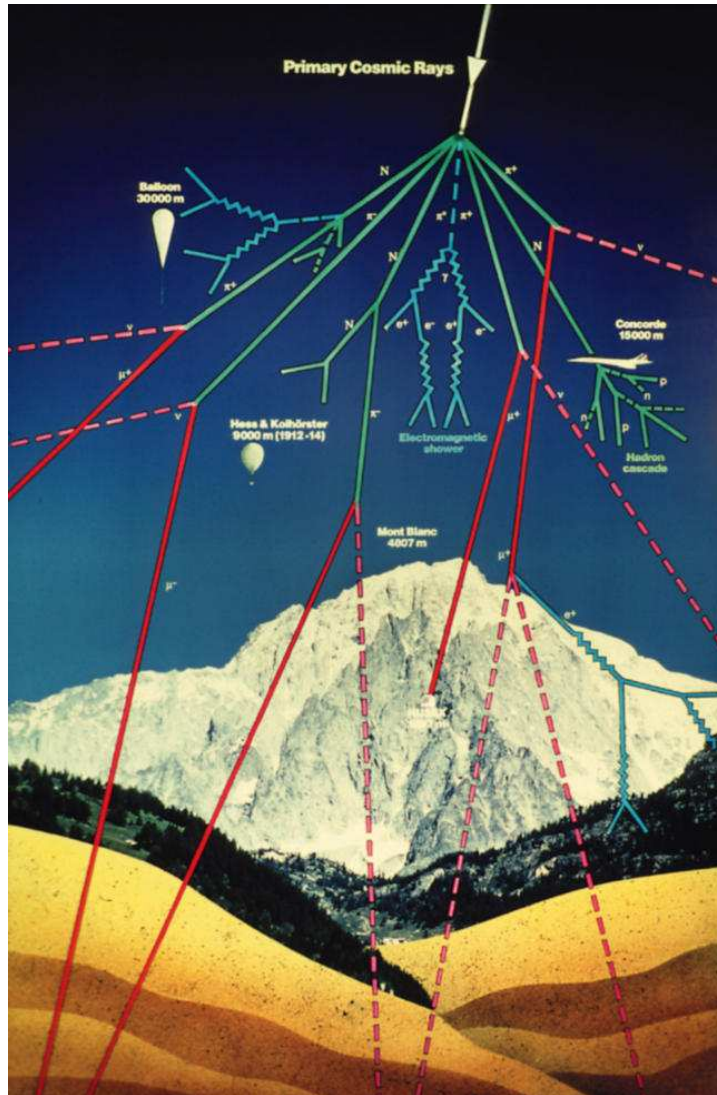
- Umwandlung nur in Materie-Antimaterie Paare

- entgegengesetzte Ladungen, sonst gleiche Eigenschaften

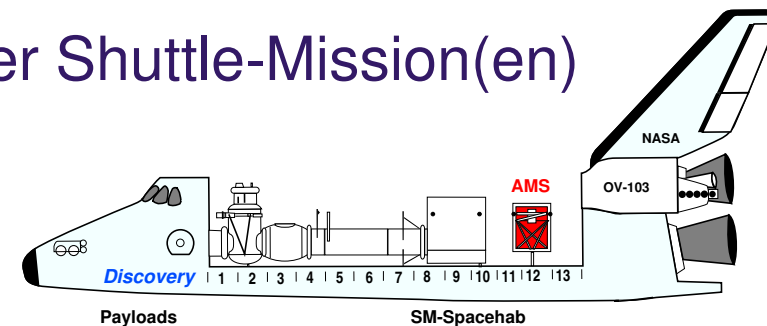
→ **dramatische Auswirkungen für die Teilchenphysik. . .**



- Kaskaden von Produktion und Zerfällen
- Untersuchung z.B. mit Hilfe von Blasenkammeraufnahmen
- heute: elektronische Detektoren



- Im Labor kennt man Antimaterie aus Sekundärreaktionen
- Suche nach primordialer Antimaterie, **Anti-Helium**, aus dem Weltall
  - Überreste vom Urknall
  - zu komplex für spätere Erzeugung
  - AMS-Detektor für ISS
  - bisher Shuttle-Mission(en)



- keine Evidenz für Anti-Helium in der kosmischen Strahlung

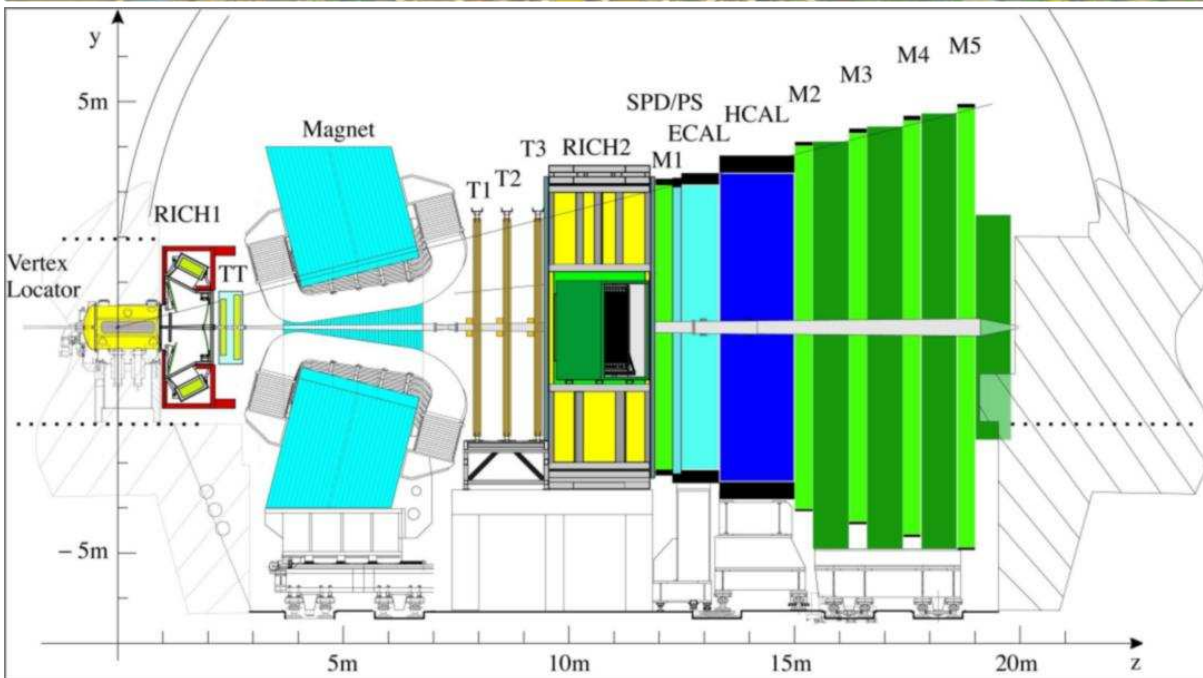
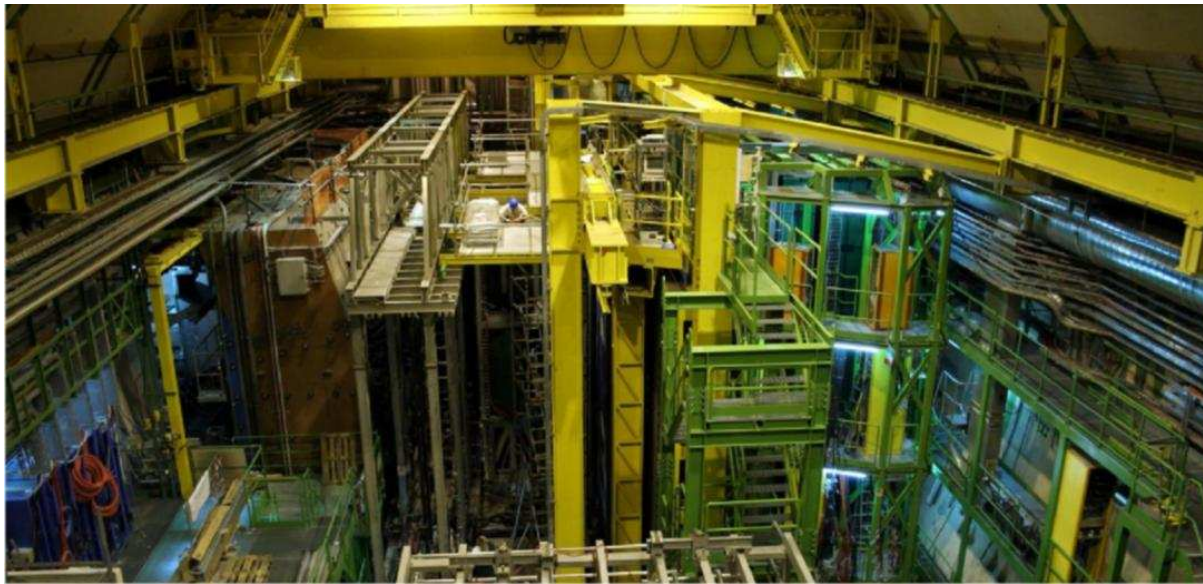




- zahlreiche Kollisionen von Galaxien werden beobachtet
- keine Evidenz für Strahlung aus Materie-Antimaterie Vernichtung
- naive Erwartung: Vernichtungsstrahlung in 50% der Fälle

**Fazit:** vom Urknall ist offenbar nur Materie übrig geblieben!





→ Ziel:

Verständnis der Materie-Antimaterie Asymmetrie des Universums und der Grenzen der Standard-Modells der Teilchenphysik

- am CERN-LHC
- $pp$ -Kollisionen
- 14 TeV Energie
- ca. 1 Million Kanäle
- 40 MHz Rate

→ *Beispiel:* Vergleiche folgende Zerfälle

$$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-$$

Zusammensetzung der Anfangs-Teilchen im Quark-Modell:

$$B^0 = \bar{b}d$$

Masse  $\approx$  Antimaterie

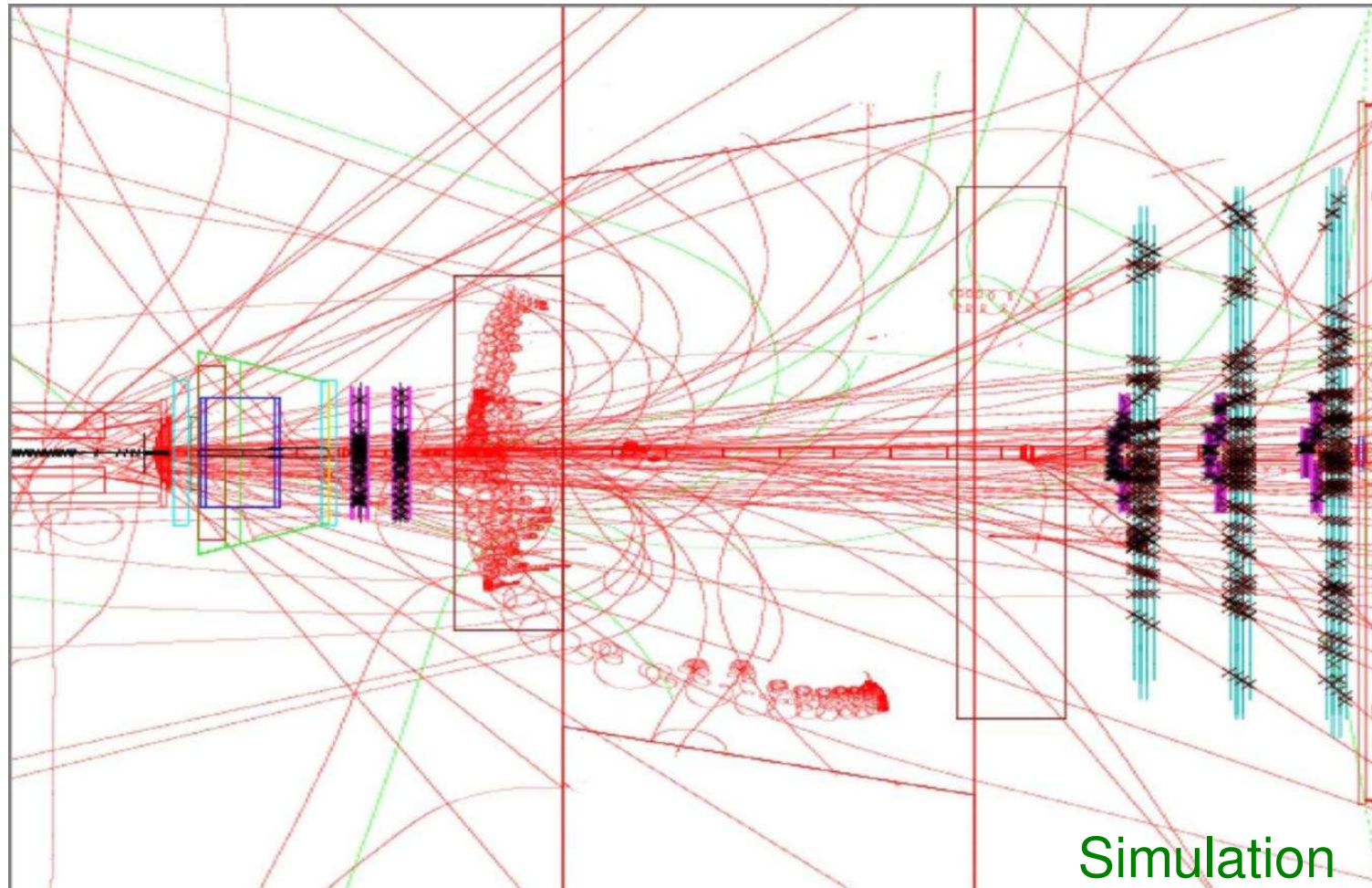
$$\bar{B}^0 = b\bar{d}$$

Masse  $\approx$  Materie

❖ **Fazit:**

- Zerfall in 4 Teilchen, **gleiche** Mengen **Materie und Antimaterie**
- wenn das  $B^0$  (Antimaterie) eine kürzere Lebensdauer hat als das  $\bar{B}^0$  (Materie), dann hat das etwas damit zu tun warum im Universum Antimaterie verschwunden ist und Materie übrig geblieben ist.

## → Visualisierung einer einzelnen $pp$ -Kollision



- nur 4 Spuren stammen von dem gesuchten Zerfall
- nur eine von 10 Millionen Kollisionen enthält einen solchen Prozess





- zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen
- Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Masse,
- gleichen Eigendrehimpuls, aber
- entgegengesetzte Ladungen
- bei der Erzeugung von Masse aus Energie entstehen immer gleiche Mengen Materie und Antimaterie
- das Fehlen von Antimaterie im Universum ist eine der aktuellen Kernfragen der Teilchenphysik
- neue Erkenntnisse dazu werden ab 2008 von LHC/LHCb erwartet

→ *bis dahin*

- dankbares Thema für Science Fiction und Thriller
- einfache Experimente auch an der Schule machbar

zum Beispiel...

## → einige quantitative Betrachtungen...

- CERN stellt Antimaterie in Form von **Antiwasserstoff** her
- Nachweis anhand ihrer **Vernichtungsstrahlung**
- Aufbewahrung nicht gelöst, aber selbst wenn ...
- Erzeugungsrate nur 10000  $\bar{H}$ -Atome in 2 min, oder 1 g in  $10^{14}$  Jahren
  - zum Vergleich: Alter der Universums ca.  $10^{10}$  Jahre
- Energieumsatz einer CERN- $\bar{H}$ -**Jahresproduktion** wäre 100 J
  - entspricht einem fest getretenen Fussball

❖ kein Problem ...







## ❖ Raketengleichung:

$$\frac{v}{c} = \frac{1 - (m/M)^{2u/c}}{1 + (m/M)^{2u/c}}$$

$M$  = Startmasse

$m$  = Endmasse

$u$  = Ausströmgeschwindigkeit

$v$  = Endgeschwindigkeit

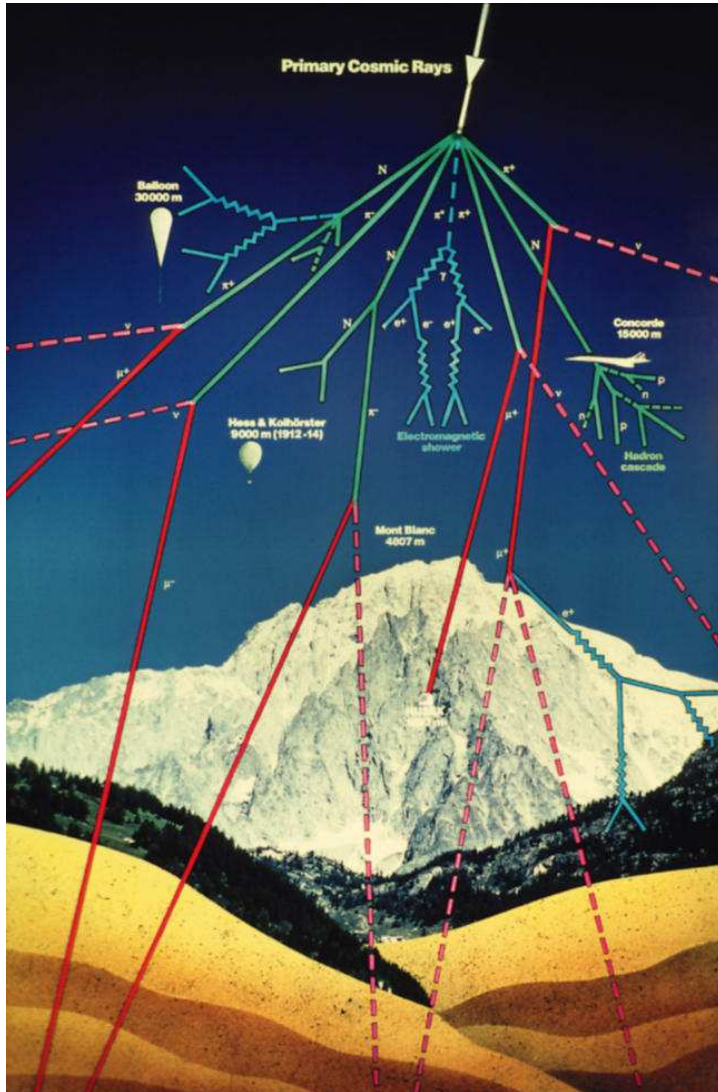


Beispiel:  $m/M = 0.5$

■ Saturn V:  $u = 4.5 \text{ km/s} \rightarrow v = 3.1 \text{ km/s}$

■ Enterprise:  $u = c \rightarrow v = 180\,000 \text{ km/s}$

→ nutze den “kosmischen Beschleuniger”



❖ zum Beispiel:

- Nachweis kosmischer Muonen mit einer einfachen Scintillator-Anordnung  
→ Demonstrationsversuch
- mögliches Messprogramm  
→ Muonfluss an der Oberfläche  
→ Winkelverteilung  
→ Ausdehnung kosmischer Schauer

❖ besonders interessant:

Die Rate simultaner Ereignisse zwischen entfernten Stationen als Funktion des Abstandes. (kontroverse Resultate von “professionellen” Experimenten.)