

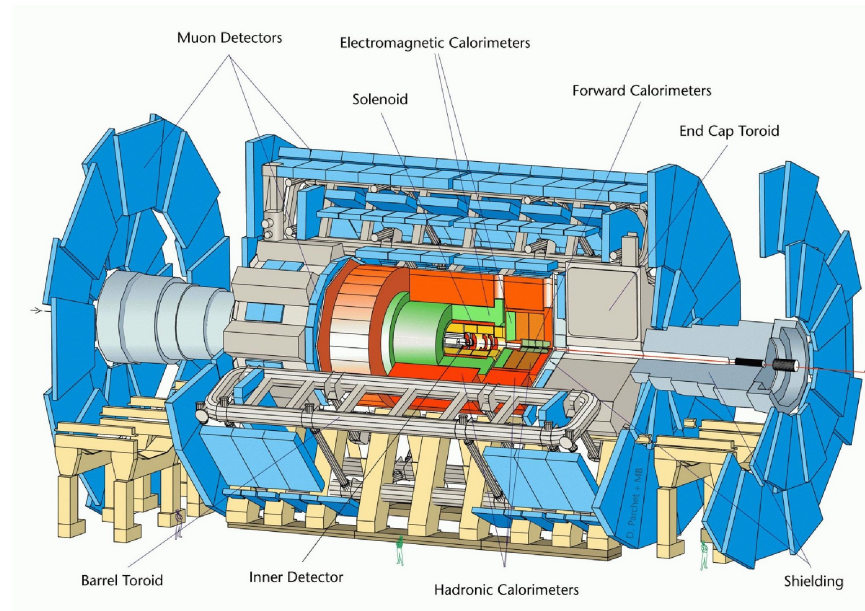
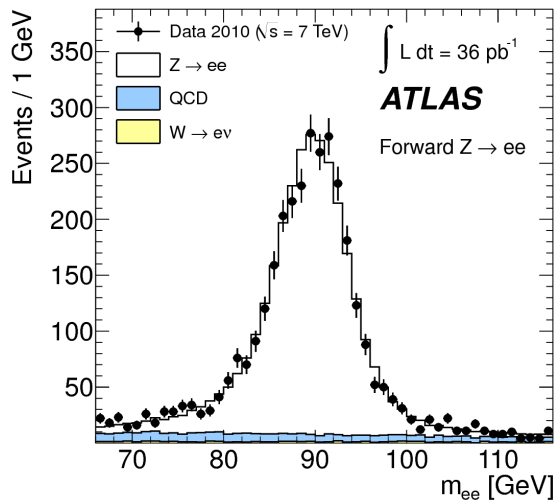
Detektoren für Elementarteilchen

Die “Mikroskope” der Teilchenphysiker

Prof. Wolfgang Wagner
Bergische Universität Wuppertal
International Masterclasses 2022

CMS Detektor am CERN
Einbau der Siliziumspurkammer
CMS wiegt 12.500 t (~ 1 Eiffelturm)

- 1) Warum wird weiter geforscht?
Die offenen Fragen der Teilchenphysik.
- 2) Beschleuniger, der LHC
- 3) Nachweis von Teilchen mit Detektoren
- 4) Rekonstruktion schwerer Teilchen



Die Bausteine des Standardmodells



mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}$	$\approx 1.275 \text{ GeV}$	$\approx 173.2 \text{ GeV}$	0	$\approx 126 \text{ GeV}$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
Quarks	u Up Quark	c Charm Quark	t Top Quark	g Gluon	h Higgs Boson
	d Down Quark	s Strange Quark	b Bottom Quark	γ Photon	Gauge Bosons
	e Electron	μ Muon	τ Tau	Z Z Boson	
	ν_e Electron Neutrino	ν_μ Muon Neutrino	ν_τ Tau Neutrino	W^\pm W^\pm Boson	

Das Higgs-Boson:

- Letzter fehlender Baustein
- 2012 entdeckt

Marieteilchen:
Quarks und Leptonen

Kraftteilchen:
die Bosonen

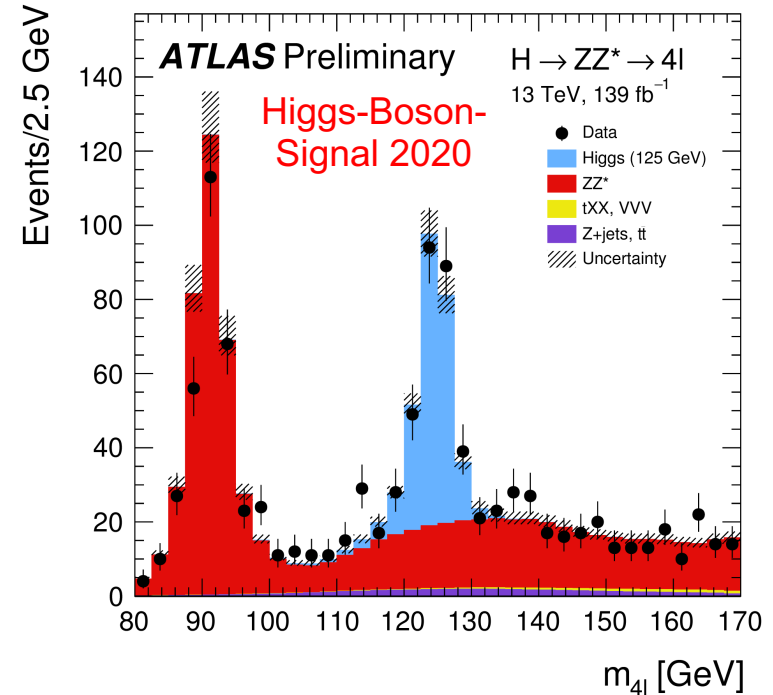
- Entdeckung des Higgs-Bosons 2012
- Ende einer fast 50-jährigen Suche
- Bestätigung des Higgs-Mechanismus als Ursache der Massen der Elementarteilchen
- Die erfolgreichste Theorie aller Zeiten!
- Große Zahl von Präzisionsvorhersagen werden bestätigt.

Ist die Teilchenphysik nun abgeschlossen?

Gibt es nichts mehr zu erforschen?



Nein, Vielzahl von offenen Fragen in der Kosmologie und Struktur der Theorie.



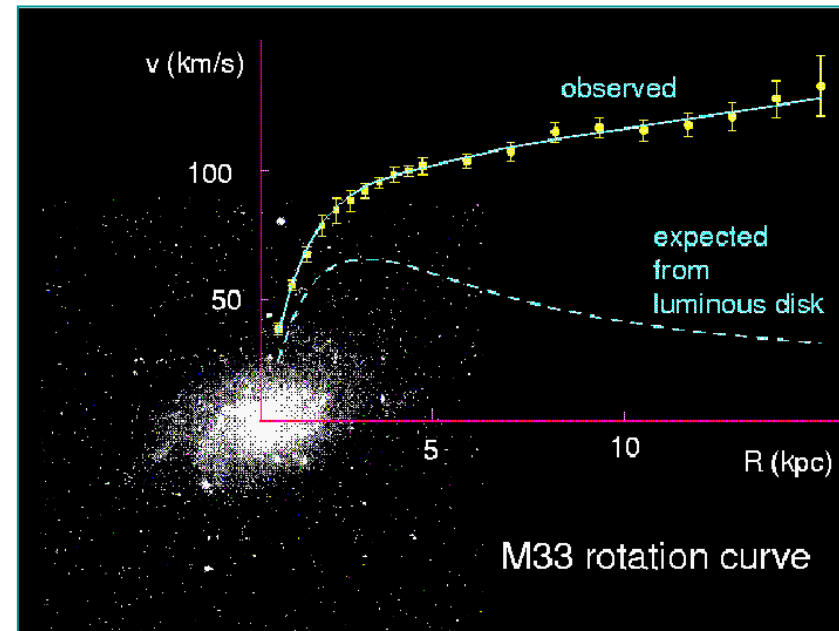
- Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum
 - Wie verschwand die Antimaterie kurz nach dem Urknall?



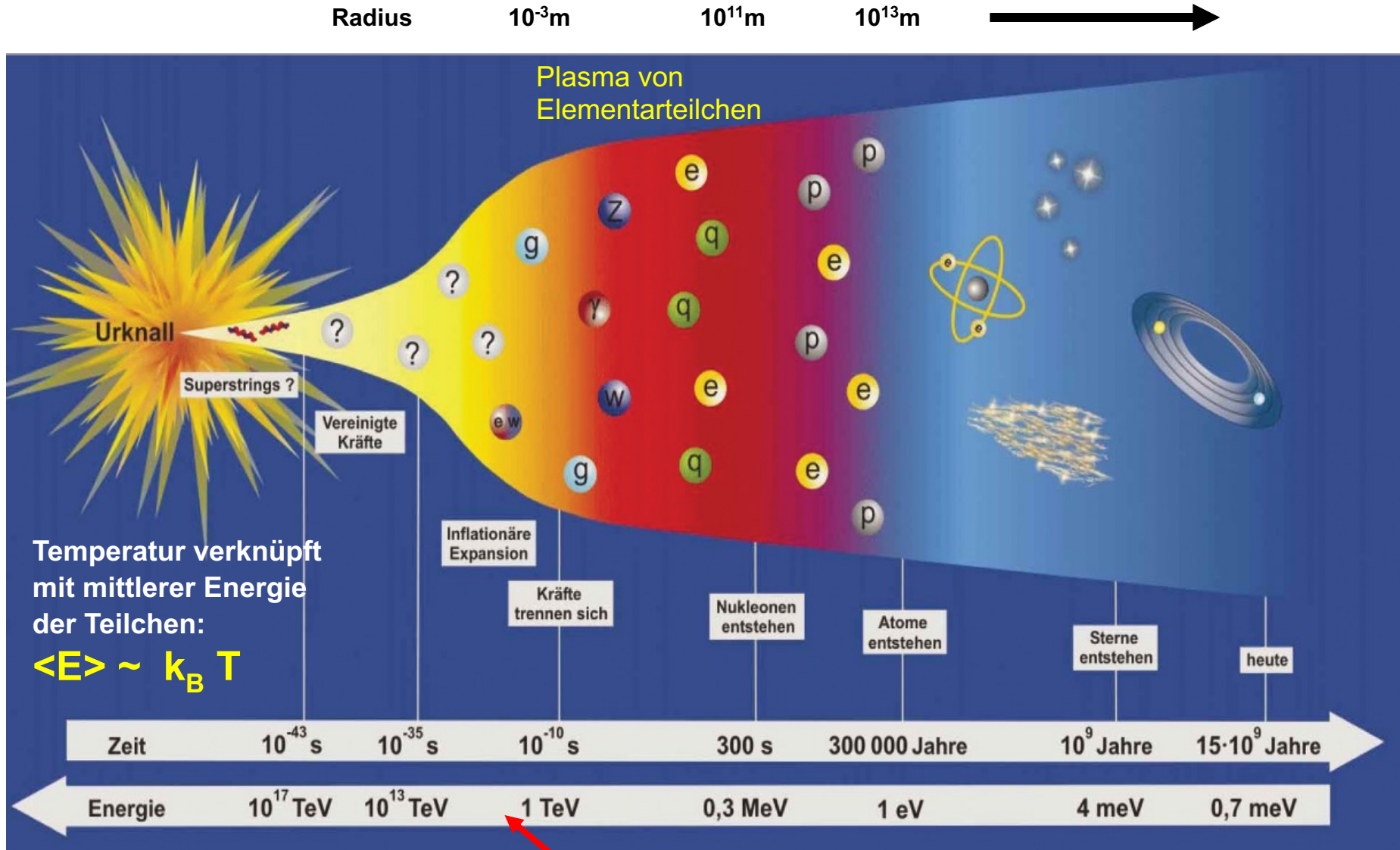
- Verschiedene astronomischen Beobachtungen zeigen:

Es gibt fünfmal mehr Dunkle Materie im Universum als normale (baryonische) Materie.

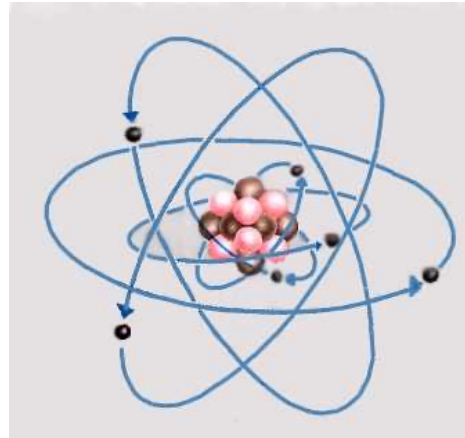
z.B. Umlaufgeschwindigkeiten und -radien von Sternen in Spiralgalaxien ...



Teilchenphysik = Reise in die Vergangenheit des Universums



Atome sind neutral



Ladung des Elektrons ist exakt gleich der Ladung des Protons

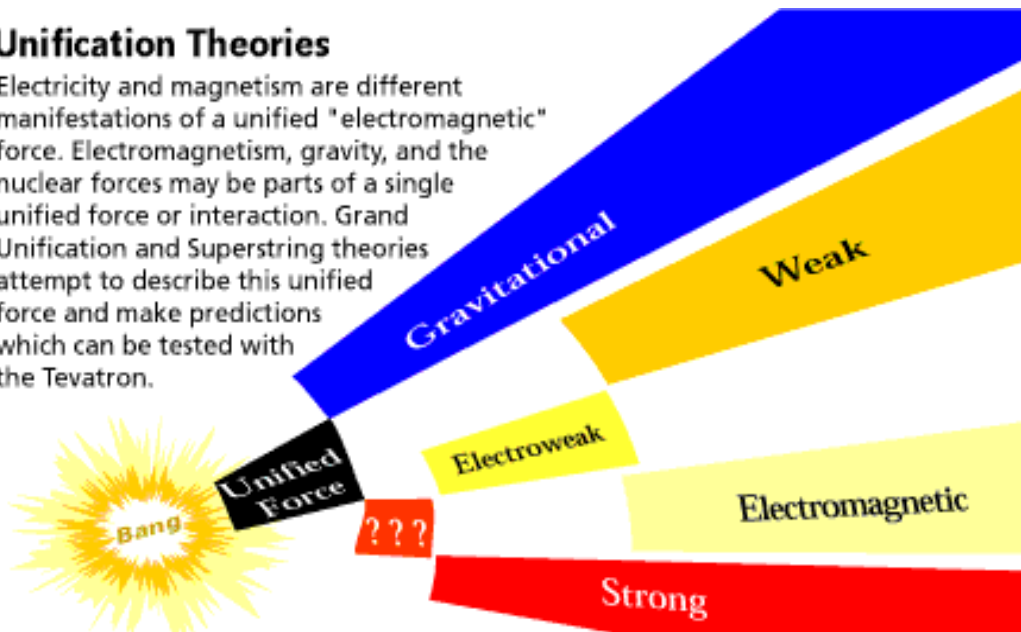
Warum?

Vorschlag: Vereinheitlichung der Kräfte

Gibt es eine verborgene Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen?

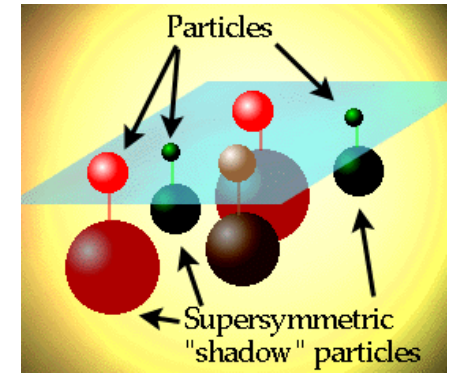
Unification Theories

Electricity and magnetism are different manifestations of a unified "electromagnetic" force. Electromagnetism, gravity, and the nuclear forces may be parts of a single unified force or interaction. Grand Unification and Superstring theories attempt to describe this unified force and make predictions which can be tested with the Tevatron.



Antworten auf die offenen Fragen

- Materie-Antimaterie-Asymmetrie
- Natur der Dunklen Materie
- Große Vereinheitlichung der Kräfte

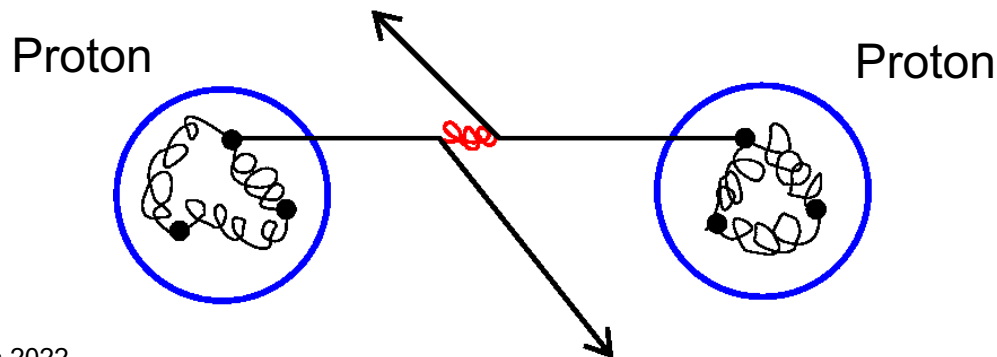


erwartet man von bisher unbekanntem, **sehr schweren** Elementarteilchen,
z.B. weitere Kraftteilchen, Materieteilchen oder Higgs-Bosonen



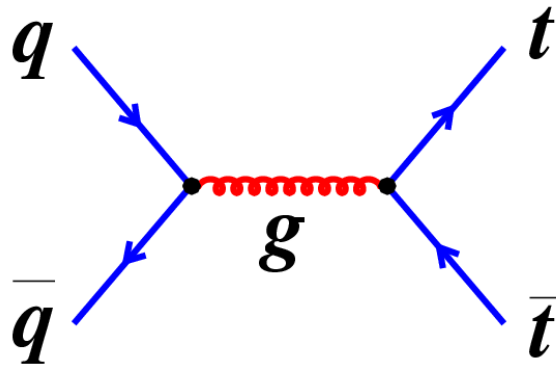
Strategie der Teilchenphysiker:

Kollidiere normale Materieteilchen bei sehr hoher Energie, erzeuge neue schwere Teilchen und beobachte sie mit Detektoren.

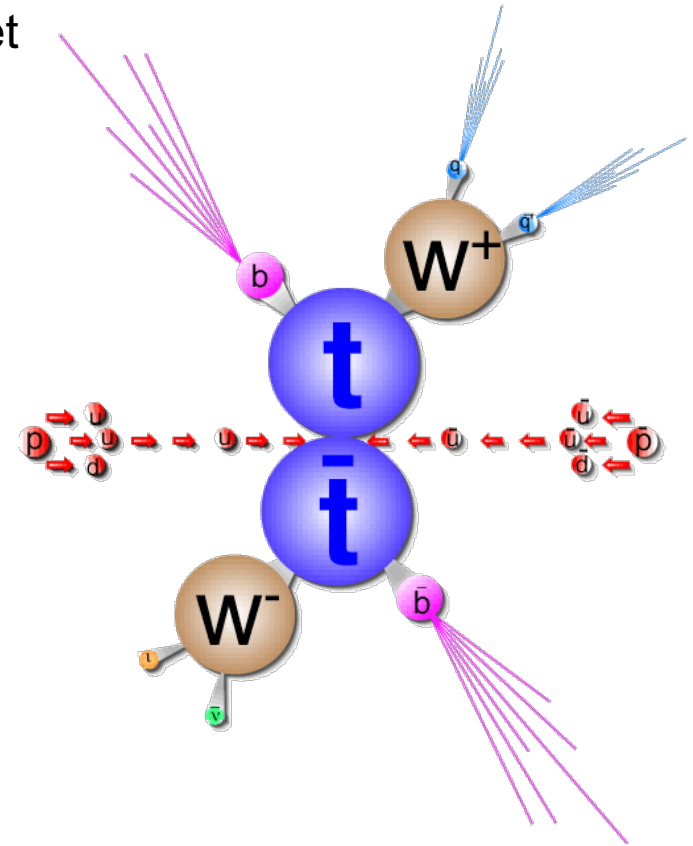


Wie kann man Teilchen erzeugen?

Beispiel: Top-Quark-Antiquark-Paarherzeugung



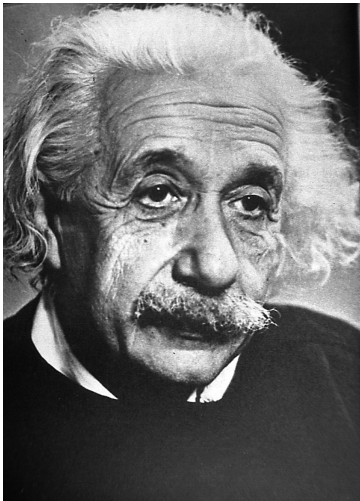
Jet



Erzeugung schwerer Teilchen:

$$m = E/c^2$$

Paarerzeugung: $E_{\text{CMS}} \geq 2 M \cdot c^2$



A. Einstein
1879 - 1955



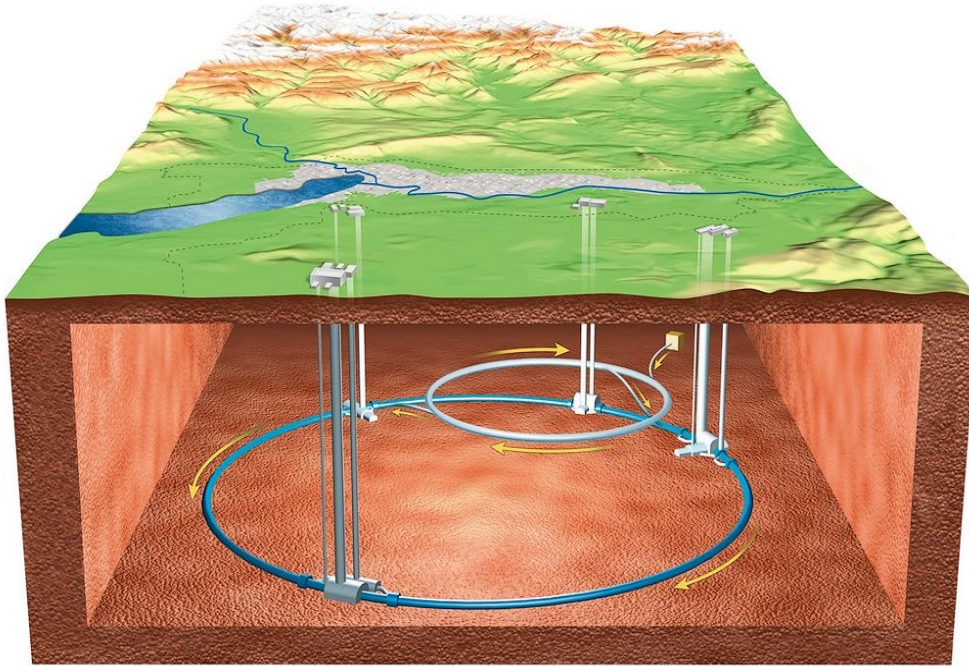
Protonen müssen auf sehr hohe Energie gebracht werden.



Teil 2: Beschleuniger

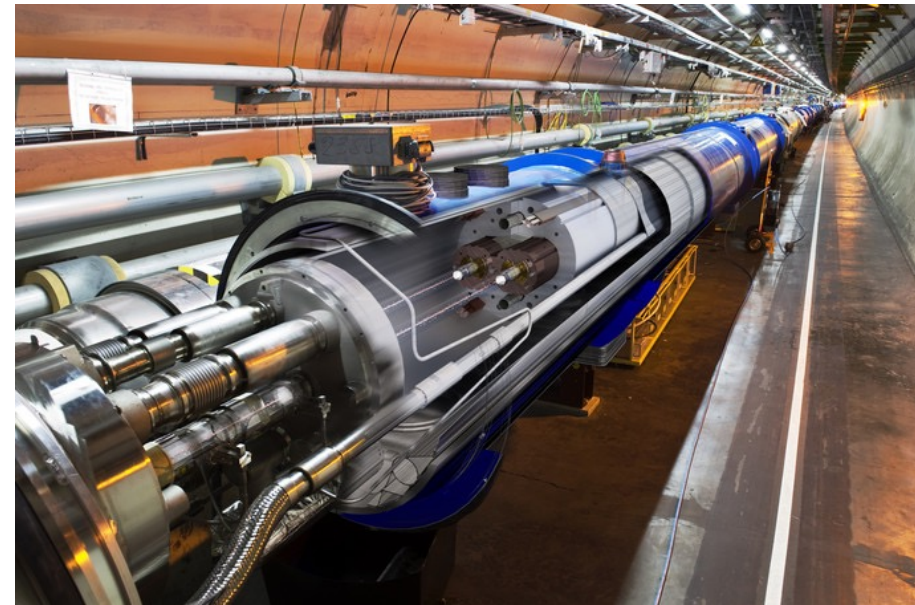
Linearbeschleuniger am Fermi
National Accelerator Laboratory,
Batavia, Illinois, USA

Der Large Hadron Collider (LHC)

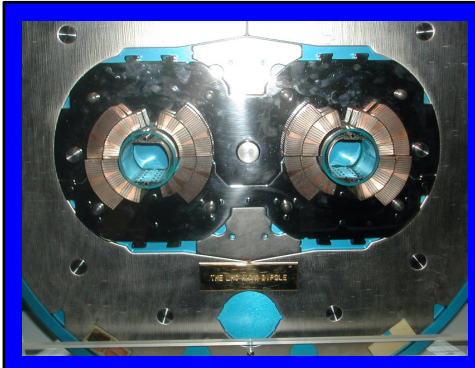


- Der **leistungsstärkste** Beschleuniger der Welt: im Tunnel am CERN mit 27 km Umfang
- Zwei gegenläufige Protonenstrahlen: machen 10.000 Runden / Sekunde
- Kollisionen an 4 Punkten mit Rekordenergie von 13 TeV, wie 10^{-13} - 10^{-14} s nach dem Urknall

- Jeder Strahl hat ca. 2500 Protonenpakete
- 100 Milliarden Protonen pro Paket (klingt viel, aber $1 \text{ mol} = 6 \cdot 10^{23}$)

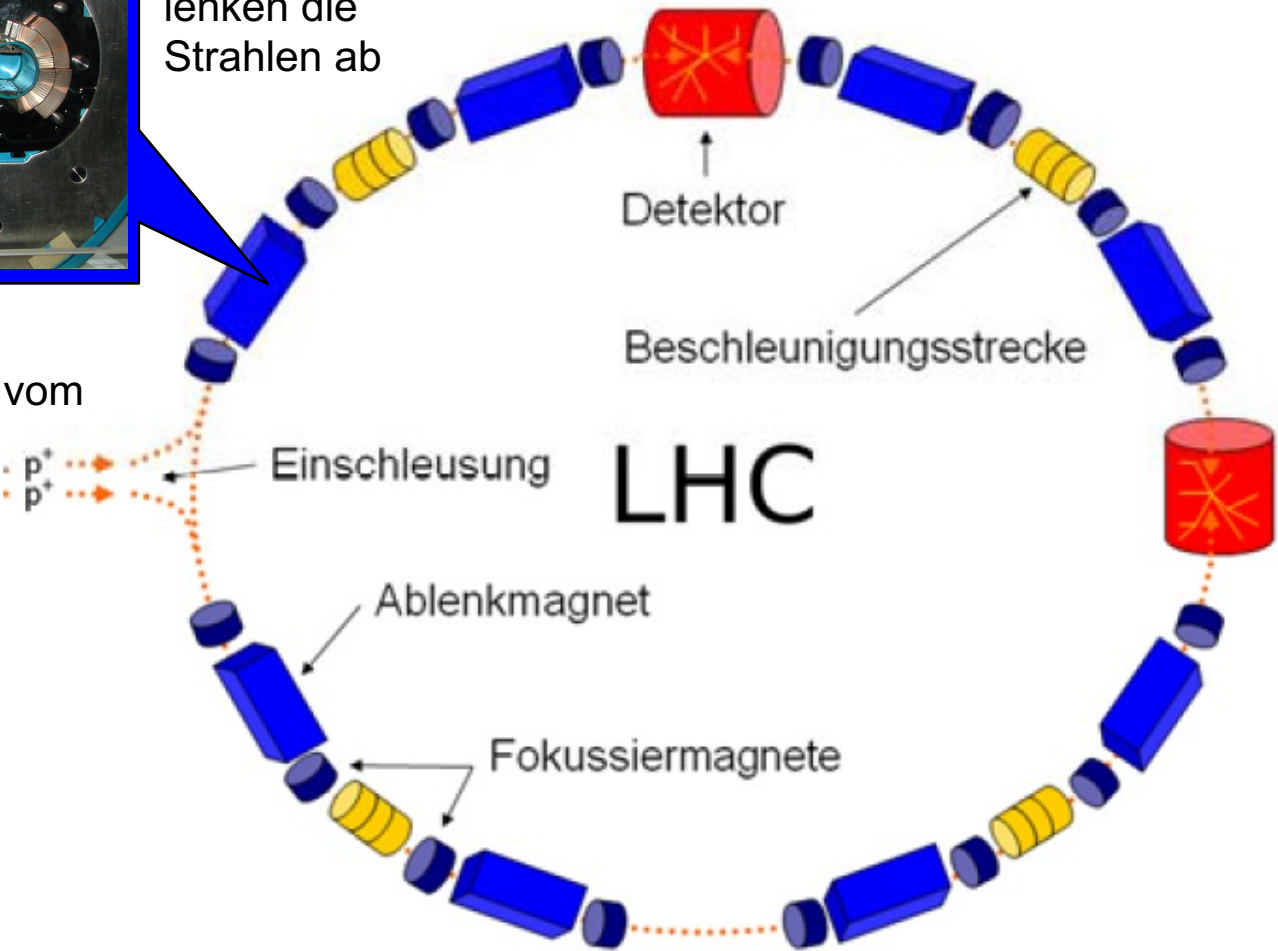


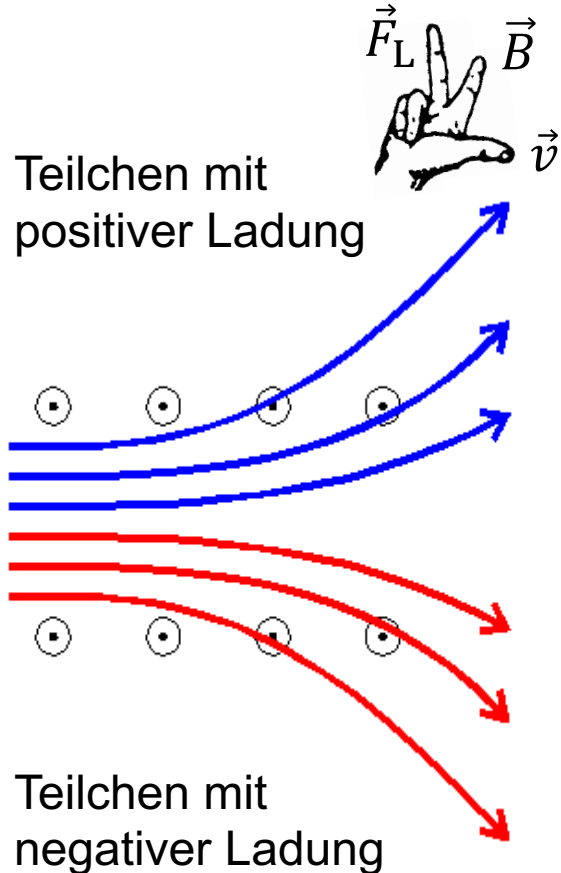
Komponenten des LHC (Schema)



Dipolmagnete lenken die Strahlen ab

Protonen werden vom Vorbeschleuniger eingespeist





Rechte Hand

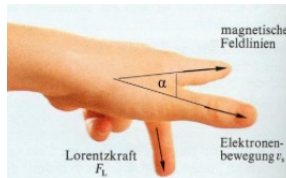
Bewegte geladene Teilchen werden im Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung abgelenkt:

Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

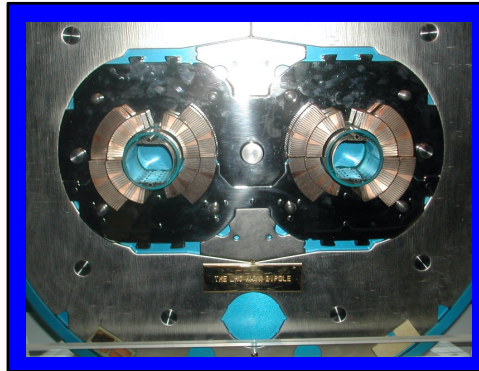
Im LHC werden die Protonen auf einer geschlossener Bahn* gehalten.

Drei-Finger-Regel:
Linke Hand



*keine Kreisbahn, da es auch gerade Stücke gibt

Komponenten des LHC (Prinzip)



Dipolmagnete lenken die Strahlen ab

Protonen werden vom Vorbeschleuniger eingespeist

p^+
 p^+

Einschleusung

Beschleunigung in Hohlraumresonatoren



Detektor

Beschleunigungsstrecke

LHC

Ablenkmagnet

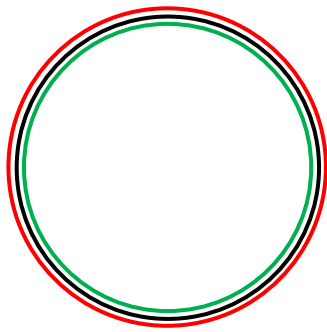
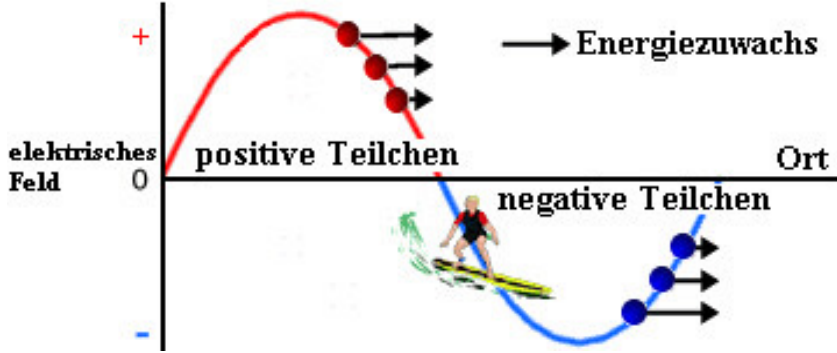
Fokussiermagnete

Fokussierung senkrecht zur Strahlrichtung mit Quadrupolmagneten (magnetische Linsen)

In den Hohlraumresonatoren „reiten“ die Protonen auf einer elektromagnetischen Welle.



$p > p_0$
Sollbahn: $p = p_0$
 $p < p_0$



(wichtig: Teilchen sind im LHC bereits bei der Injektion relativistisch)

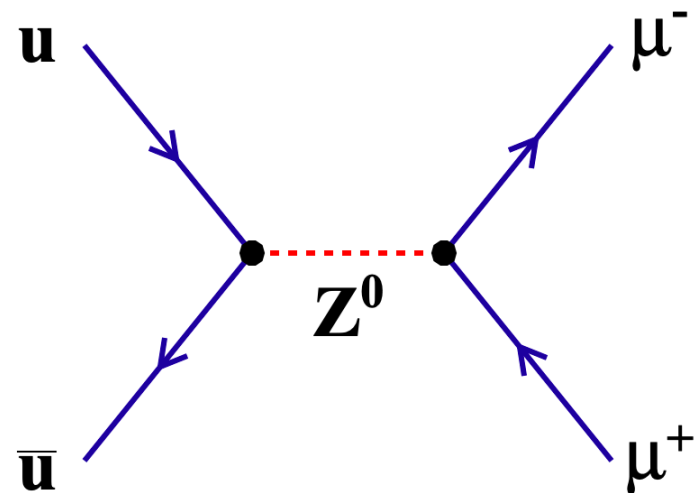
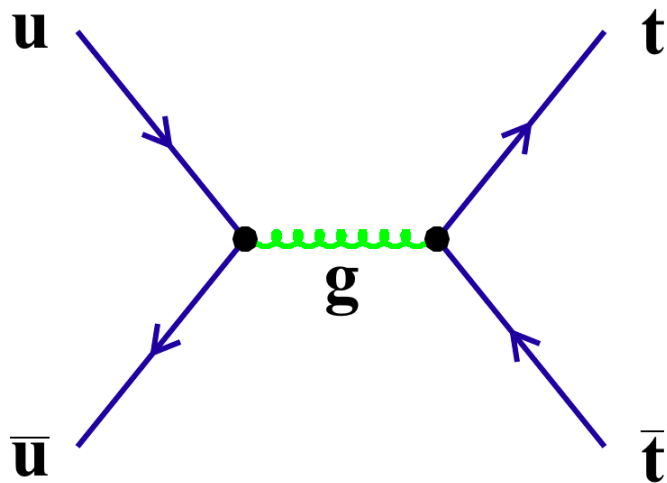
Teil 3:

Was ist Aufgabe der Detektoren?

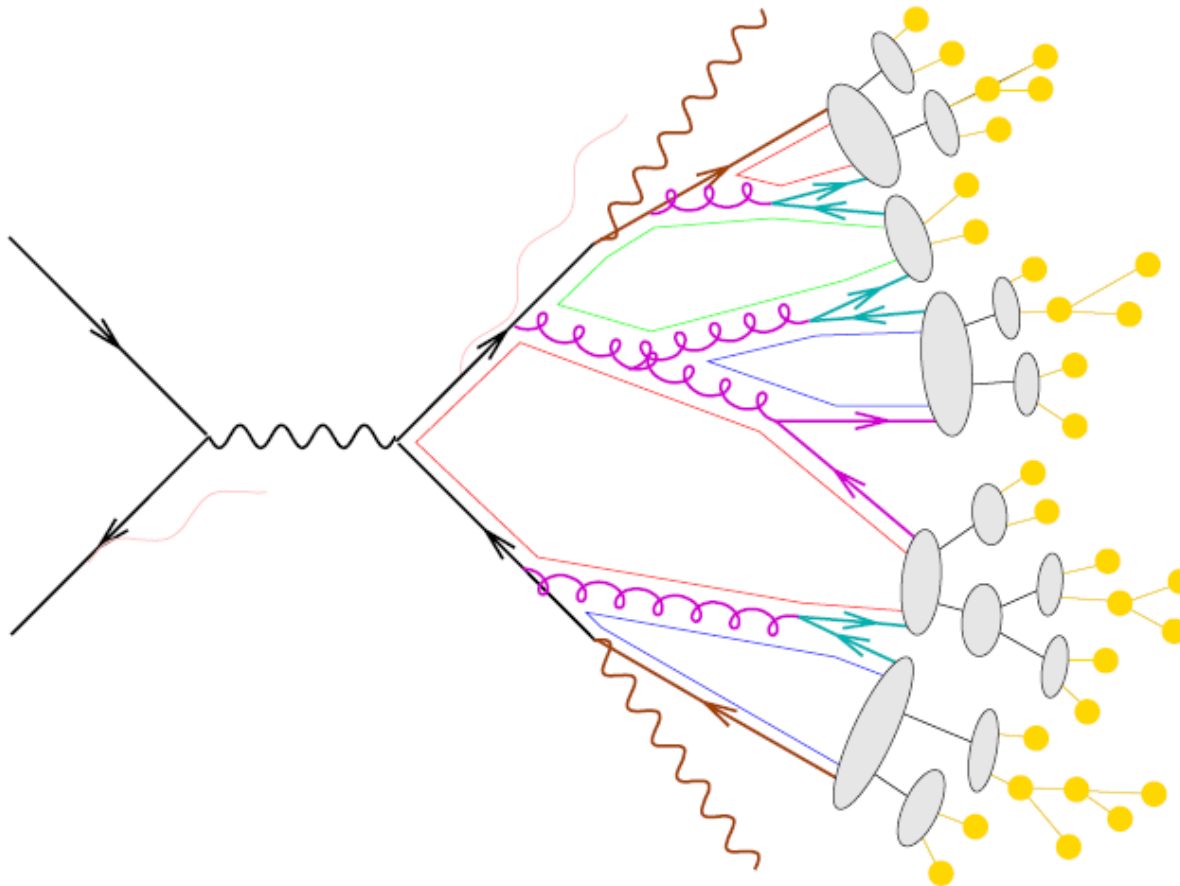
Wie funktionieren sie?

„Beobachtung“ der primären, fundamentalen Prozesse

= Messung der **Impulse** und **Energien** der auslaufenden Elementarteilchen



Schemabild eines hochenergetischen Streuprozesses

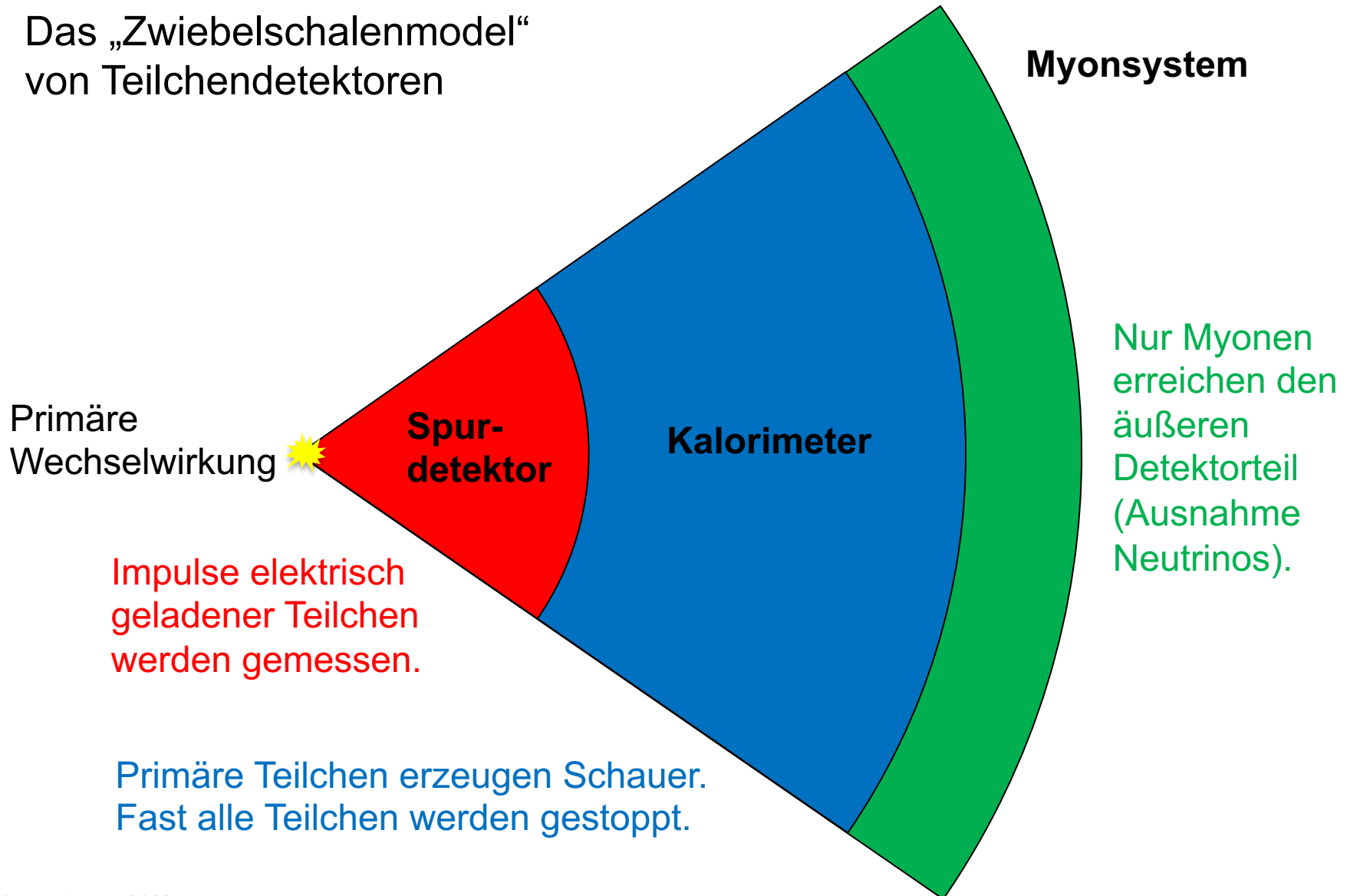


Nur Teilchen mit $\tau > 10^{-10}$ s erreichen den Detektor.

- Elektronen,
- Myonen,
- Photonen,
- Pionen, Kaonen, Protonen, Λ -Baryonen


Nur wenige Teilchensorten leben lange genug, um den Detektor zu erreichen.

Das „Zwiebelschalenmodell“ von Teilchendetektoren

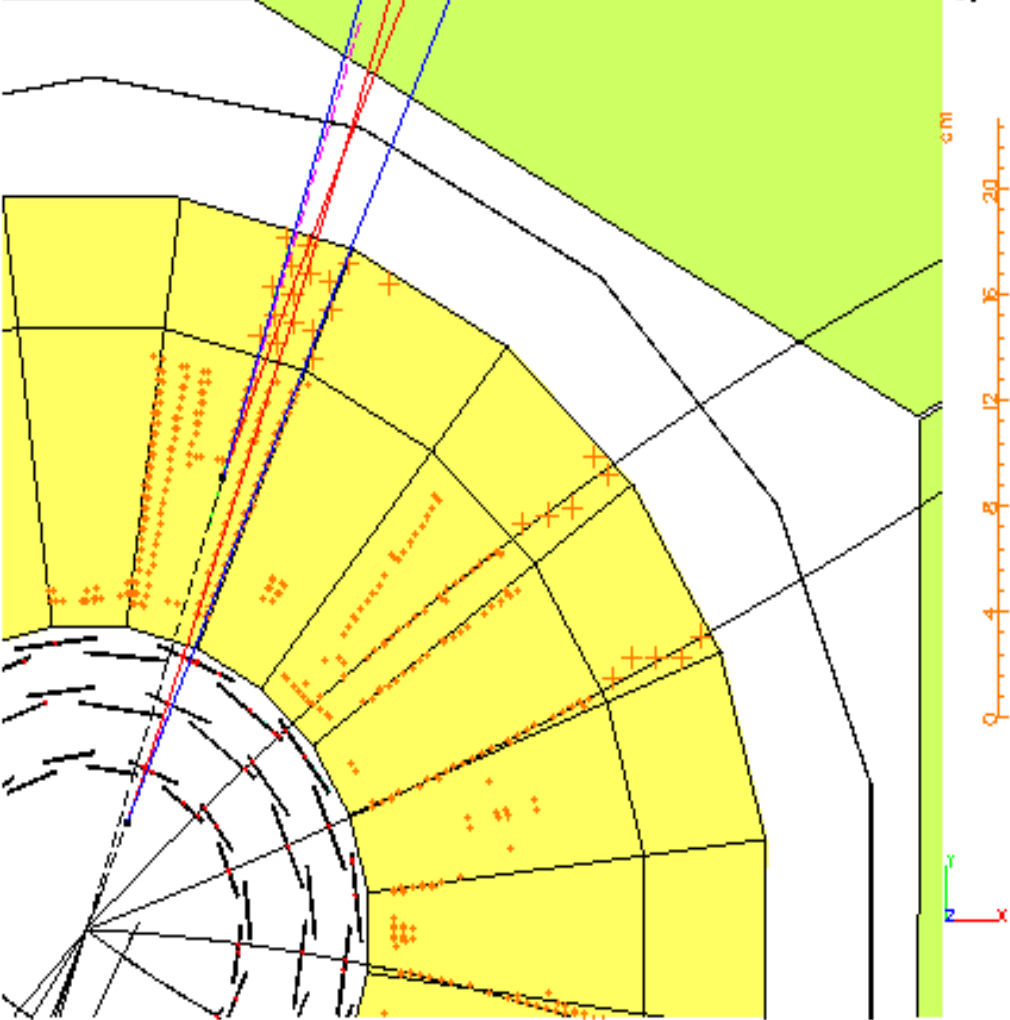


Spurdetektoren



	DELPHI	Runc	48139	Evt:	1831
	Beam	45.6 GeV	Prog	3-Jun-1996	
	DAS:	10-Jul-1994	Scam	12-Jun-1996	
		081937		Tanagra	

	TD	TE	TS	TR	TV	ST	SR
Act	143	0	1	10	5	0	0
	(17)	(11)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Deat	4	4	1	0	0	0	0
	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

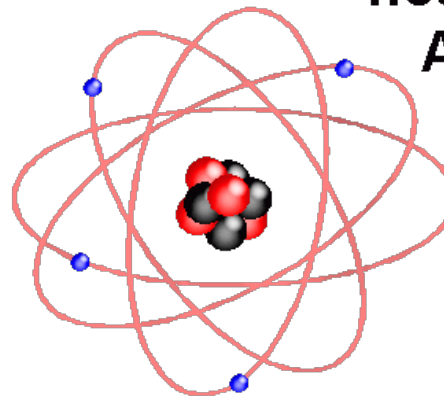


- Geladenes Teilchen fliegt an Atom vorbei
- Hüllenelektronen „spüren“ die Ladung des Teilchens
- Elektron wird aus der Hülle gelöst
→ positiv geladenes Ion bleibt zurück

**geladenes
Teilchen**



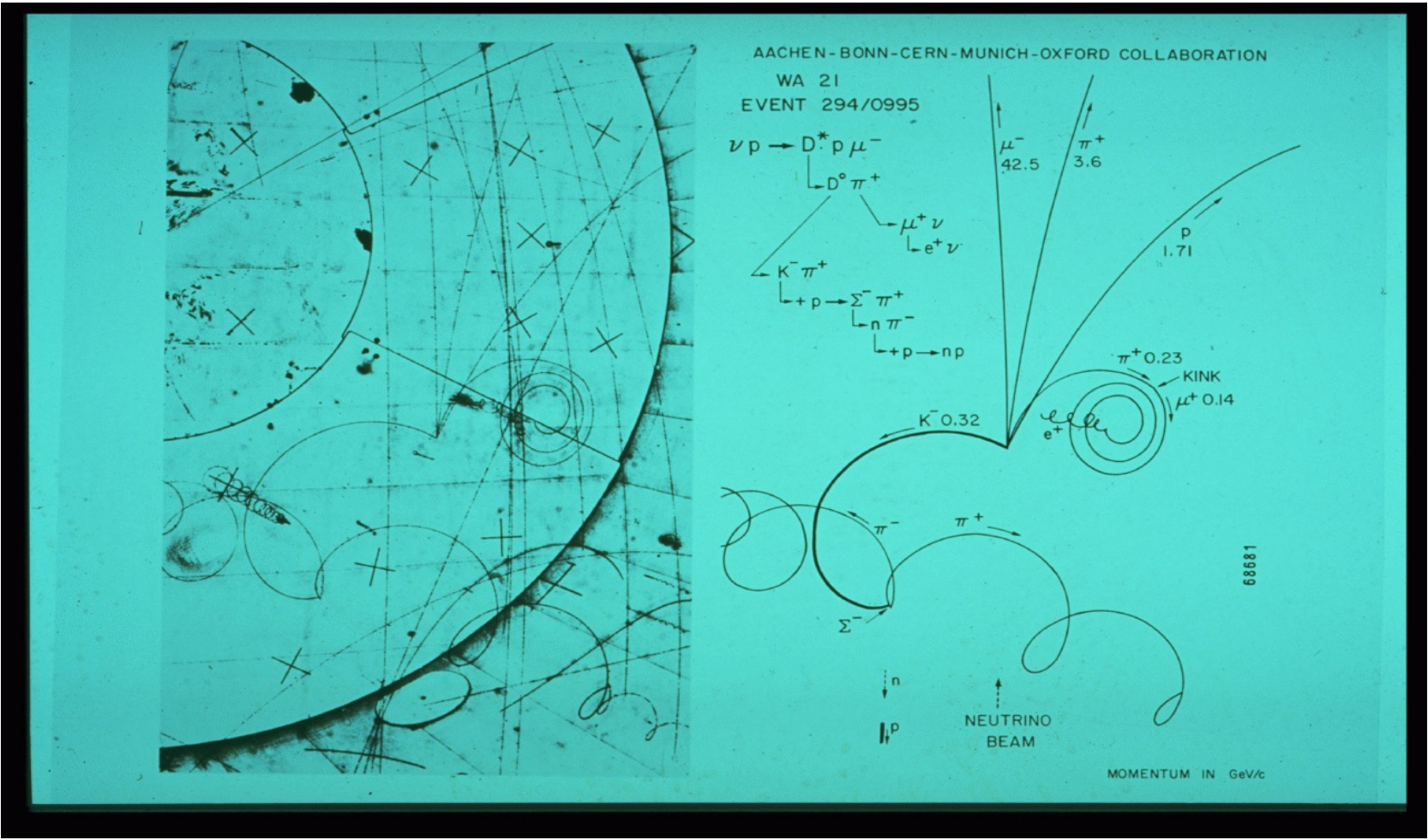
**neutrales
Atom**



Die Blasenkammer: längst historisch, ...



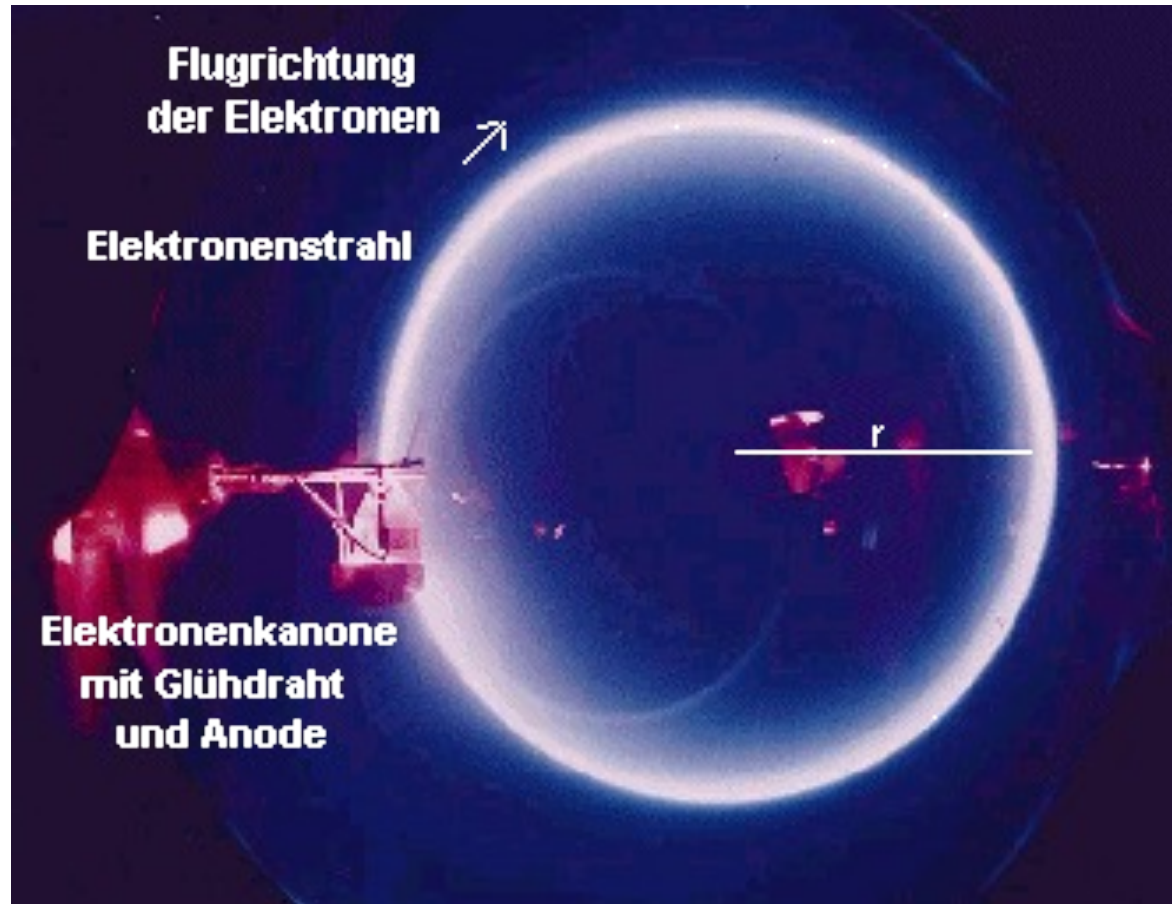
... aber anschaulich:

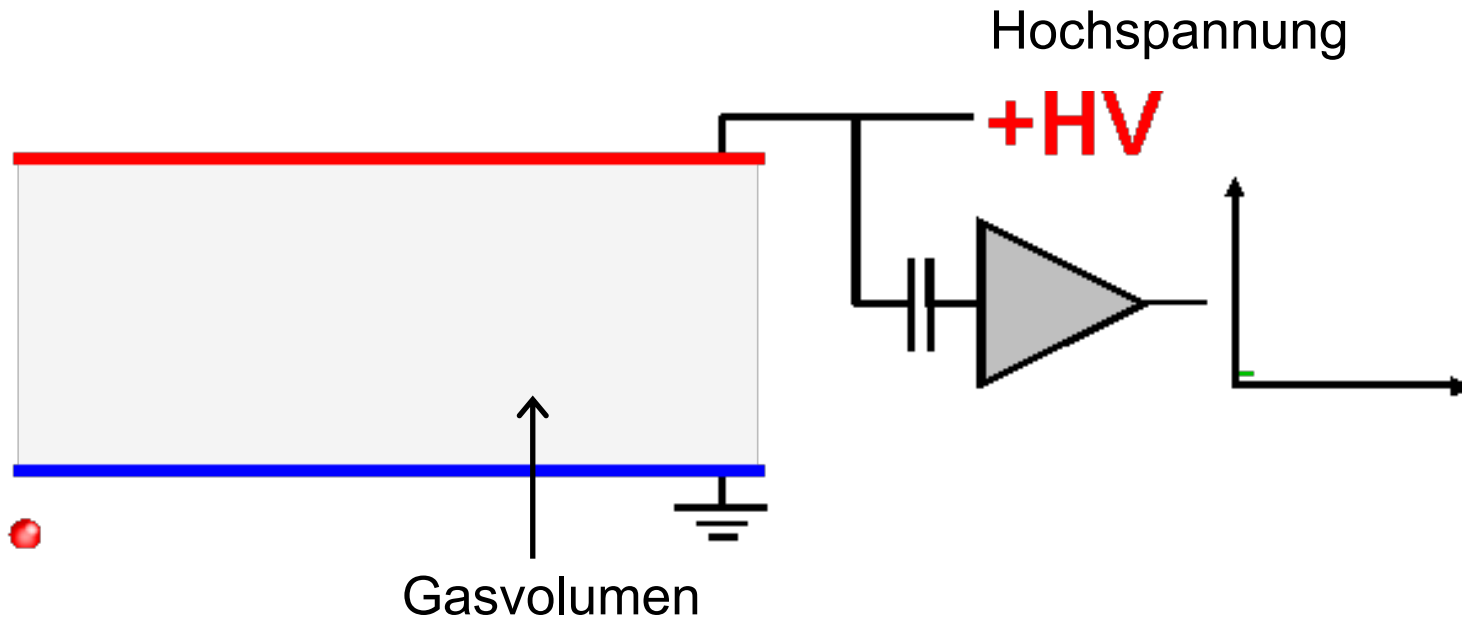


Geladene Teilchen ionisieren überhitzte Flüssigkeit → Blasenbildung

Fadenstrahlrohr:

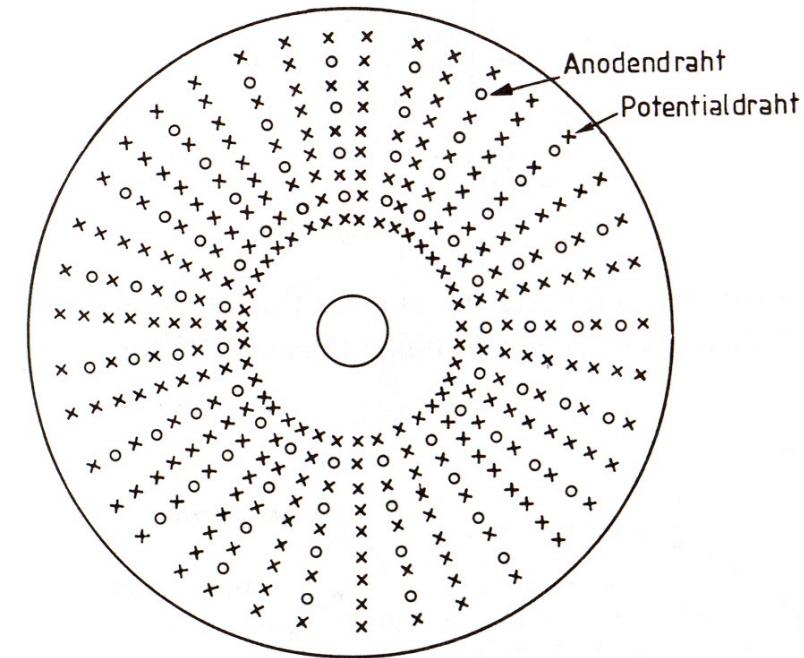
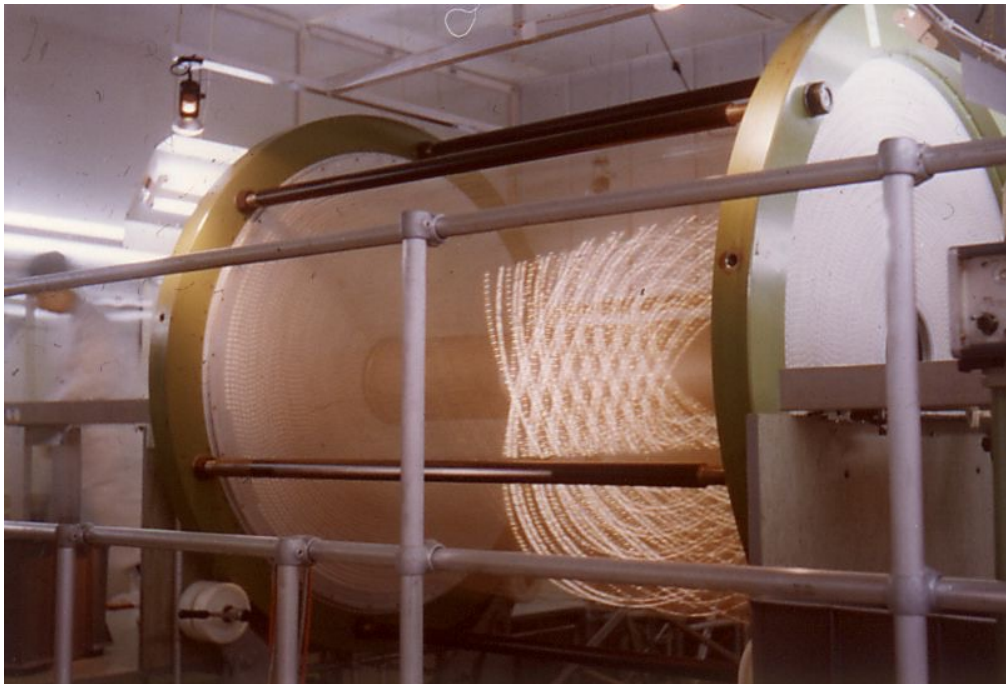
- Elektronen in Gas werden durch Magnetfeld auf Kreisbahn gezwungen.
- Gas wird entlang der Elektronenbahn ionisiert und damit zum Leuchten angeregt.



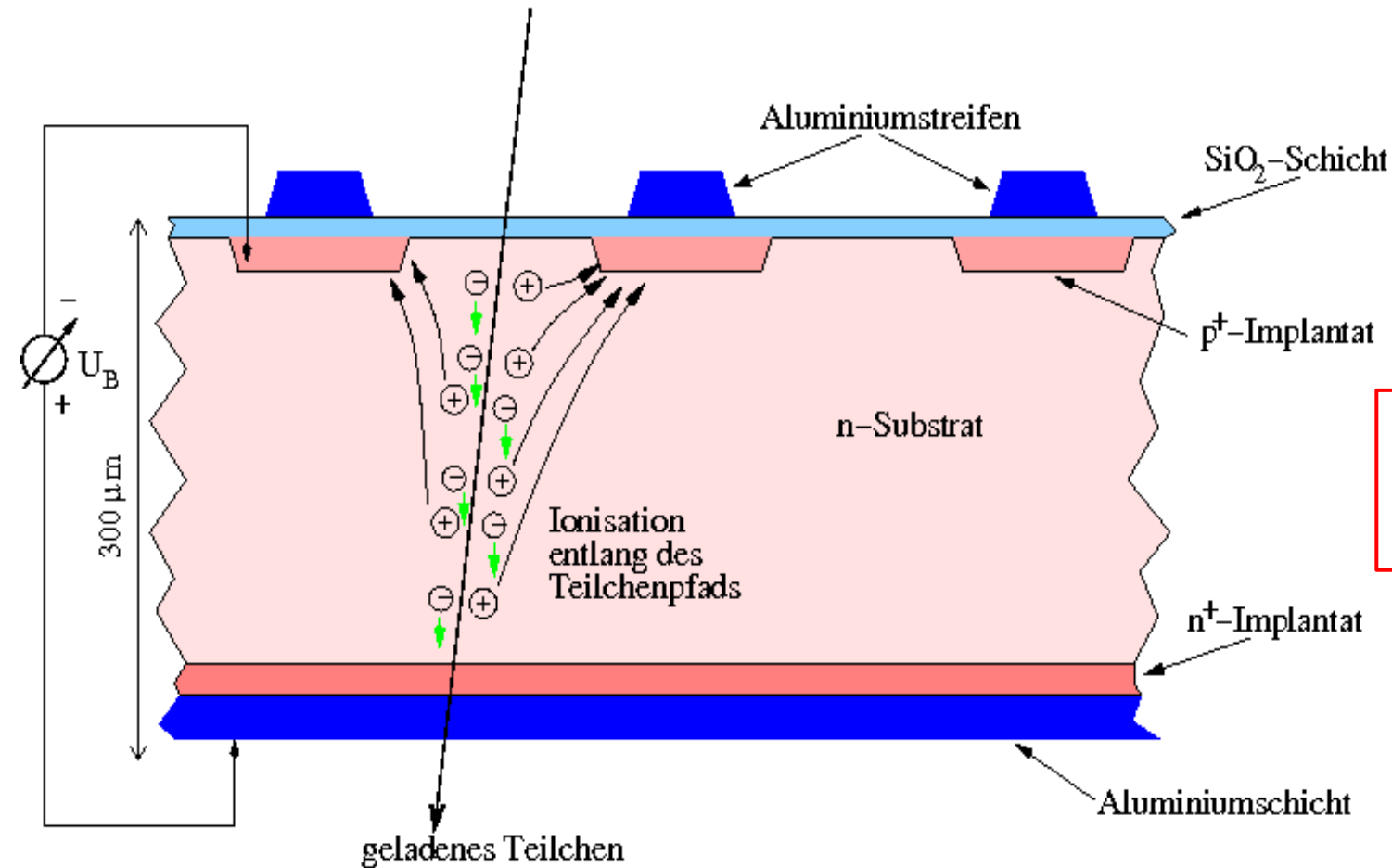


Eine Elektrode kann durch Drähte ersetzt werden:

- Viele Drähte erlauben eine **räumliche Rekonstruktion** der Teilchenspur
- Volumen ist mit Gas gefüllt (Argon, Methan, CO_2 ...)



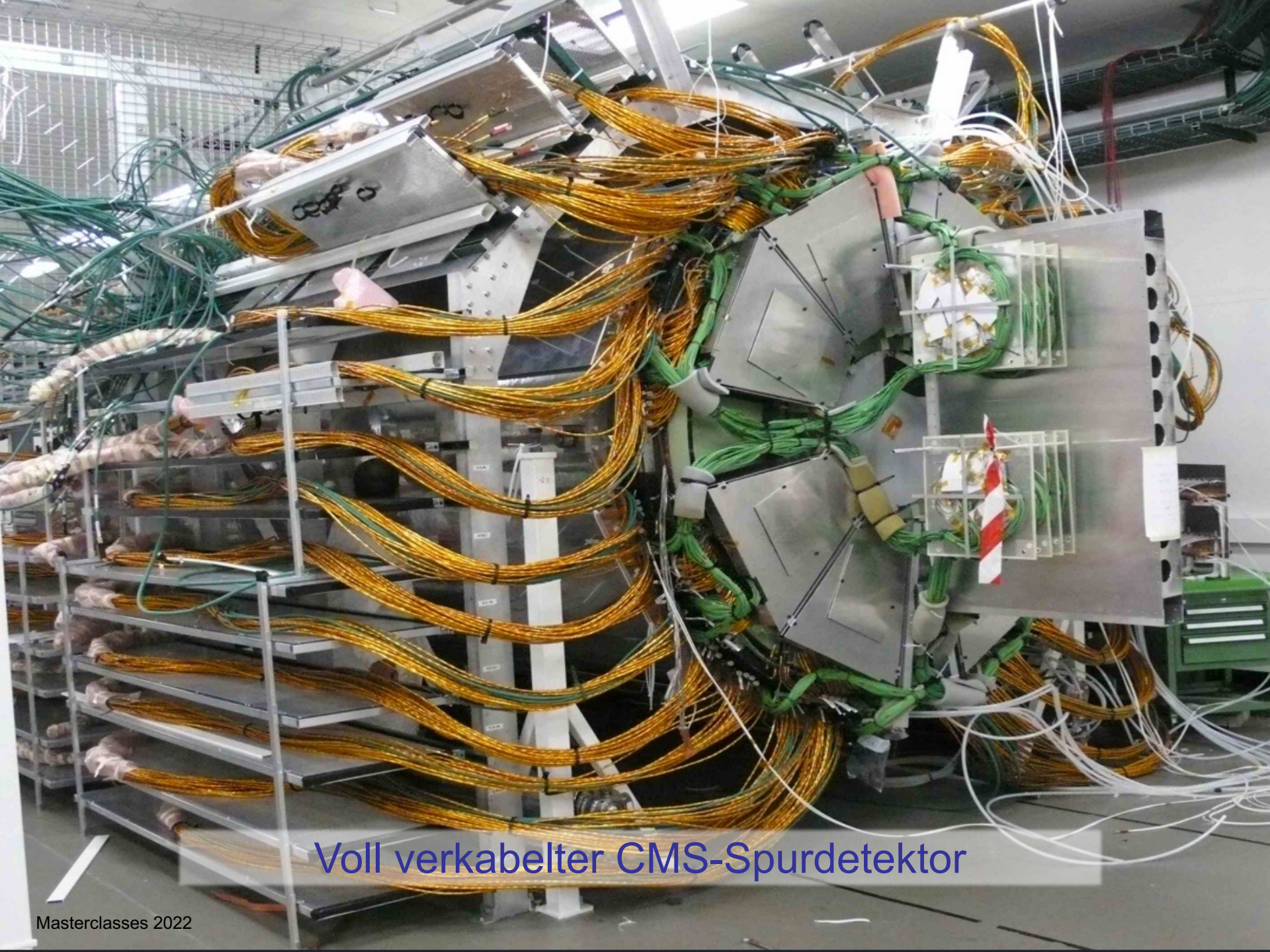
einseitig strukturierter Streifenzähler funktioniert wie Diode in Sperrrichtung



Sehr feine
Segmentierung
erlaubt sehr
genaue
Ortsauflösung

Arbeitet als
Festkörperioni-
sationskammer.

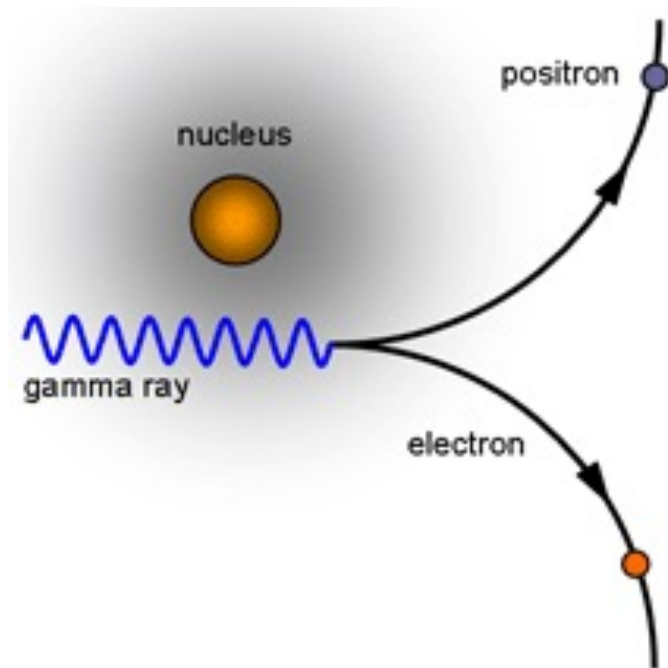
Der Spurdetektor von CMS
besteht aus Siliziumstreifenzählern



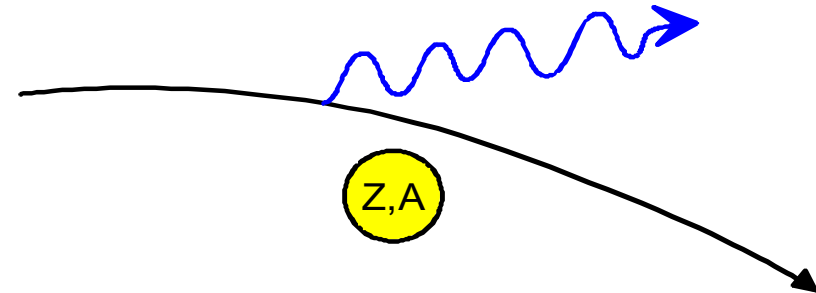
Voll verkabelter CMS-Spurdetektor

Wechselwirkung von hochenergetischen ($E_\gamma > 10 \text{ MeV}$) Photonen und Elektronen mit Materie wird durch zwei Prozesse dominiert:

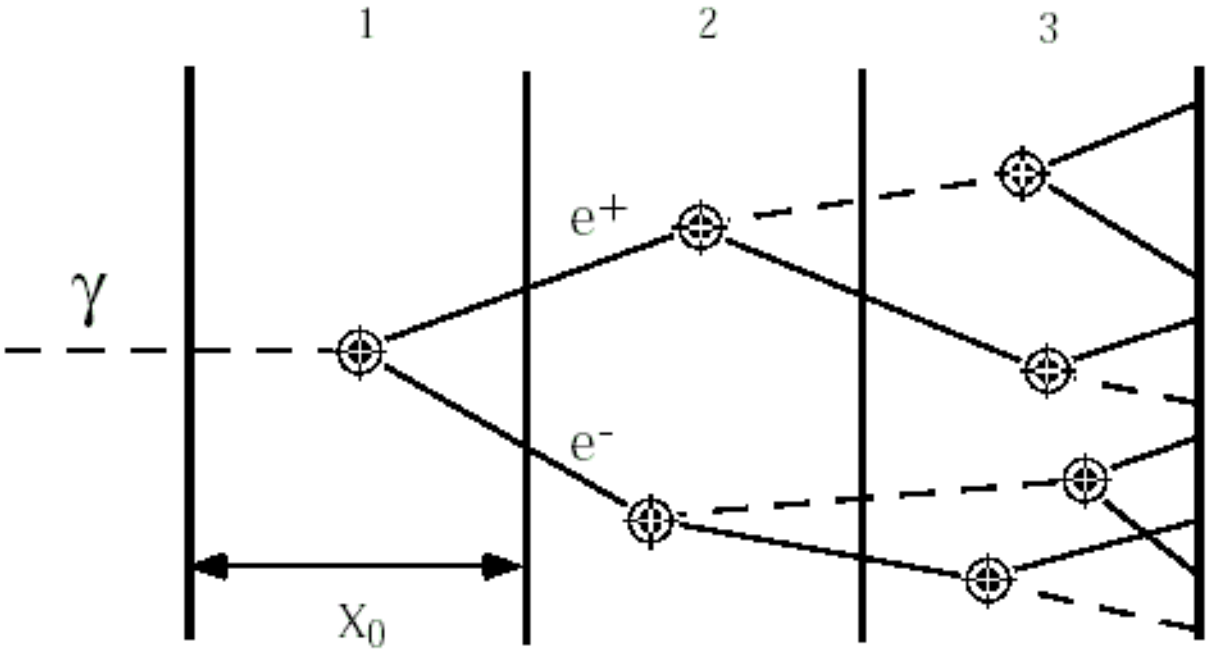
Erzeugung von e^+e^- Paaren



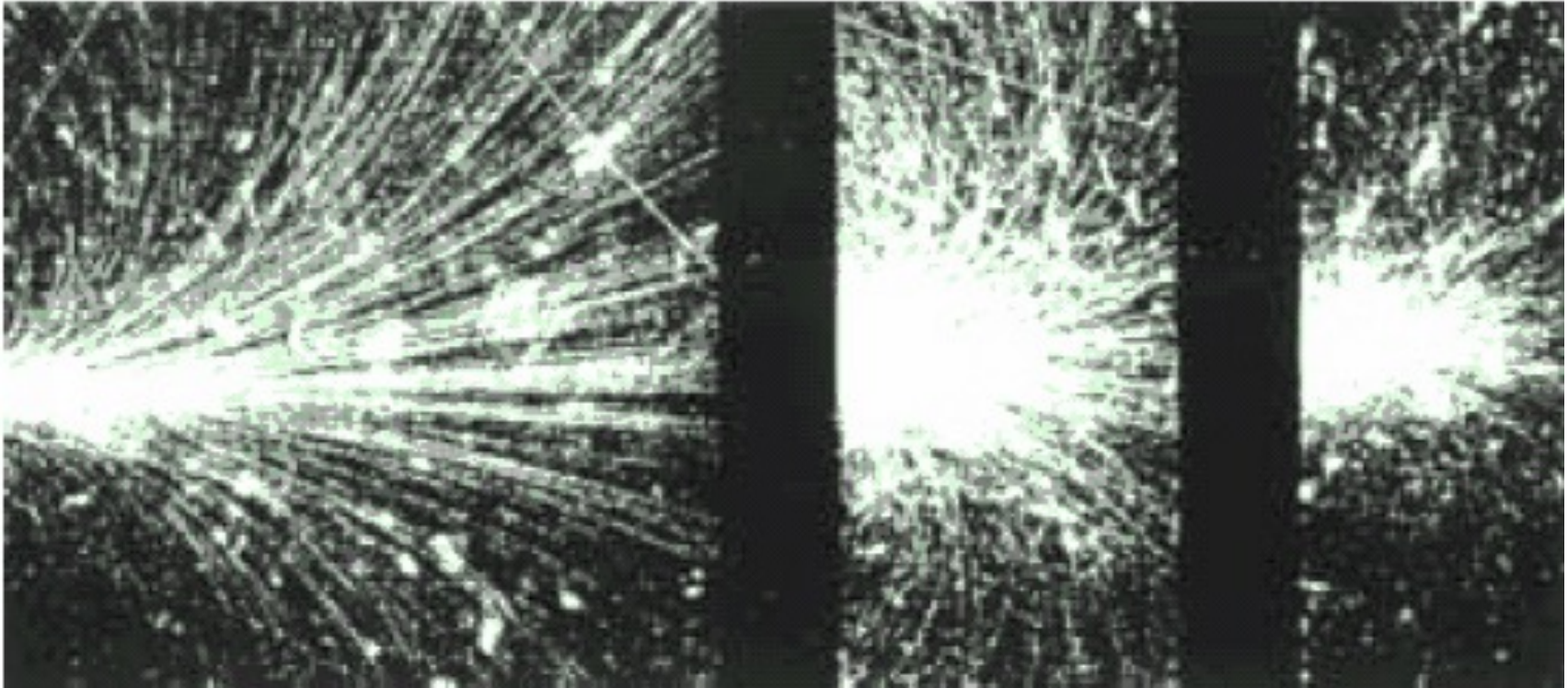
Bremsstrahlung



Beide Prozesse zusammen erzeugen einen elektromagnetischen Schauer.

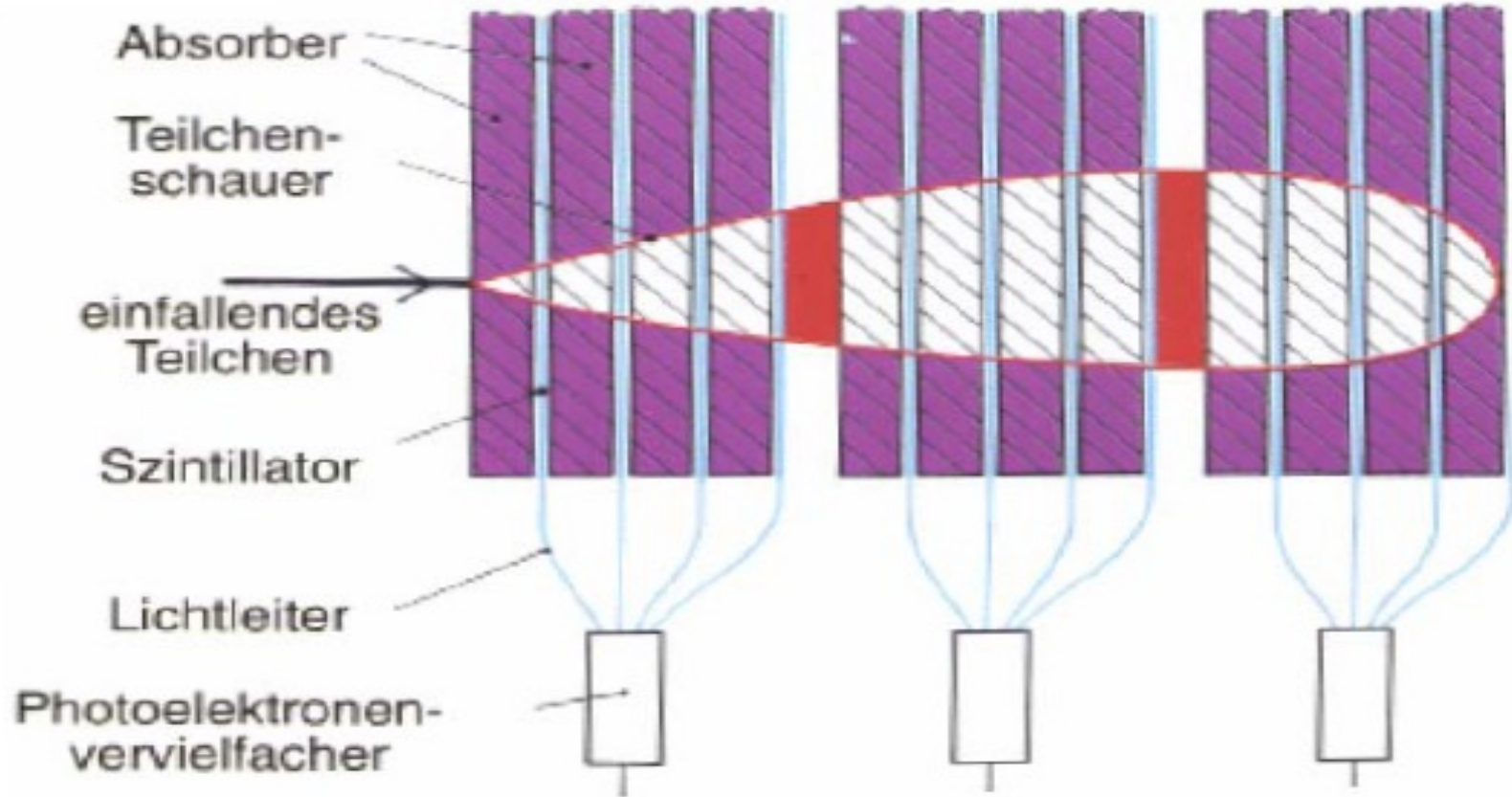


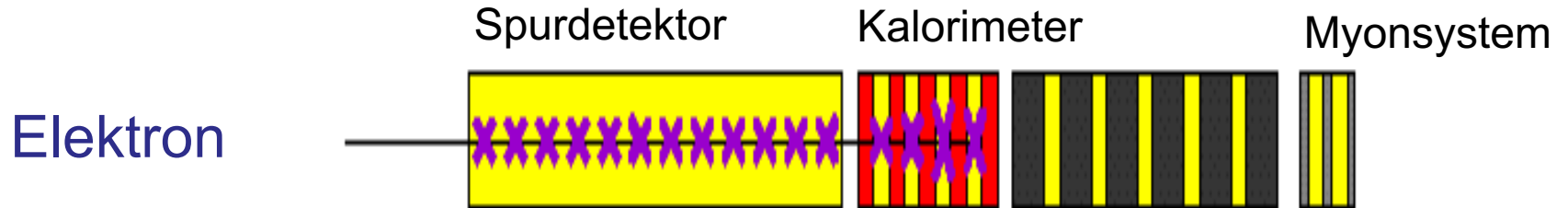
... in einer Nebelkammer.



- Die schwarzen Bereiche sind Blei-Platten.
- Senkrecht zur Bildebene wirkt ein Magnetfeld.

Aufbau eines Kalorimeters

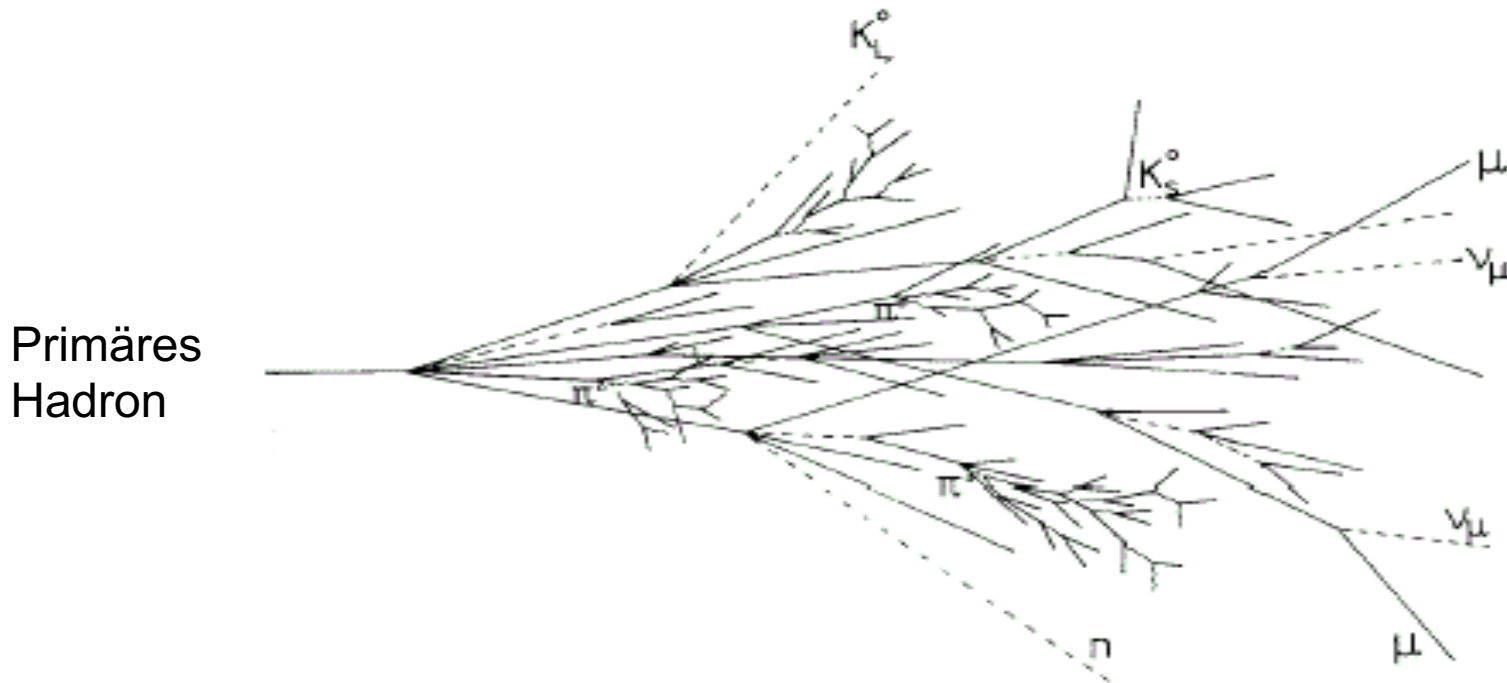




- Signale im Spurdetektor
- Vollständige Energieabgabe im 1. (elektromagnetischen) Kalorimeter durch Kaskaden von Bremsstrahlung und Paarbildung



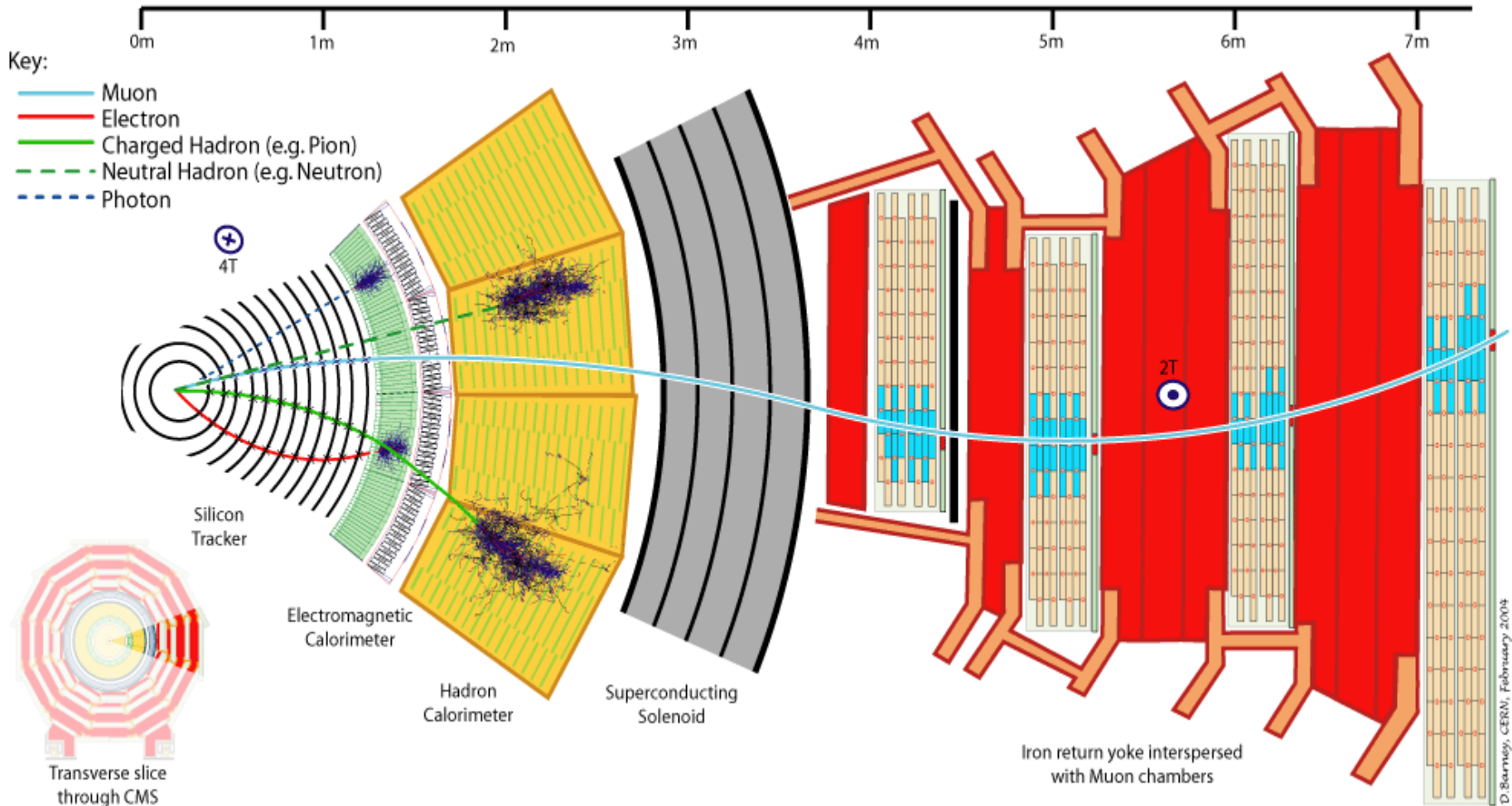
- **Keine** Signale in der Spurkammer
- Vollständige Energieabgabe im 1. (elektromagnetischen) Kalorimeter durch Kaskaden von Paarerzeugung und Bremsstrahlung



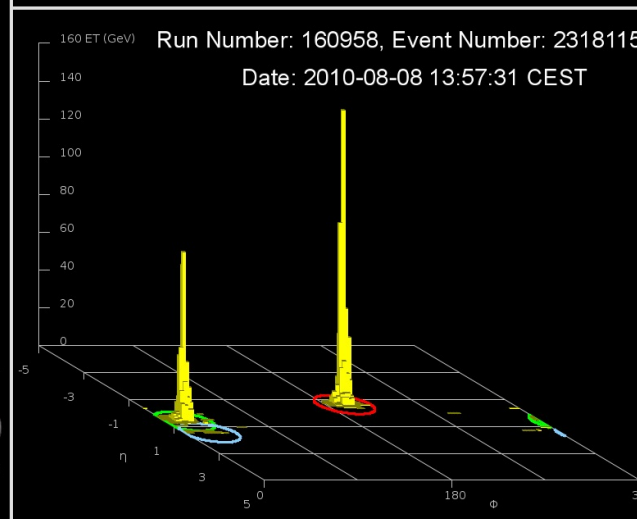
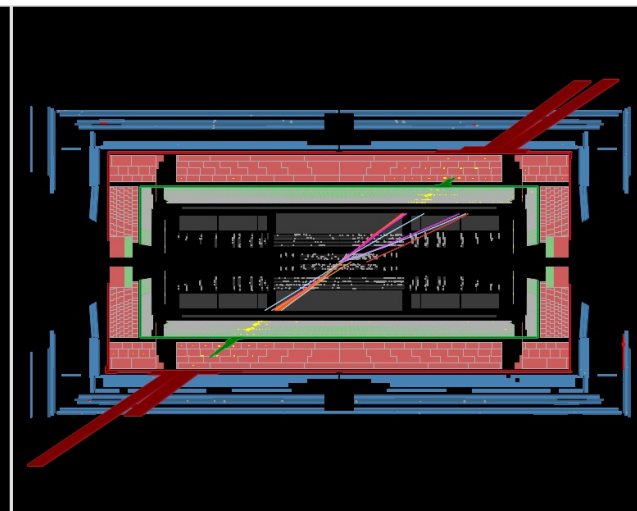
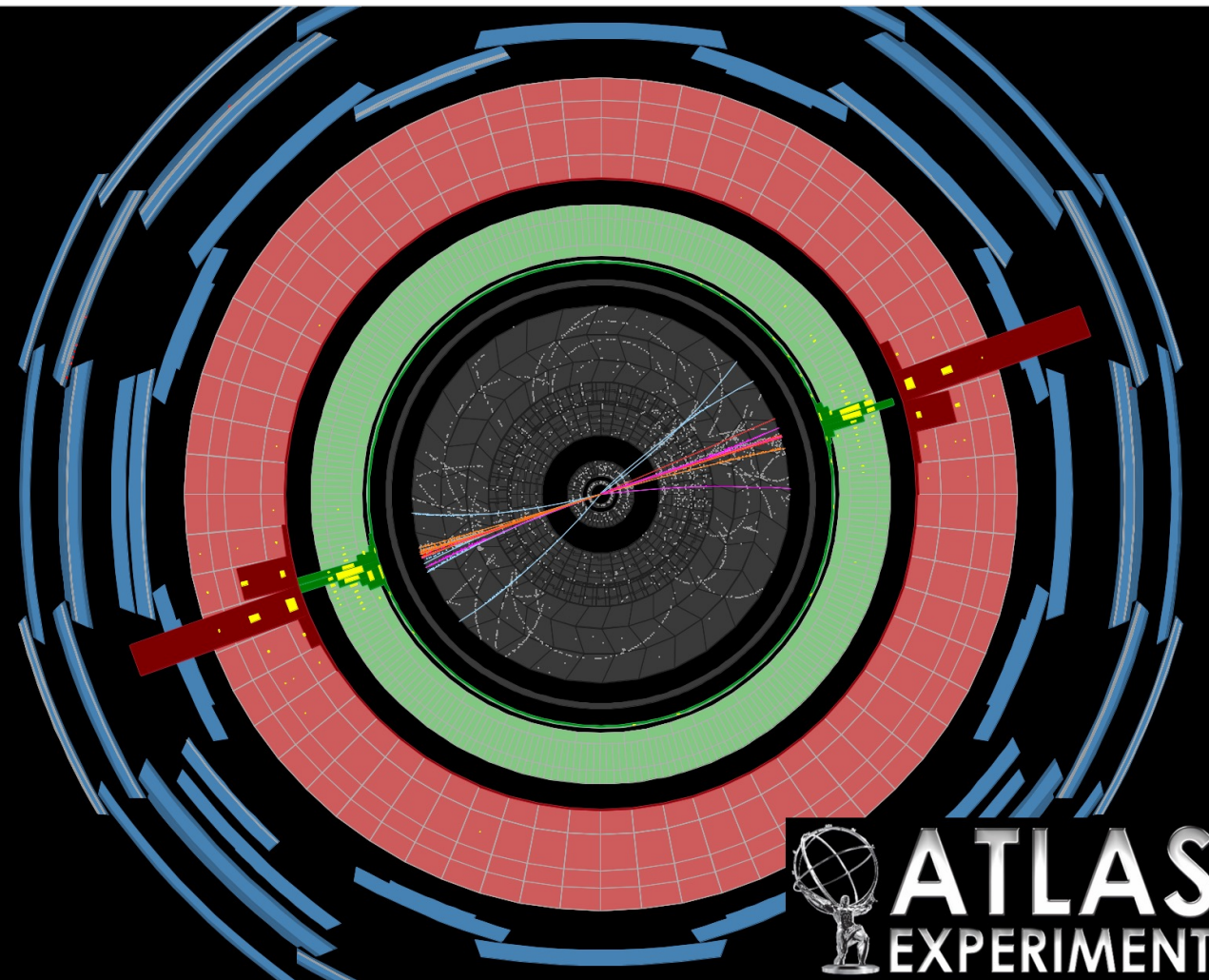
Geringe Reichweite der starken Wechselwirkung

→ durch Hadronen induzierte Schauer sind breiter und tiefer als elektromagnetische Schauer.

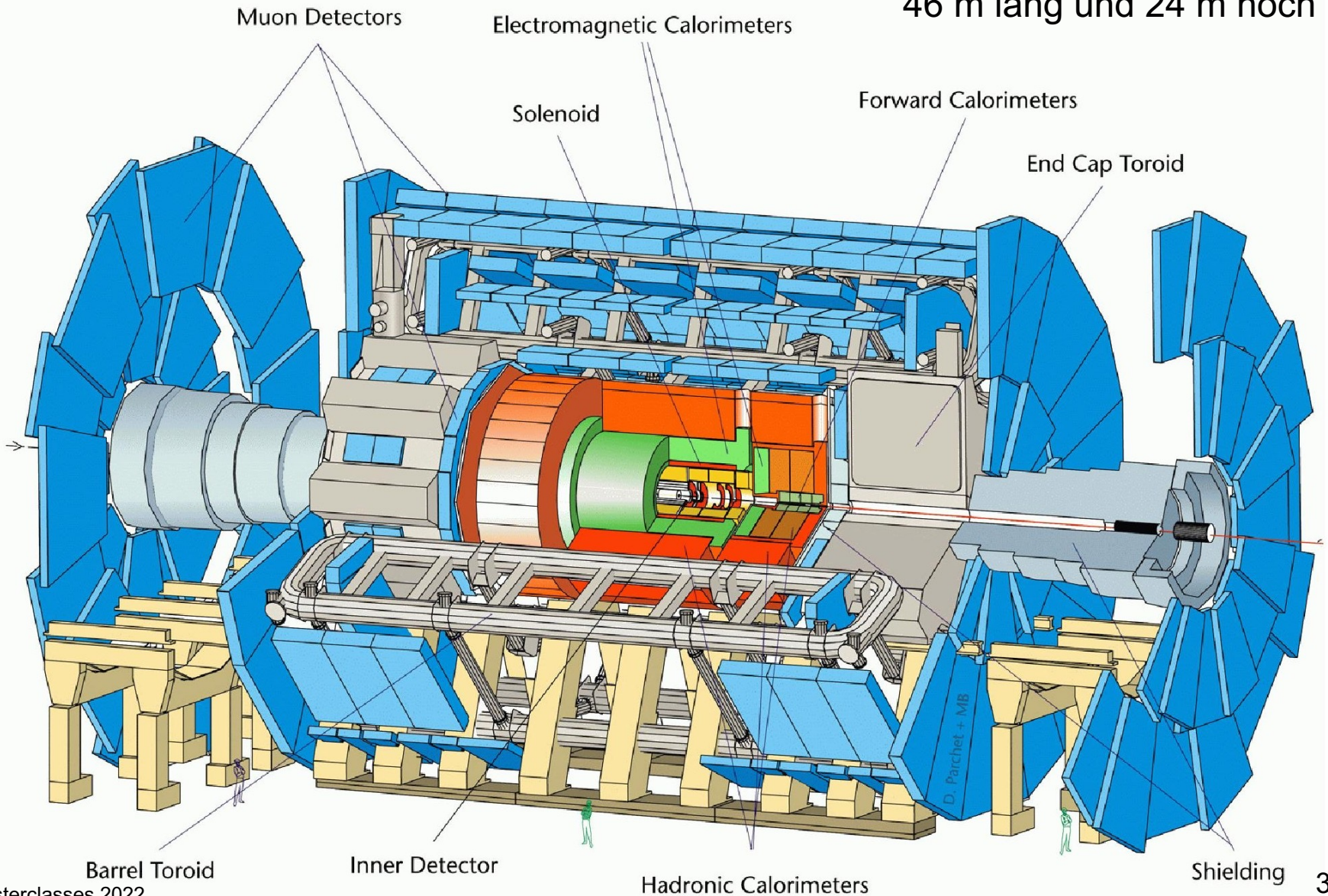
Das Zwiebelschalenmodell von Teilchendetektoren



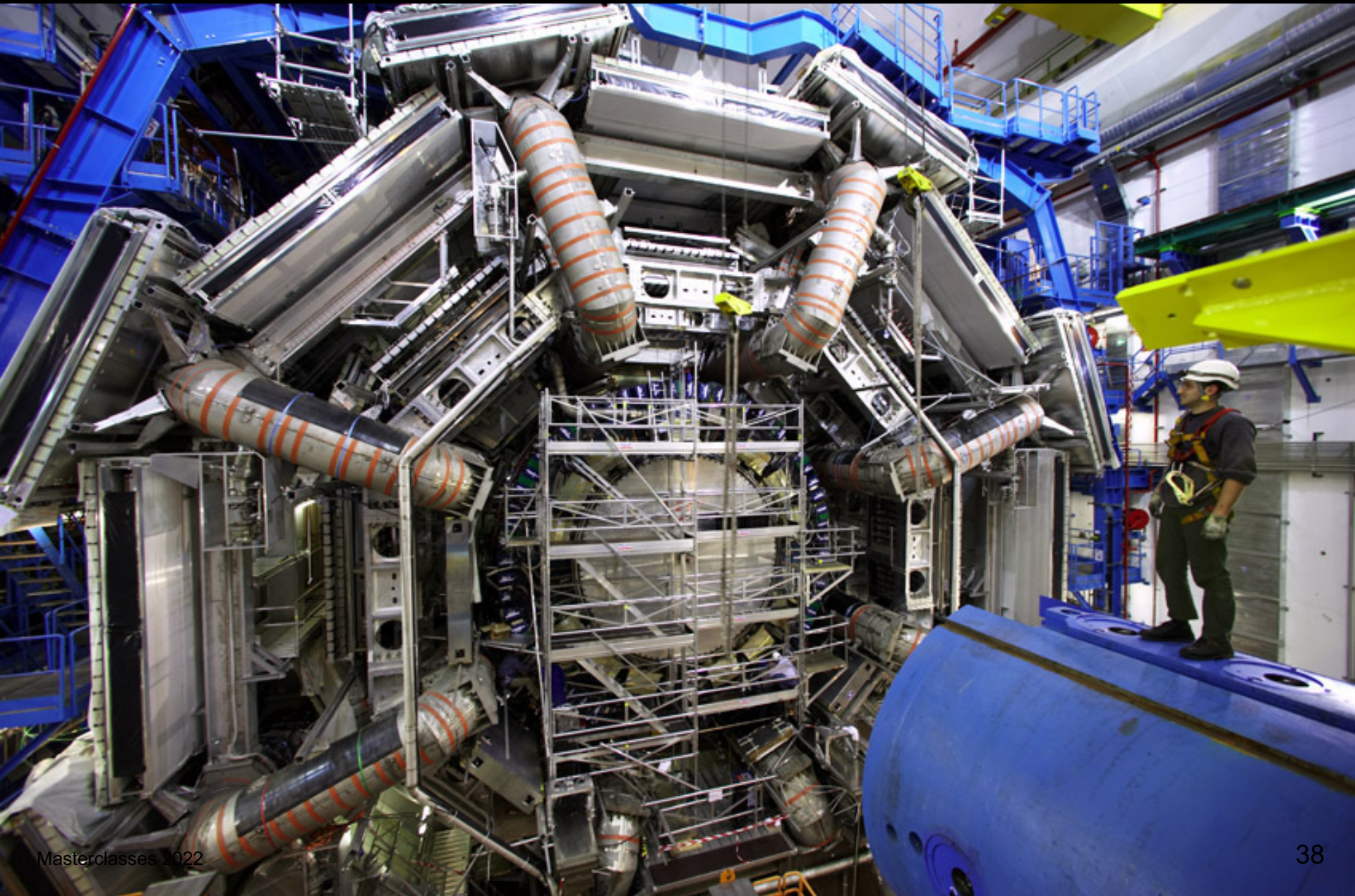
Zwei-Jet-Ereignis



46 m lang und 24 m hoch



Der ATLAS-Detektor kurz vor der Vollendung





Teil 4: Rekonstruktion schwerer Teilchen

Z-Boson-Kandidat: $Z^0 \rightarrow e^+e^-$

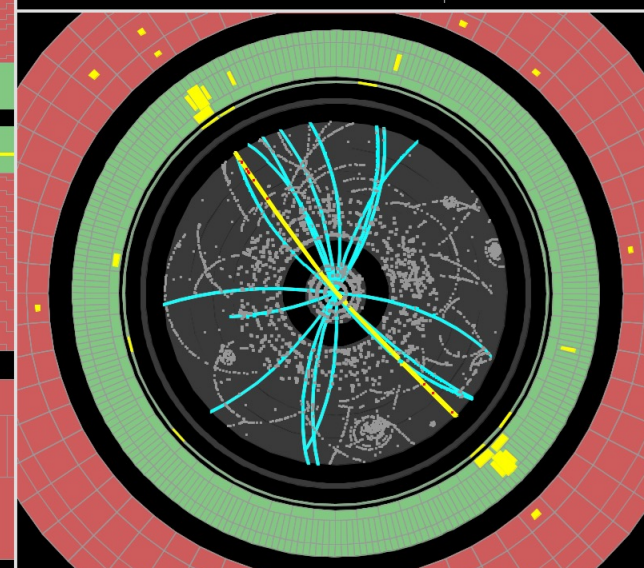
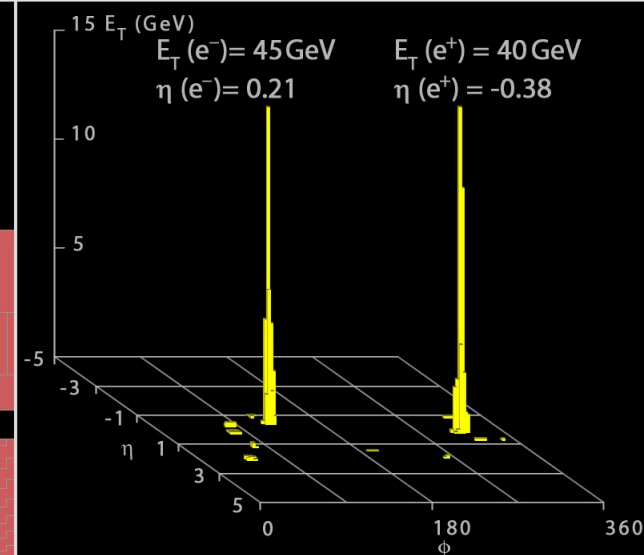
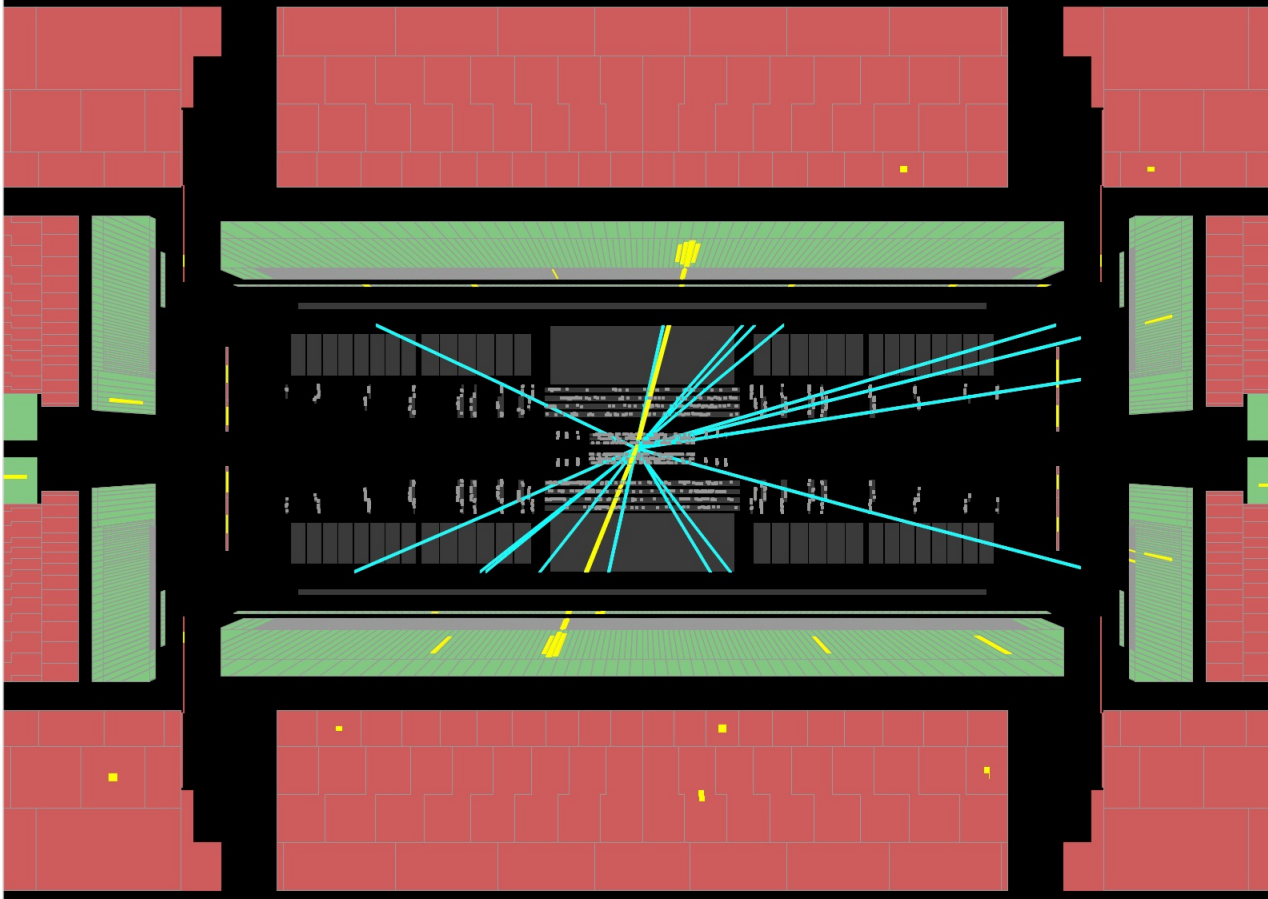


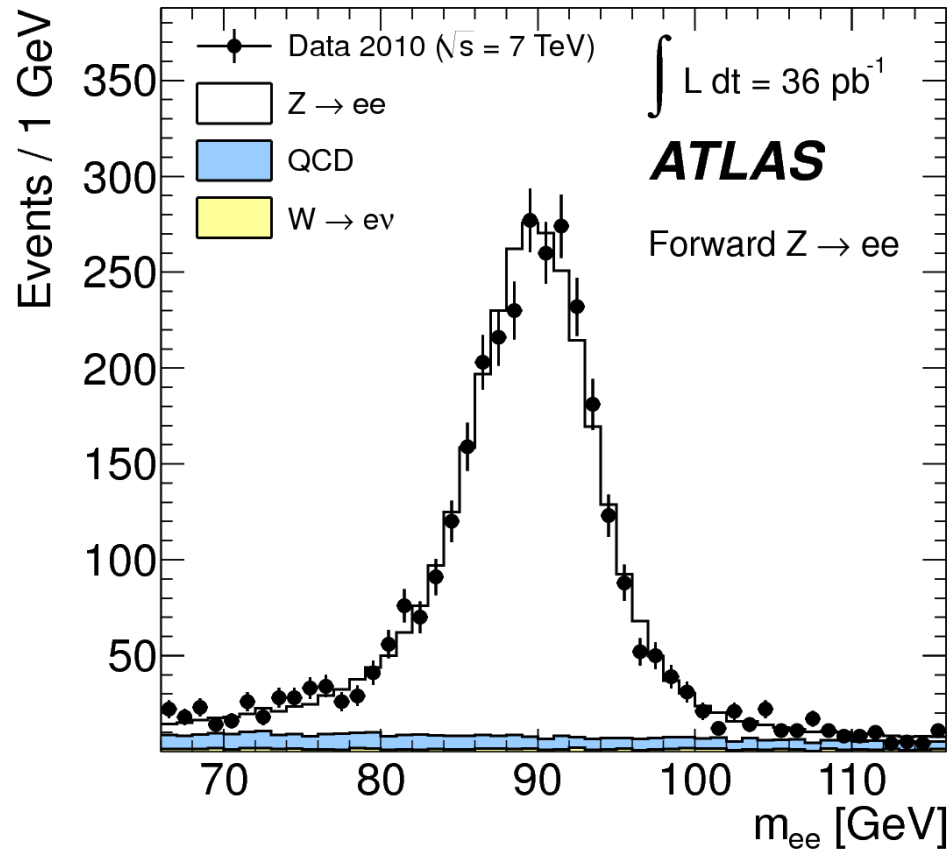
Run Number: 154817, Event Number: 968871

Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

$M_{ee} = 89 \text{ GeV}$

Z-ee candidate in 7 TeV collisions



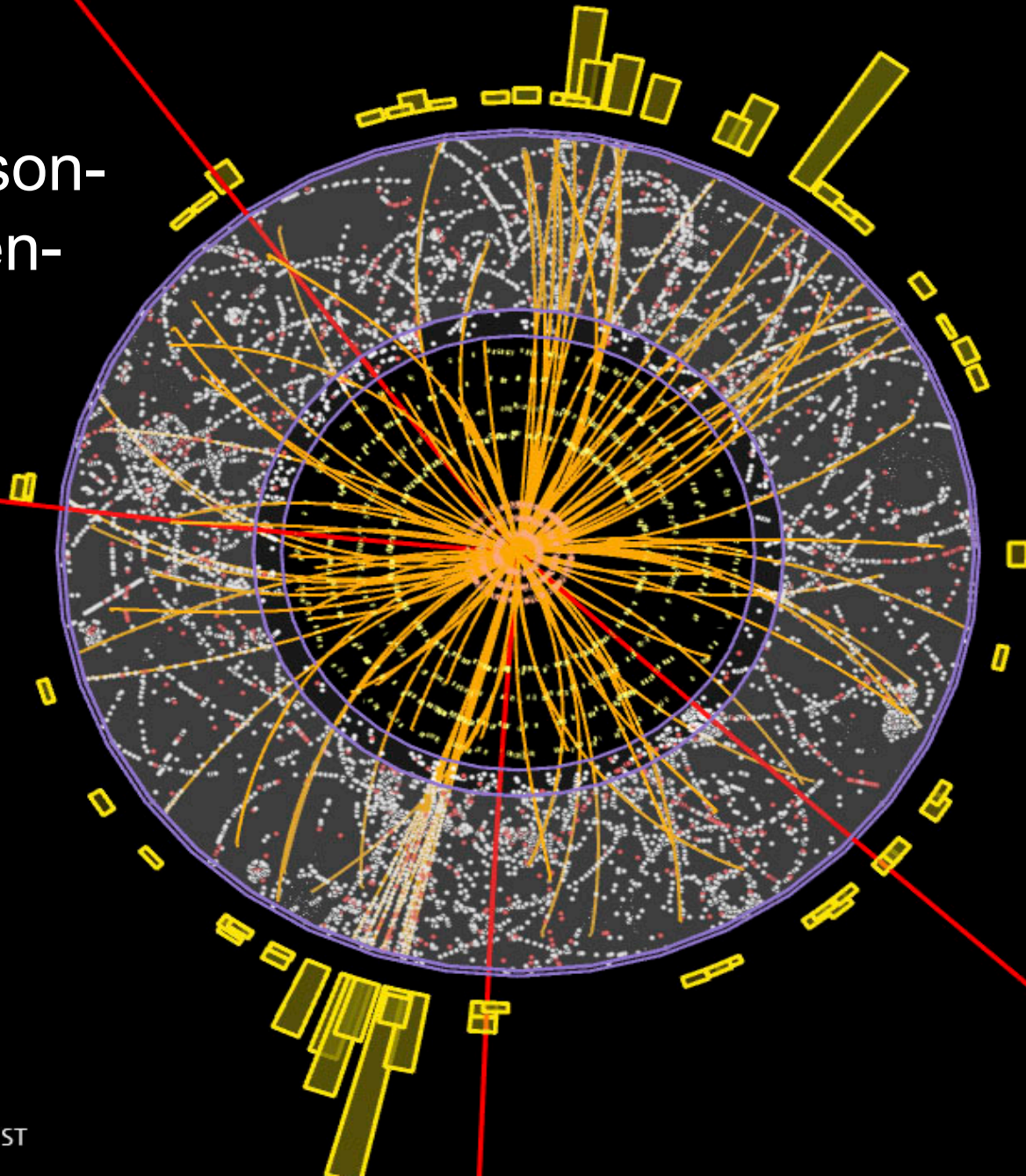


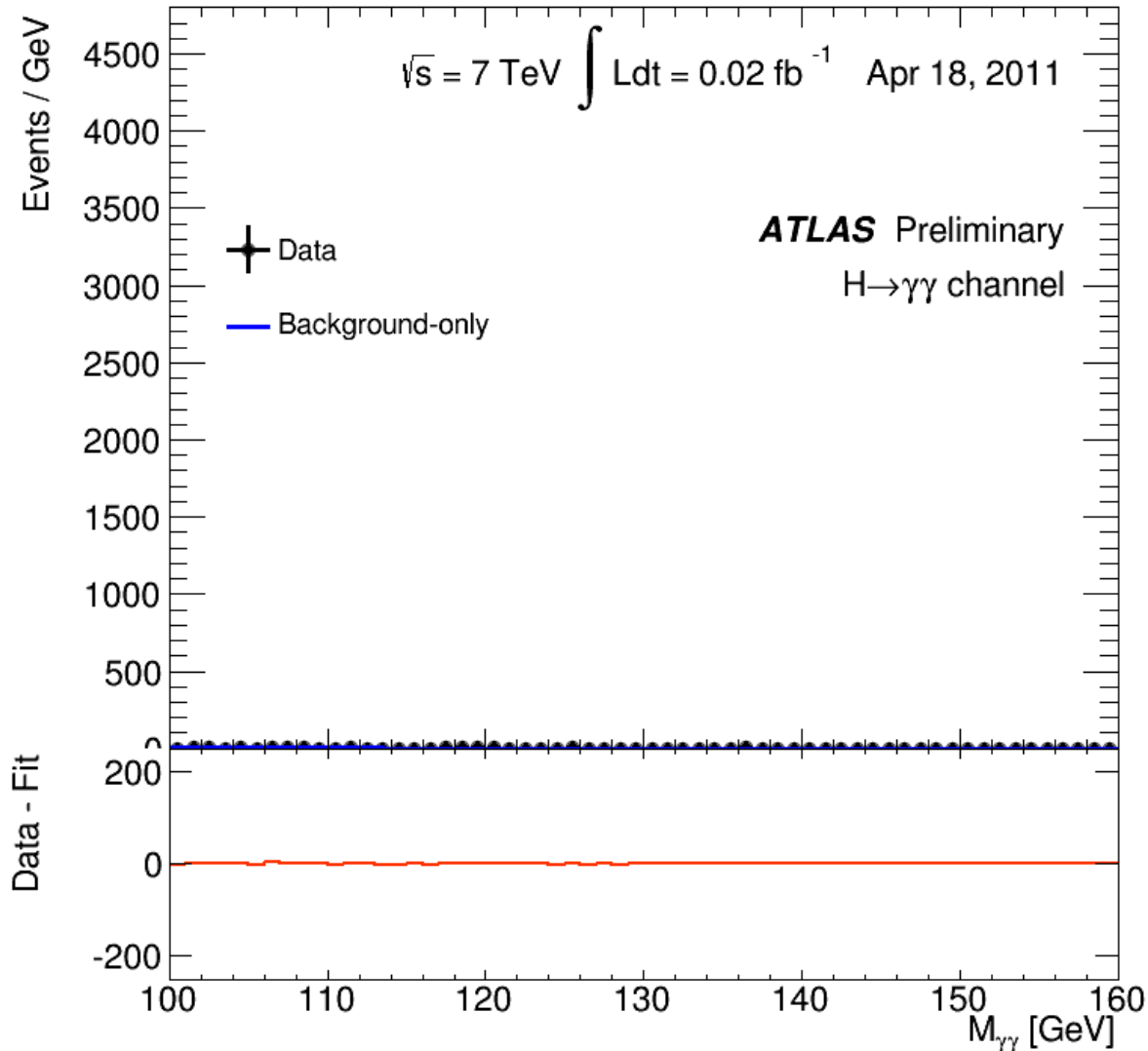
relativistische Energie-Impuls-Relation:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

invariante Masse

Higgs-Boson-Kandidaten-Ereignis





Benutzt ebenfalls die Verteilung der **invarianten Masse** der beiden Photonen.

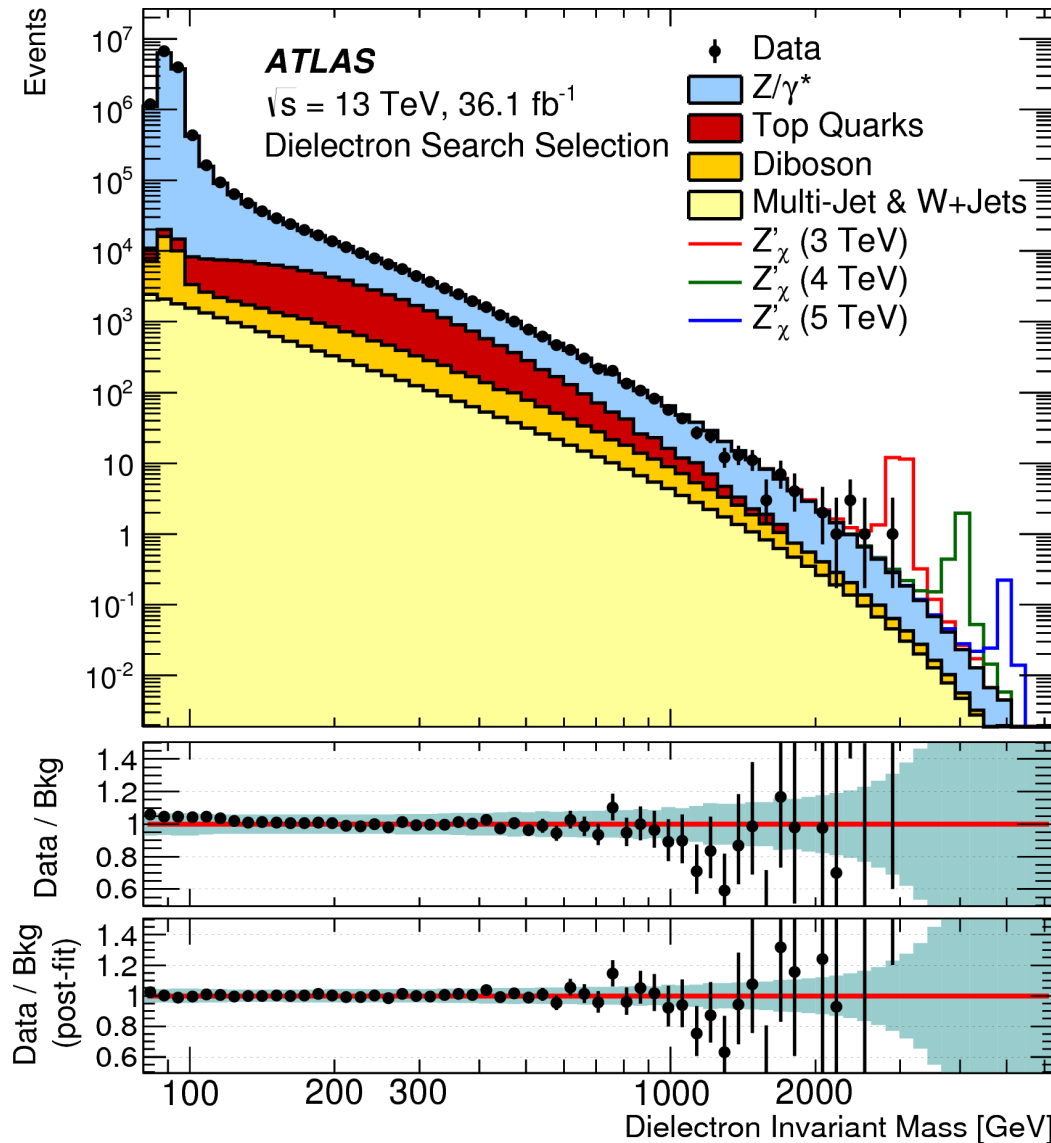
Addiere Energien und Impulse (Achtung Vektor) der Photonen und berechne:

$$m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

Untergrund: abfallende „Exponentialfunktion“

Signal: Gaußfunktion zentriert bei Higgs-Boson-Masse


















Eine neue Resonanz?

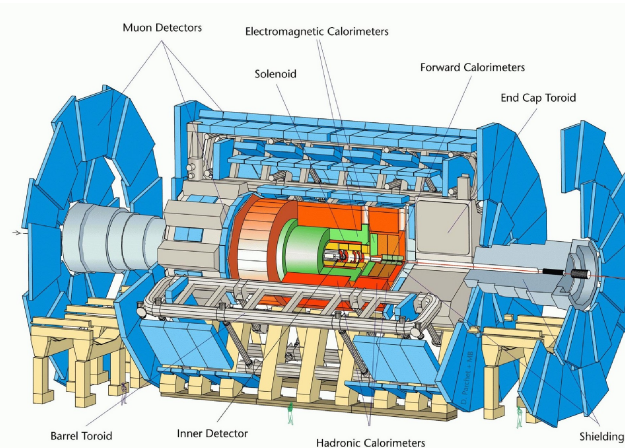
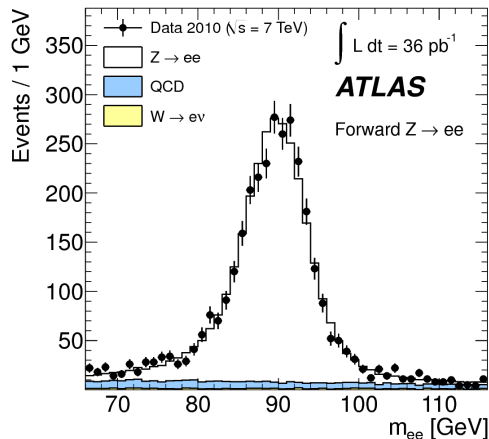


Suche nach

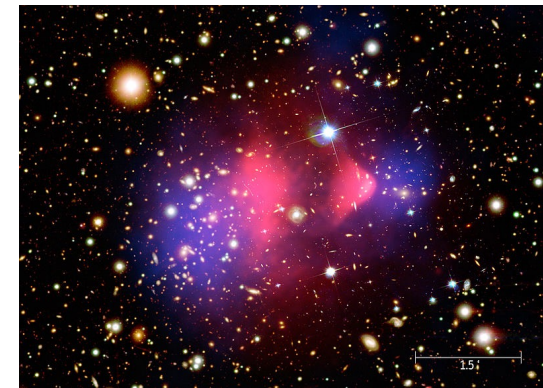
$$q\bar{q} \rightarrow X^0 \rightarrow e^+e^-$$

- 1) Bausteine der Teilchenphysik
- 2) Es gibt offene Fragen in Teilchenphysik, z.B. Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum und Dunkle Materie
- 3) Nachweis von Teilchen mit Detektoren
- 4) Nachweis schwerer Teilchen über die invariante Masse

	$\approx 2.3 \text{ MeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  Up Quark	$\approx 1.275 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  Charm Quark	$\approx 173.2 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  Top Quark	0 0 1  Gluon	$\approx 126 \text{ GeV}$ 0 0 0  Higgs Boson
Quarks	$\approx 4.8 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  Down Quark	$\approx 95 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  Strange Quark	$\approx 4.78 \text{ GeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  Bottom Quark	0 0 1  Photon	Gauge Bosons
Leptons	$\approx 0.511 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  Electron	$\approx 105.7 \text{ MeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  Muon	$\approx 1.777 \text{ GeV}$ -1 $\frac{1}{2}$  Tau	91.2 GeV 0 0 1  Z Boson	
	$< 2.2 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$  Electron Neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$  Muon Neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$  Tau Neutrino	80.4 GeV ± 1 1  W± Boson	



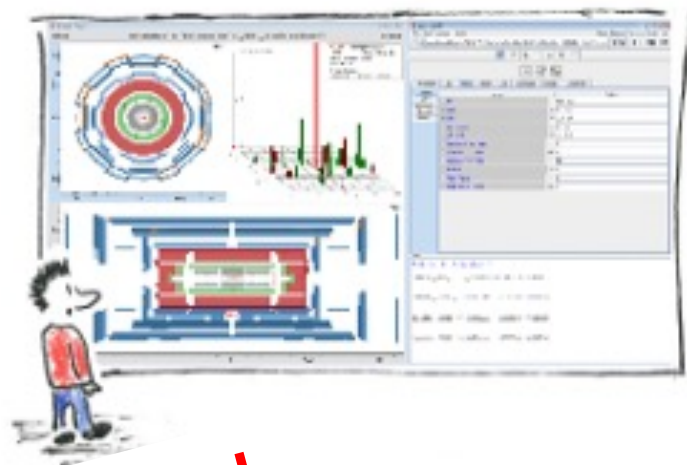
ATLAS-Detektor



Dunkle Materie



Teilchen identifizieren



Ergebnisse identifizieren

Viel Spass beim Analysieren!



An die Arbeit!



Das Z-Boson entdecken