

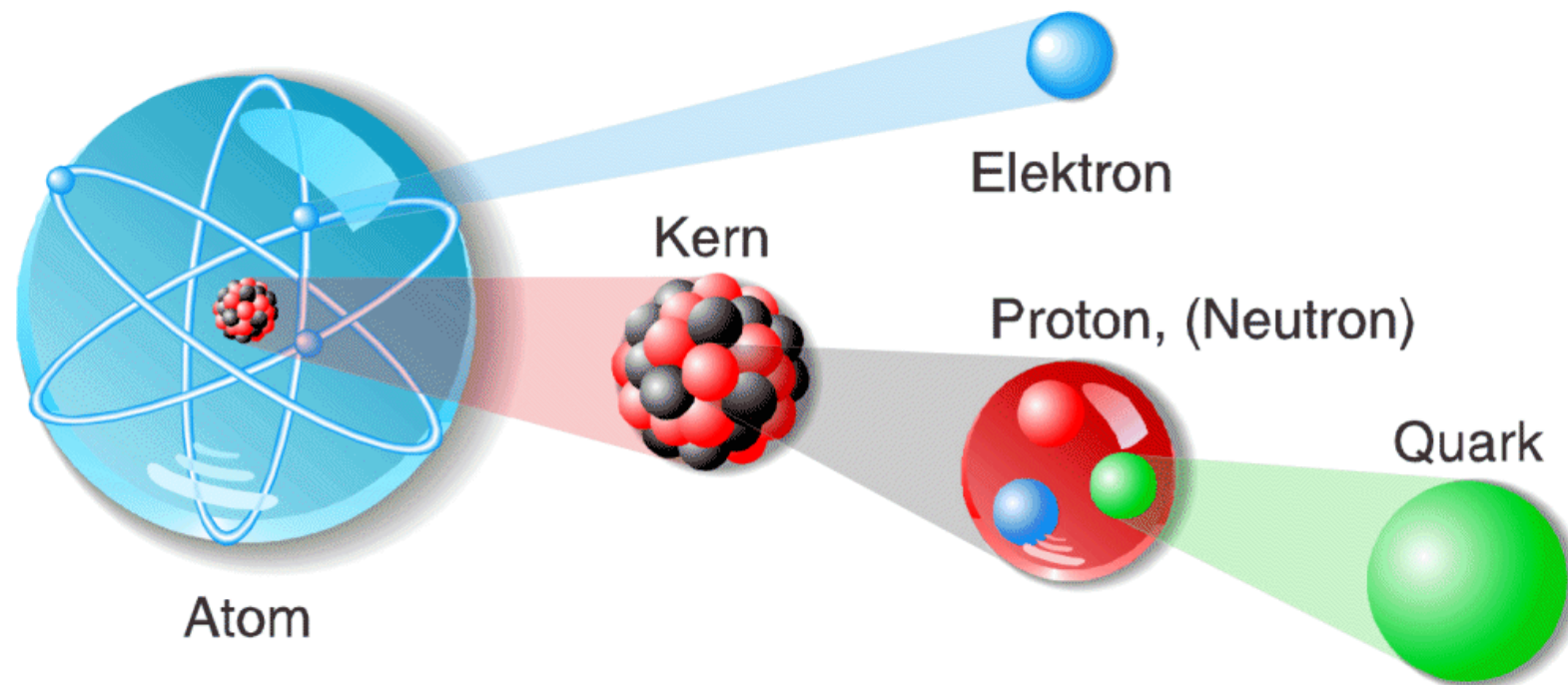


# Beschleuniger und Detektoren

Experimentieren in der Teilchenphysik

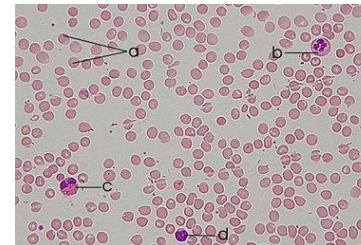
Lea Caminada Lukas Wehrli  
ETH Zürich

# Wie macht man allerkleinste Dinge sichtbar?



# 1. Anschauen: Mikroskopie

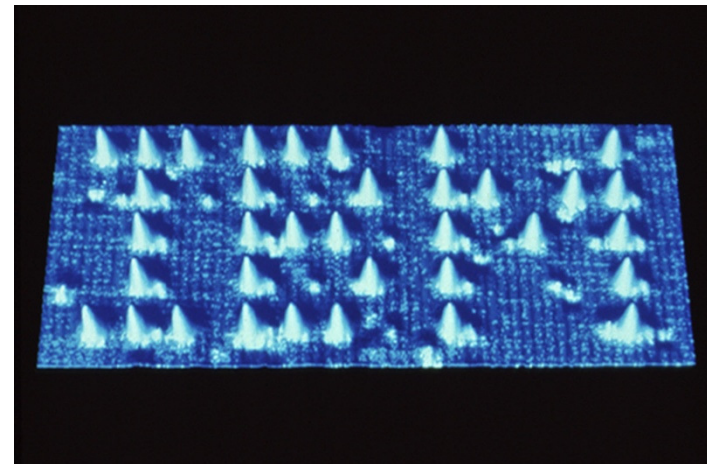
- Mit blossem Auge:  
 $1/10$  mm
- Lichtmikroskop:  
 $1/5$   $\mu$ m
- Elektronenmikroskop:  
1 nm



Reicht fast, um einzelne Atome zu sehen...

## 2. Abtasten: Rastertunnelmikroskopie

- Taste Oberfläche mit sehr feiner Spitze ab
- Auflösung bis zu 0.2 nm
- Wir „sehen“ einzelne Atome
- Spitze auch aus Atomen: Kleinere Dinge bleiben verborgen

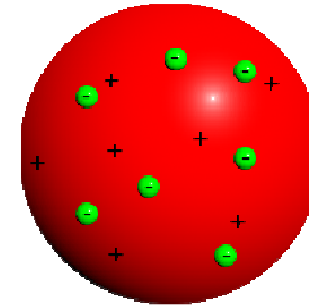


# 3. Beschiessen: Streuexperimente

- Verwende Geschosse als Messinstrumente
- Beschieße das zu untersuchende Material (TARGET) mit einem Teilchenstrahl (Atome, Ionen, Elektronen)
- Teilchen werden abgelenkt
- Messe die Verteilung der gestreuten Teilchen...
- ...und gewinne Information über die Struktur des Targets

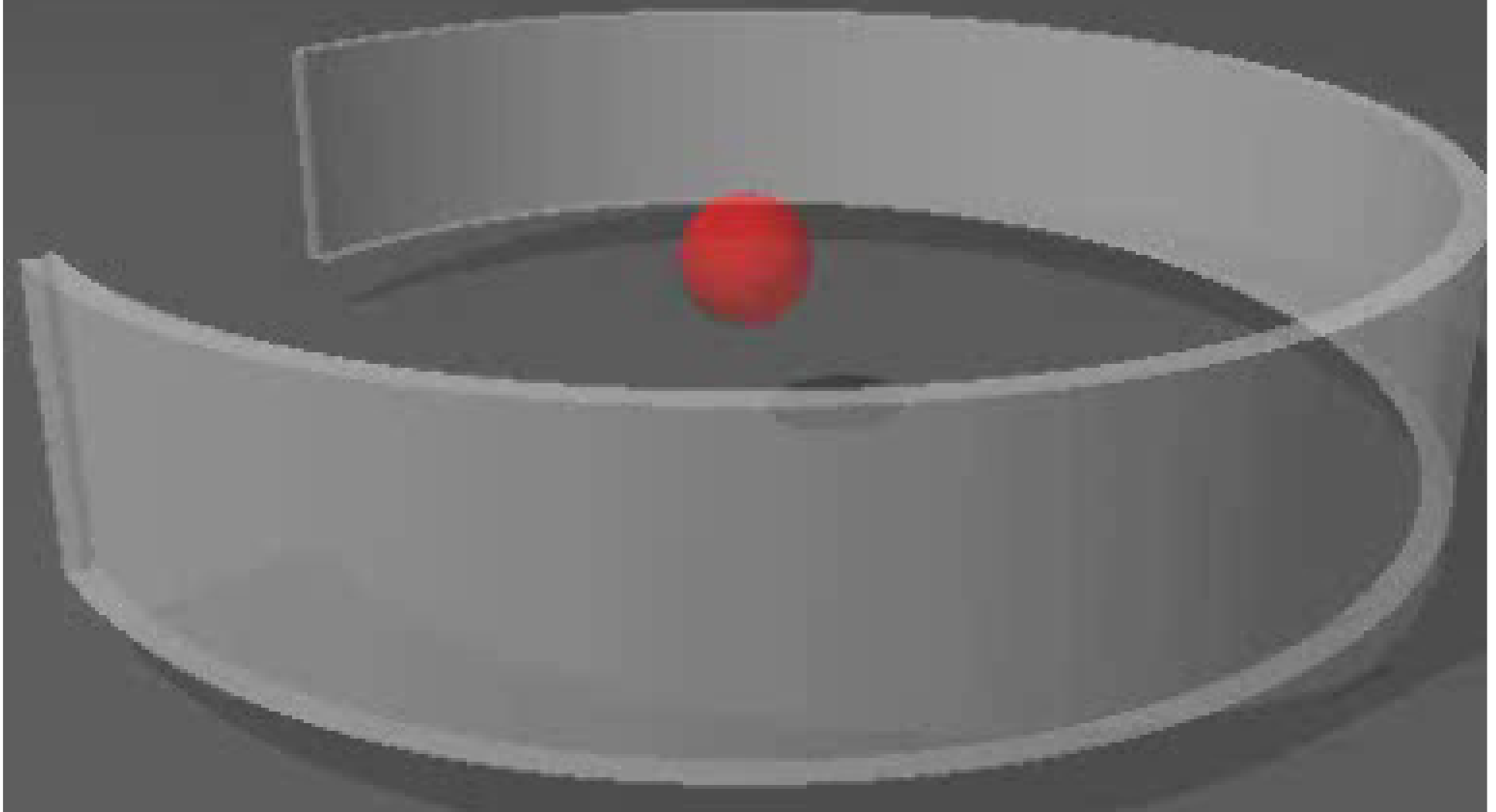
# Rutherford-Streuung

1910: Atom besteht aus einer positiv geladenen Kugel mit darin verteilten Elektronen

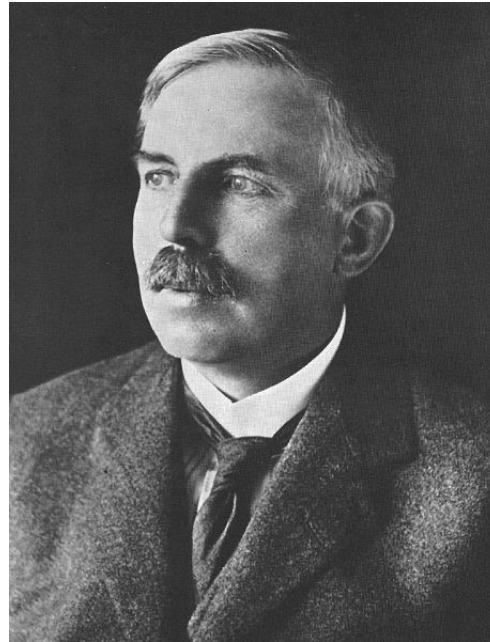


1911: Rutherford, Geiger und Marsden: Schiessen  $\alpha$ -Teilchen auf Goldatome (dünne Folie) und messen die Streuwinkel

Erwartung: Die meisten  $\alpha$ -Teilchen durchdringen die Goldfolie ungehindert



Überraschend: es gibt Teilchen, die unter sehr grossem Winkel gestreut werden



Rutherford:

*"It was as though you had fired a fifteen-inch shell at a piece of tissue paper and it had bounced back and hit you."*



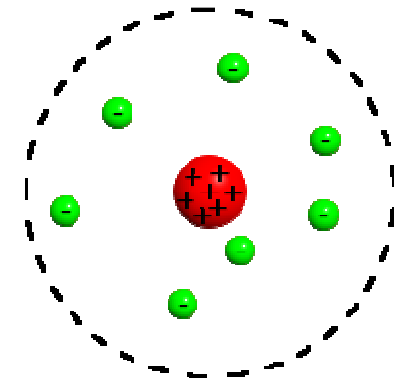
# Entdeckung des Atomkerns

Erklärung von Rutherford:

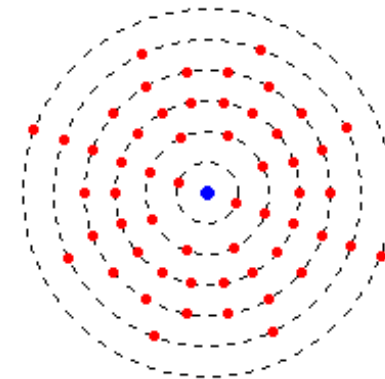
Teilchen stossen auf ein massives Zentrum im inneren der Atome.

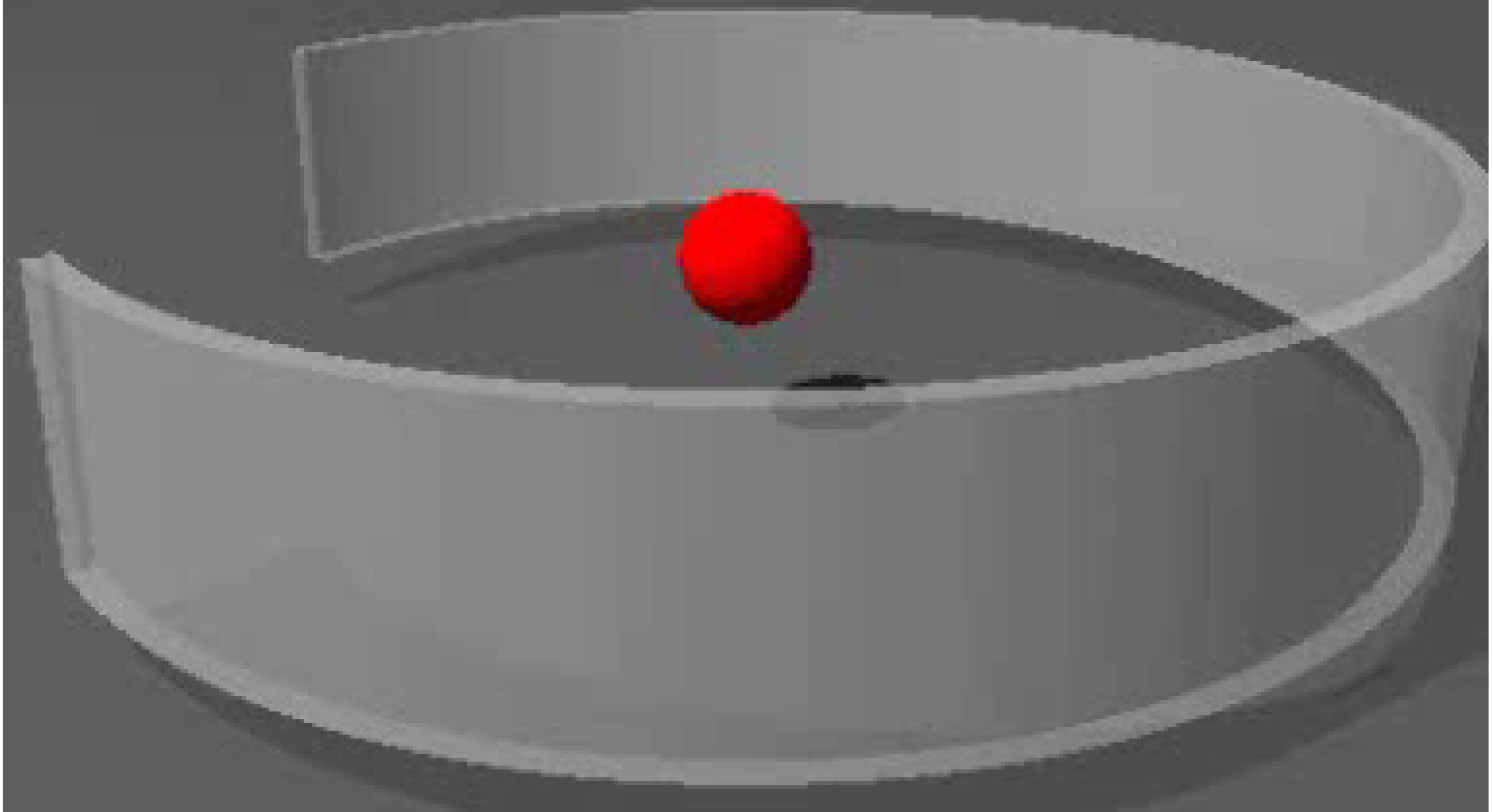
Neues Atommodell:

Positiv geladener Atomkern ist von negativen Elektronen umgeben.



1913: Ablösung des Modells von Rutherford durch das Bohrsche Atommodell (diskrete Elektronenbahnen)





# Energie des Geschosses - Auflösungsvermögen

$$\begin{aligned} &\text{Kleinste sichtbare Distanz} \\ &= \\ &200 \text{ fm} / \text{Energie [MeV]} \end{aligned}$$

- Um die Naturgesetze bei kleinsten Abständen zu überprüfen, brauchen wir die energiereichsten verfügbaren Geschosse
- Die Energie des Aufpralls kann erhöht werden, indem wir auch das Ziel beschleunigen
- Ist die Energie gross genug, geschehen wundersame Dinge ...



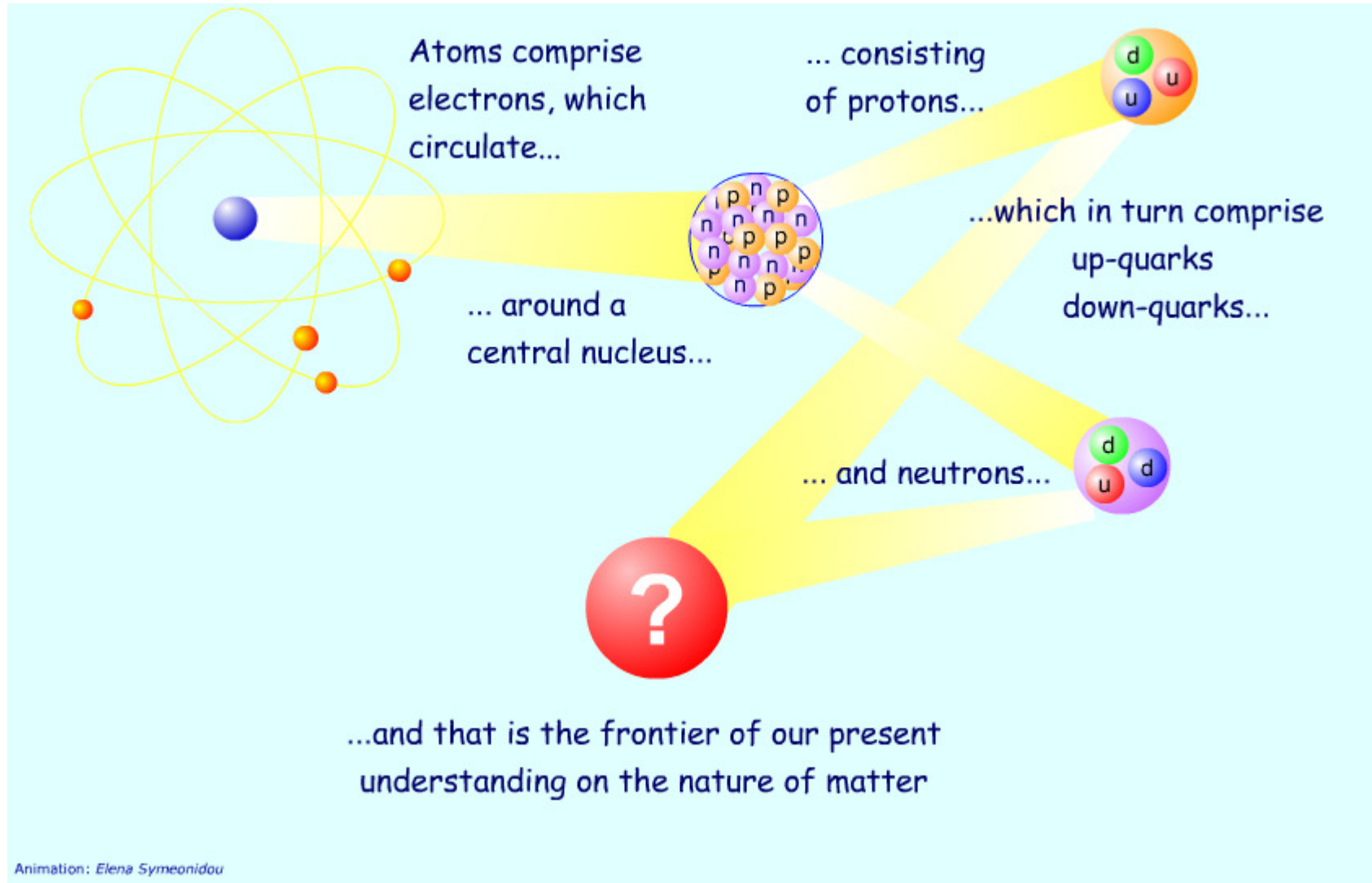
# Aequivalenz von Masse und Energie

$$E = mc^2$$

- Die Energie der Kollisionspartner kann in die Erzeugung neuer Teilchen gehen
- $c^2$  ist eine "grosse Zahl" – es braucht viel Energie für wenig Masse



# Aufbau der Materie



# Zubehör für ein Teilchenphysik-Experiment

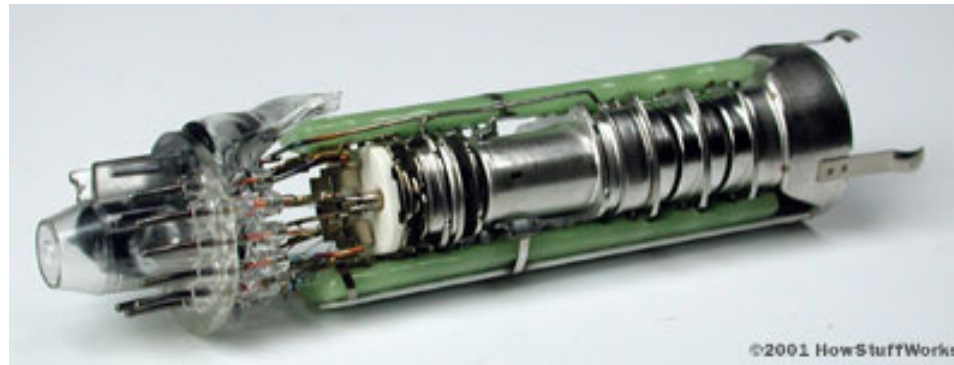
- Teilchen  
Woher kommen die Teilchen zum Beschleunigen?
- Viel Energie für diese Teilchen  
Wie funktioniert ein Beschleuniger?
- Nachweisgeräte  
Wie baut man einen Detektor?

# I. Teilchenquellen



# Woher kommen die Teilchen?

Elektronen: Wie im Fernseher: Heize dünnen Draht, Elektronen treten aus, ziehe Elektronen mit elektrischem Feld raus

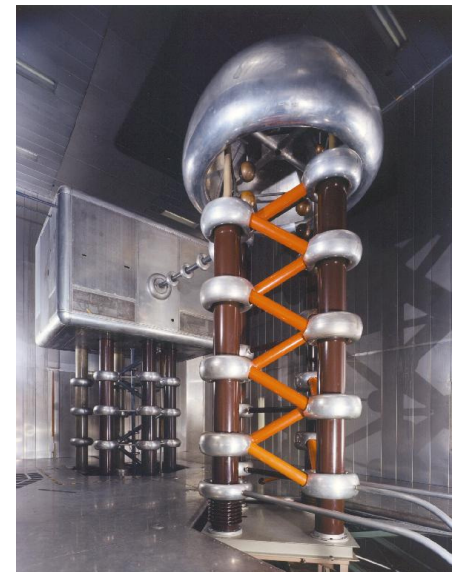
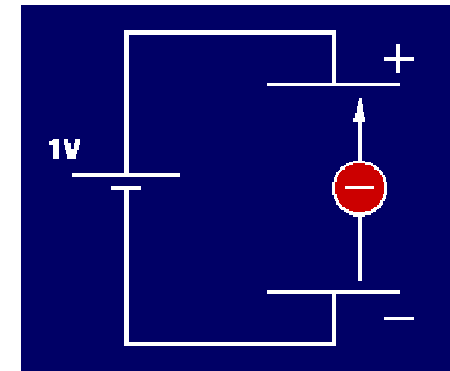


Protonen: Schiesse Elektronen auf Wasserstoff  
 $H^-$ -Ionen  
Beschleunige im elektrischen Feld  
Strippe beide Elektronen weg  
(durch Folie schießen)  
Oder: H-Atome mit elektrischem Feld  
auseinanderreißen

## II. Teilchenbeschleuniger

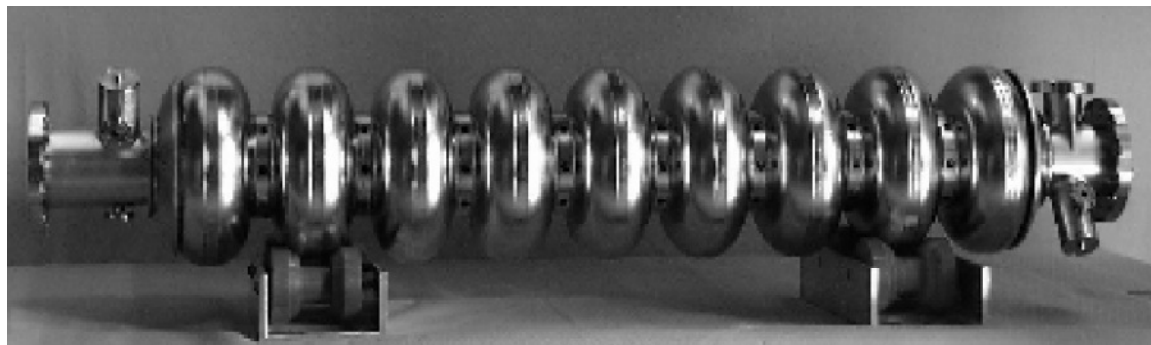
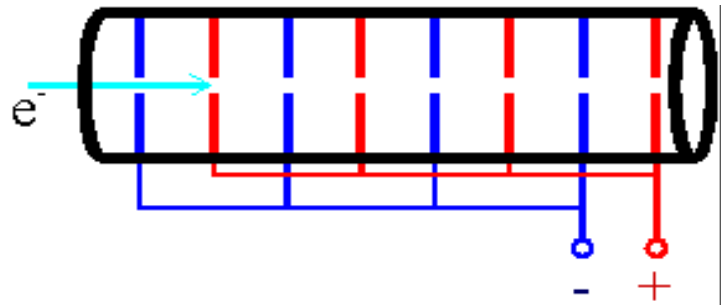
# Teilchen beschleunigen: Statische Spannung

- Elektron gewinnt ein 1 eV an Energie, wenn es 1 Volt Spannung durchfliegt
- Je höher die Spannung, desto grösser der Energiegewinn
- Generatoren erreichen Spannungen bis zu einigen 100 kV
- Höhere Spannung: Durchschlag

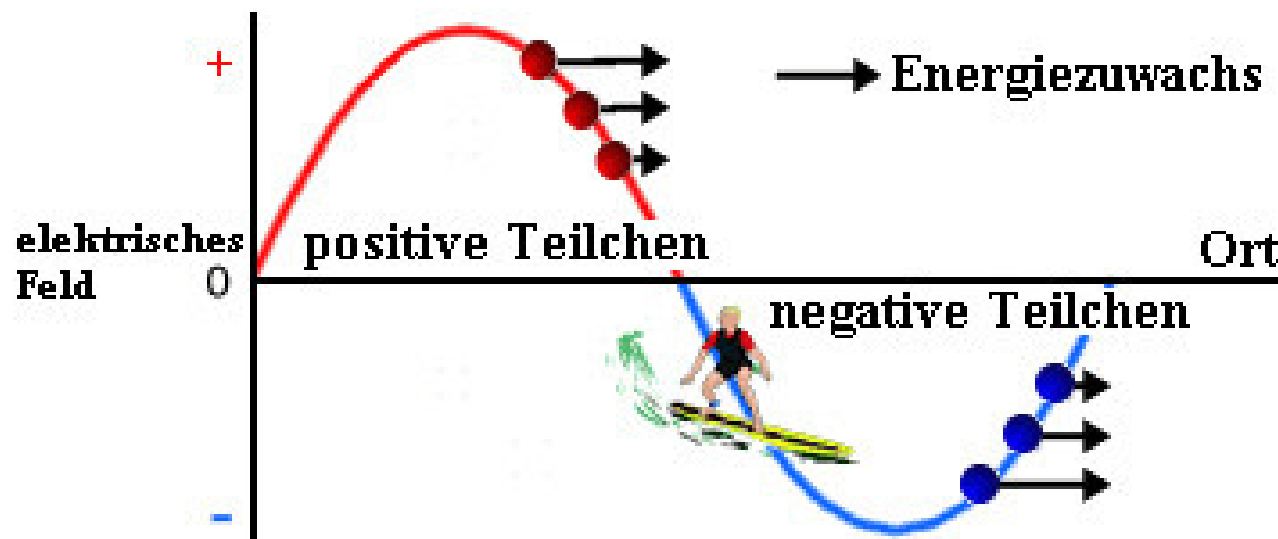


# Wechselspannung:

- Jedes mal, wenn Teilchen durchfliegen, kriegen sie einen „Schubs“
- Bis zu 35 MV pro Meter möglich

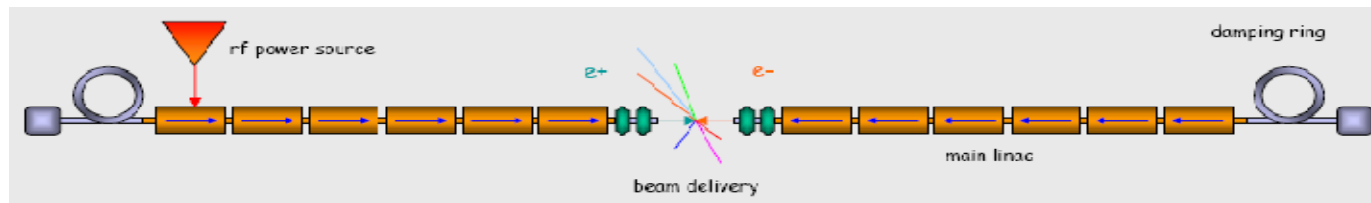


# Wechselspannung: Teilchen in Paketen (Bunches)



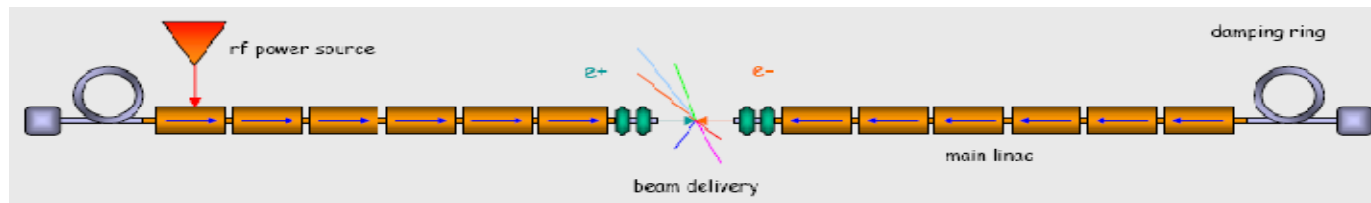
# Linearbeschleuniger

- Die ganze Strecke steht zum Beschleunigen zur Verfügung
- Kein Energieverlust in Kurven
- Nur eine Chance für Kollisionen
- Teilchen müssen in einem Durchlauf alle Energie erhalten



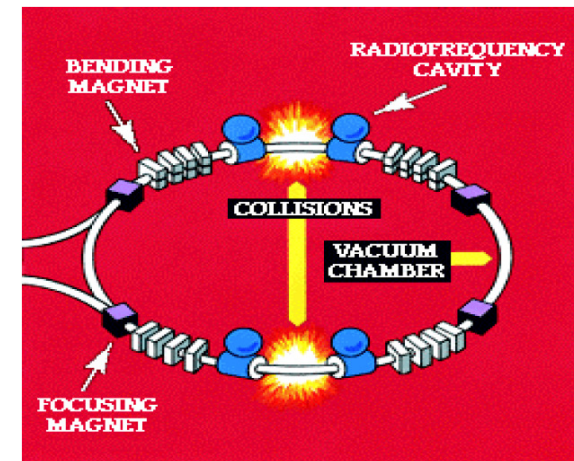
# Linearbeschleuniger

- Die ganze Strecke steht zum Beschleunigen zur Verfügung
- Kein Energieverlust in Kurven
- Nur eine Chance für Kollisionen
- Teilchen müssen in einem Durchlauf alle Energie erhalten



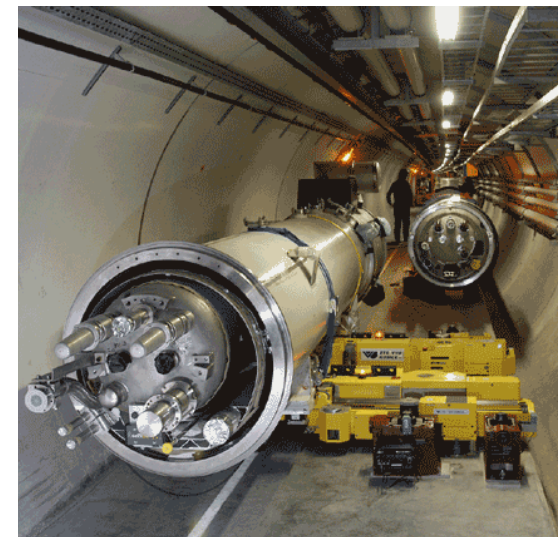
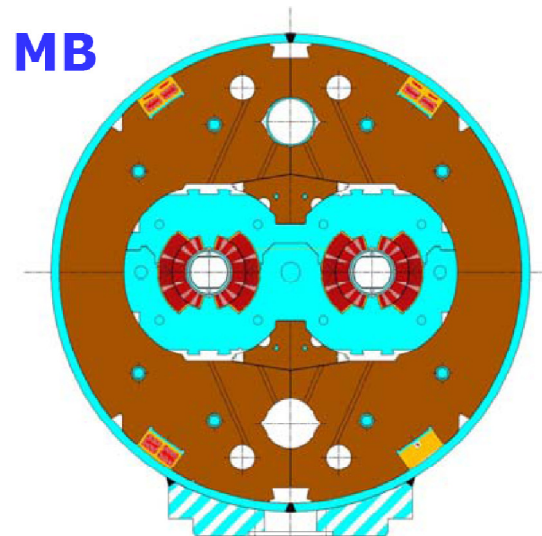
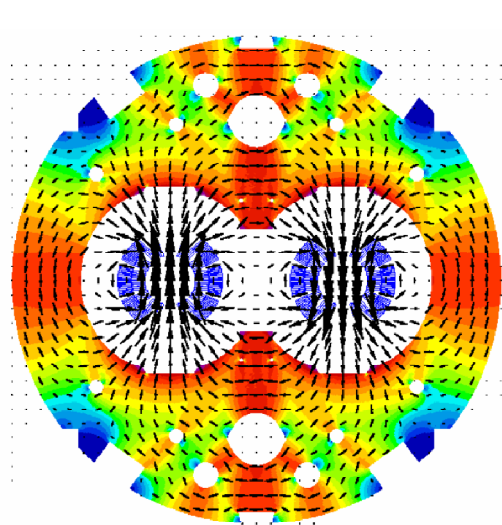
# Kreisbeschleuniger

- Teilchen haben mehrere Chancen, zu kollidieren
- Teilchen können Runde für Runde beschleunigt werden
- Teilchen verlieren in jeder Kurve Energie
- Brauche viele Magnete



# Teilchenstrahlen steuern: Magnete

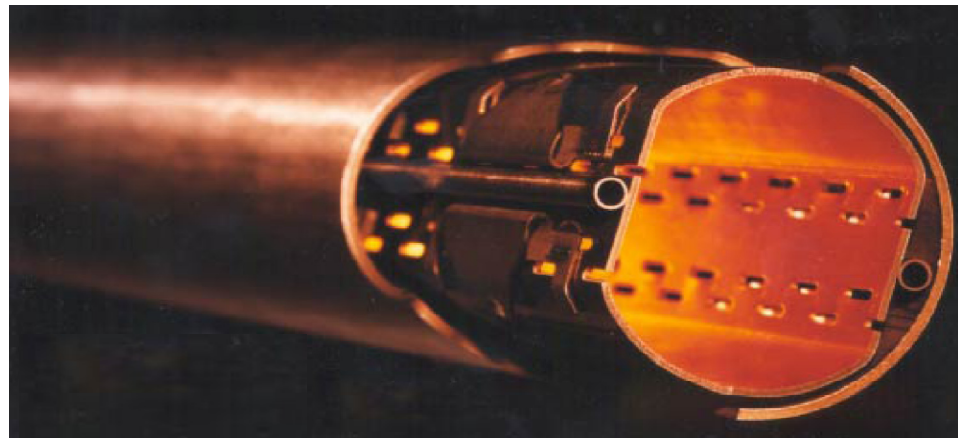
- Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt
- Damit können wir sie im Kreis herum lenken und die Strahlen bündeln
- Je grösser die Energie der Strahlteilchen, desto stärker müssen die Magnete sein
- Brauche supraleitende Magnete → Kühlung





# Strahlrohr

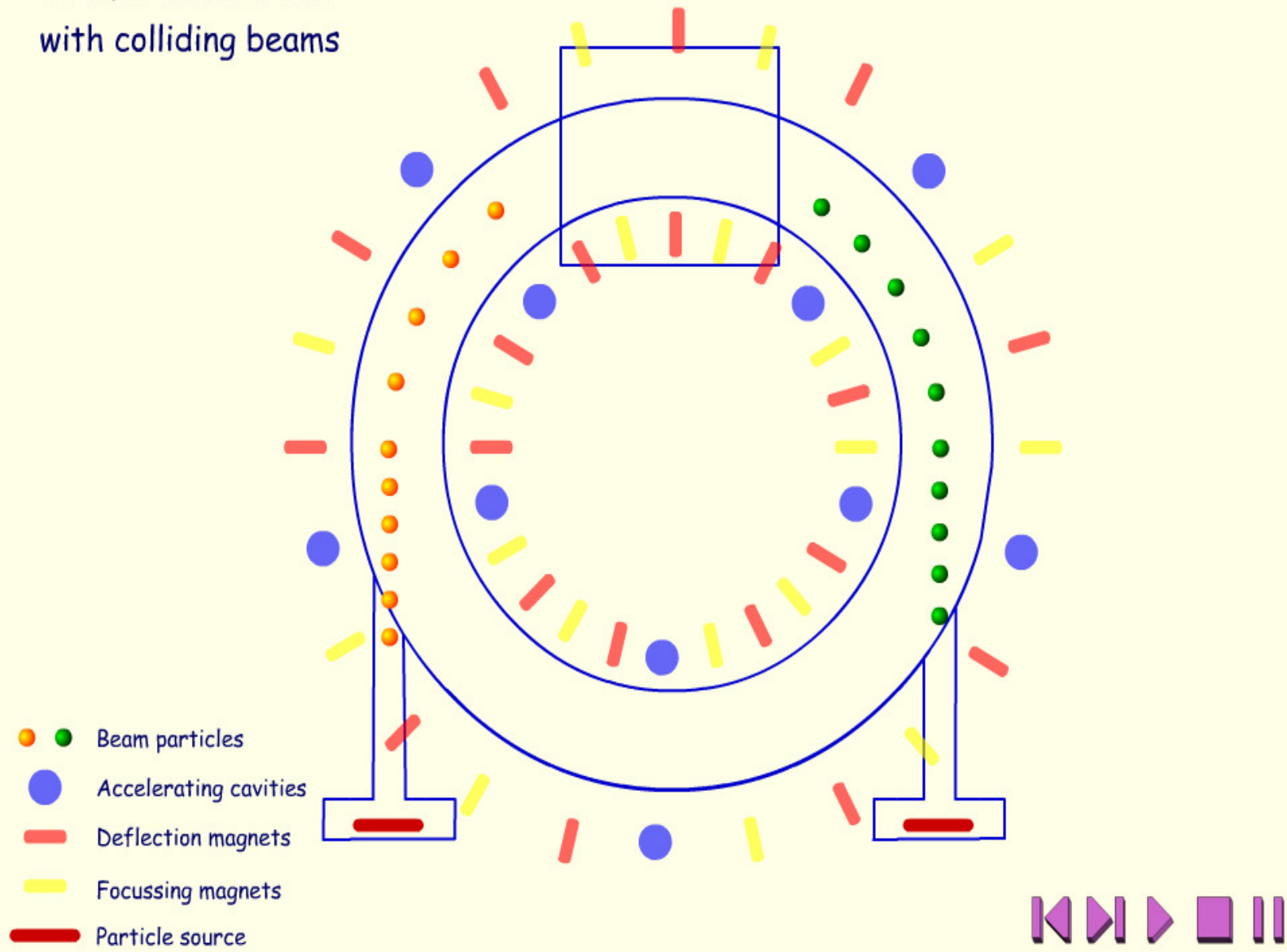
- Hochvakuum: Wir wollen Kollisionen der Strahlen, nicht Kollisionen mit Luft untersuchen
- Vakuum muss sehr gut sein: Nach dem Pumpen darf weniger als 1 in 1 Milliarde Luftteilchen übrig bleiben
- 1 Fliege, verteilt über 6.3 km Strahlrohr verunmöglicht Betrieb...



# Luminosität (Lumi)

- Zweite wichtige Grösse eines Beschleunigers neben der Energie
- Wir wollen seltene Ereignisse sehen
- Wir brauchen möglichst viele Kollisionen
- Lumi hängt ab von:
  - Der **Anzahl** Teilchen pro Strahlpaket (Strom)
  - Der **Dichte** der Teilchen im Strahlpaket (Fokussiermagnete)
  - Der Anzahl der **Strahlpakete**, die sich pro Sekunde im Detektor kreuzen

# Circular accelerator with colliding beams



# Verschiedene Beschleuniger

- Elektron-Positron-Collider

SLAC Stanford, 50 GeV Strahlenergie

LEP Genf, 1989-2000,  
100 GeV Strahlenergie



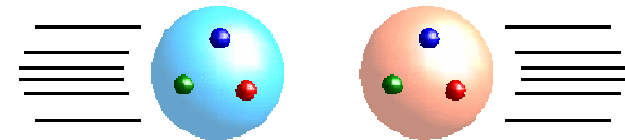
- Elektron-Proton-Collider

HERA Hamburg, 1990-2007,  
27.5 GeV Elektronen, 920 GeV Protonen,



- Hadron-Hadron-Collider

Tevatron Chicago, seit 1987  
Proton-Antiproton, 980 GeV Strahlenergie



LHC Genf, ab 2009,  
Proton-Proton, 7 TeV Strahlenergie

# CERN: European Organisation for Nuclear Research

- Weltweit grösstes Forschungszentrum für Teilchenphysik bei Genf
- Gründung 1954
- 20 Mitgliedstaaten
- 6500 Forscher, 500 Universitäten, 80 Nationalitäten

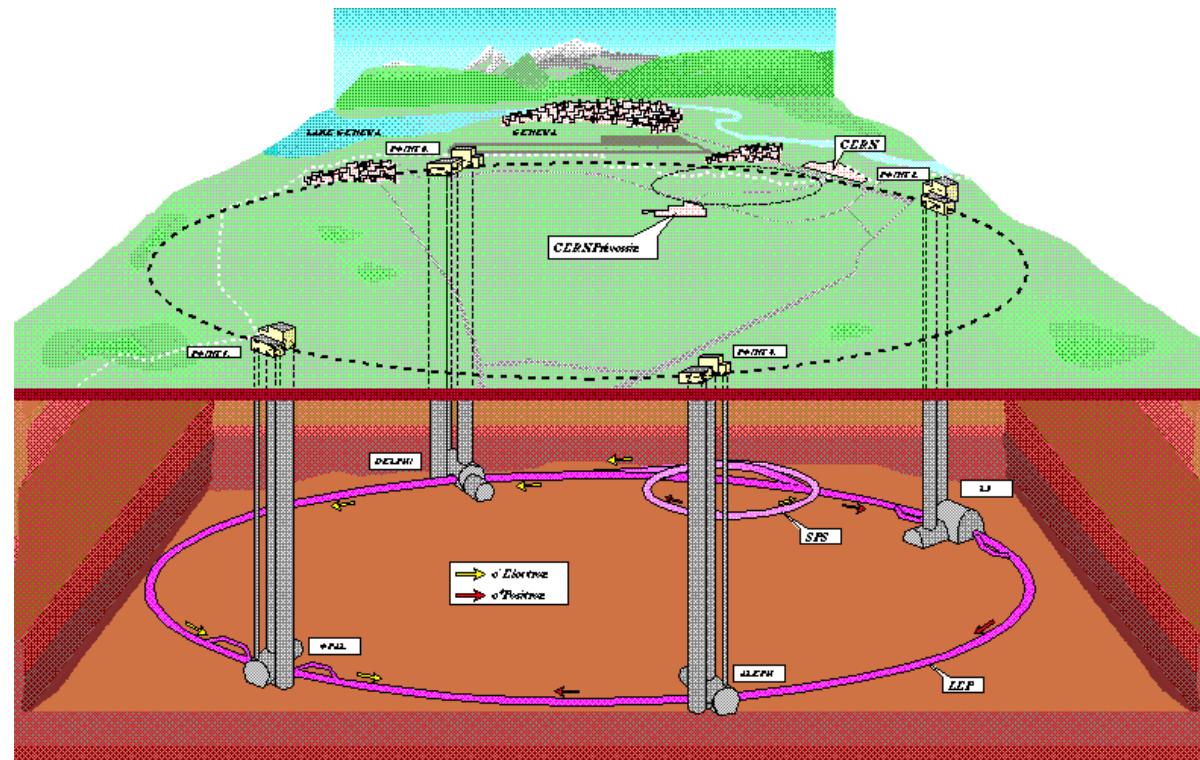


# Von LEP...

Large Electron Positron Ring (1989-2000)

Energie: 100 GeV pro Strahl

27 km langer Tunnel

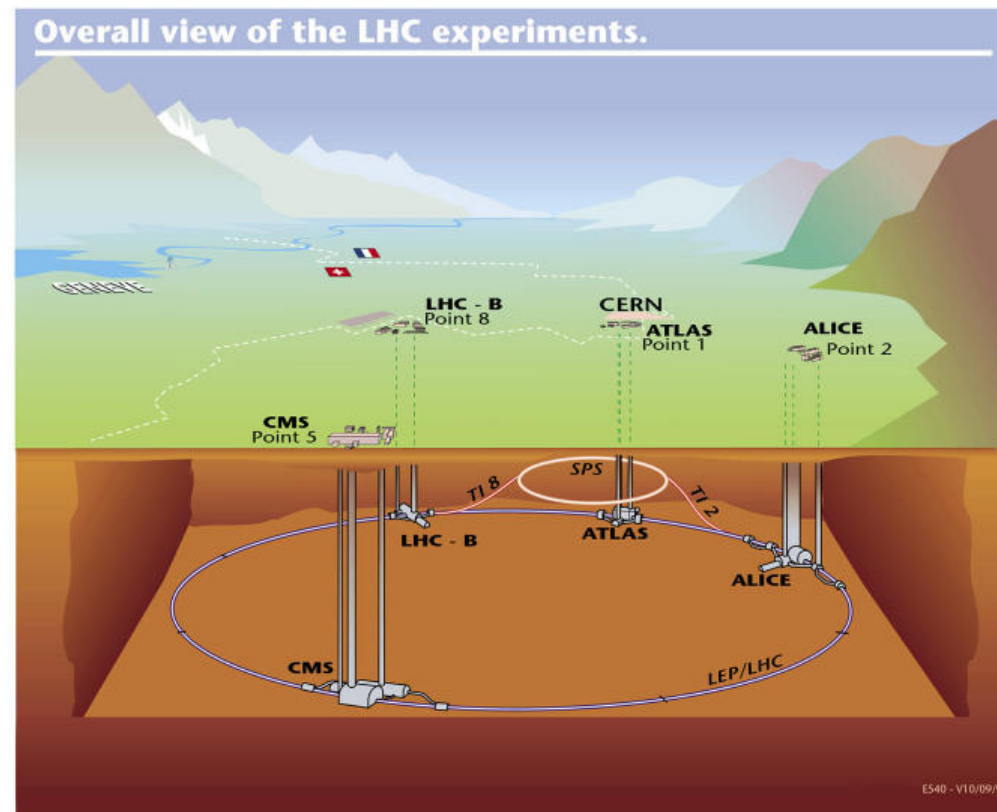


# ... zu LHC

Large Hadron Collider (Proton-Proton)

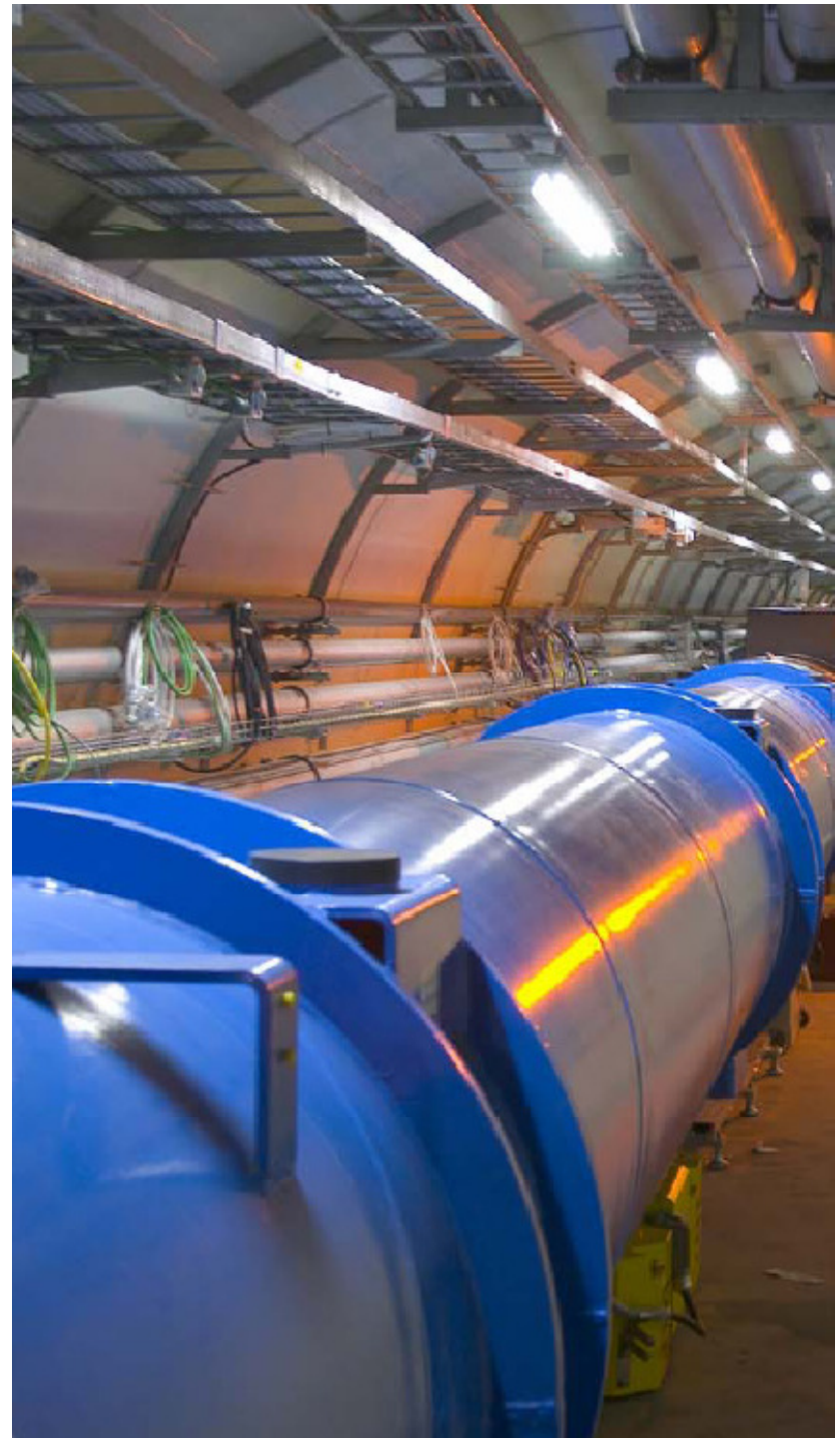
Schwerpunktsenergie: 14 TeV

Planung seit 1985, Fertigstellung jetzt...



# Der LHC ist...

- die **schnellste** Rennstrecke auf unserem Planeten  
Protonen fliegen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit mehr als 11'000 mal/s um den 27 km langen Ring
- der **leerste** Raum im Sonnensystem  
Im LHC ist 10 mal weniger Atmosphäre als auf dem Mond
- der **heisseste** Ort in unserer Galaxie  
Bei der Kollision herrscht eine Temperatur, welche 100'000 mal heisser ist als im Zentrum der Sonne
- der **kälteste** Ort auf unserem Planeten  
Die Magnete sind auf einer Strecke von fast 27 km auf 1.9 K (-271°C) gekühlt



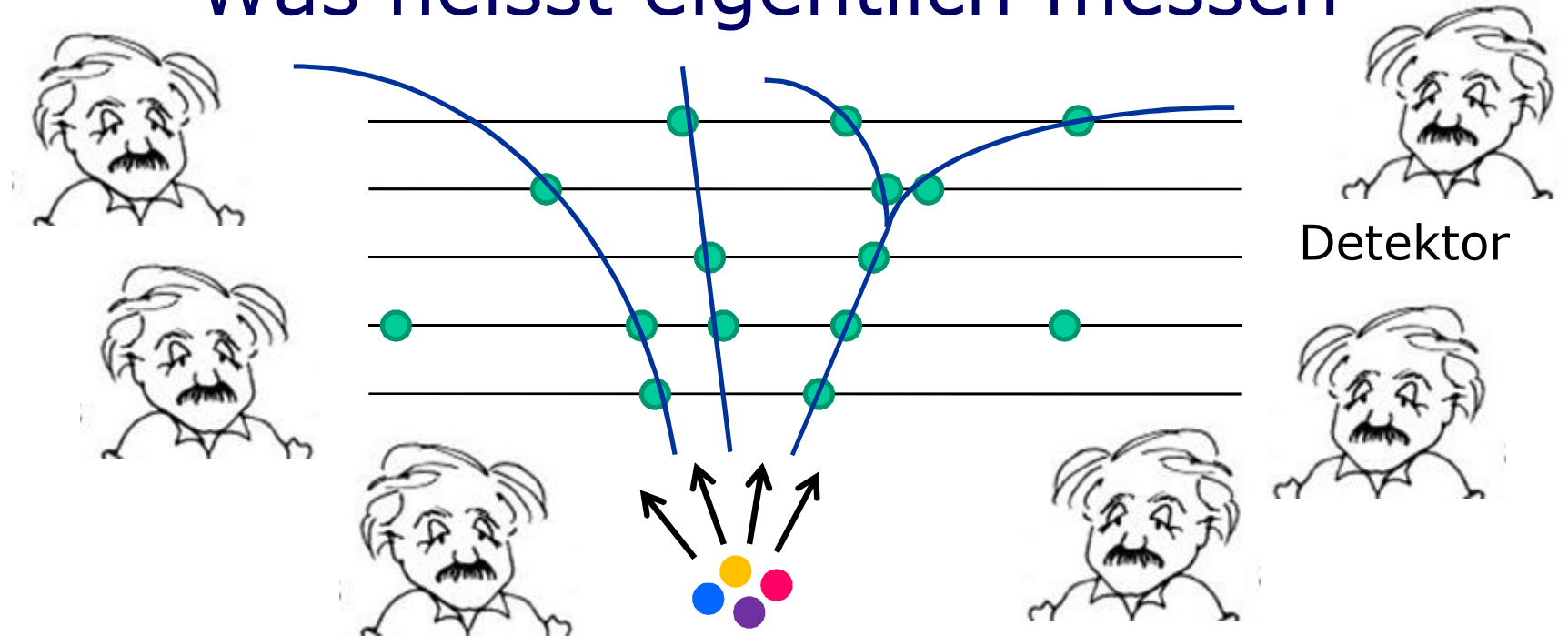


# III. Detektoren

# Was wollen wir messen?

- Wir produzieren / streuen Teilchen mit:
  - Typ
  - Ladung (+,0,-)
  - Impuls (gerichtete Grösse)
  - Geschwindigkeit (gerichtete Grösse)
  - Energie
  - Masse
  - Drehimpuls
  - Lebensdauer
- Der Detektor soll mindestens die **grünen Grössen** messen – die **roten** kann man ausrechnen
- Die blauen können manchmal aus Zerfällen bestimmt werden

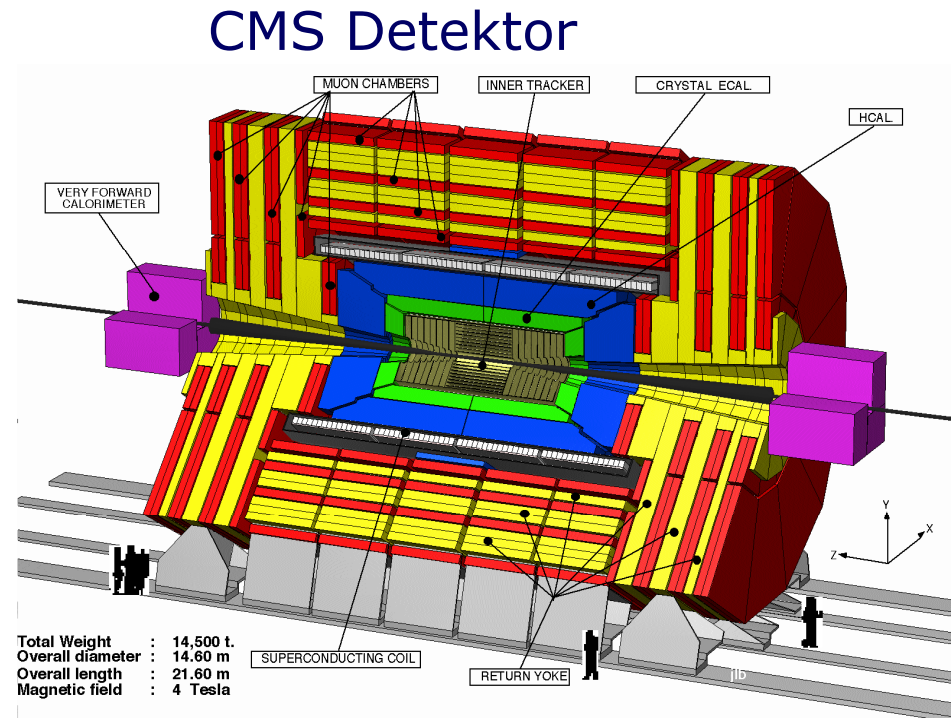
# Was heisst eigentlich messen?

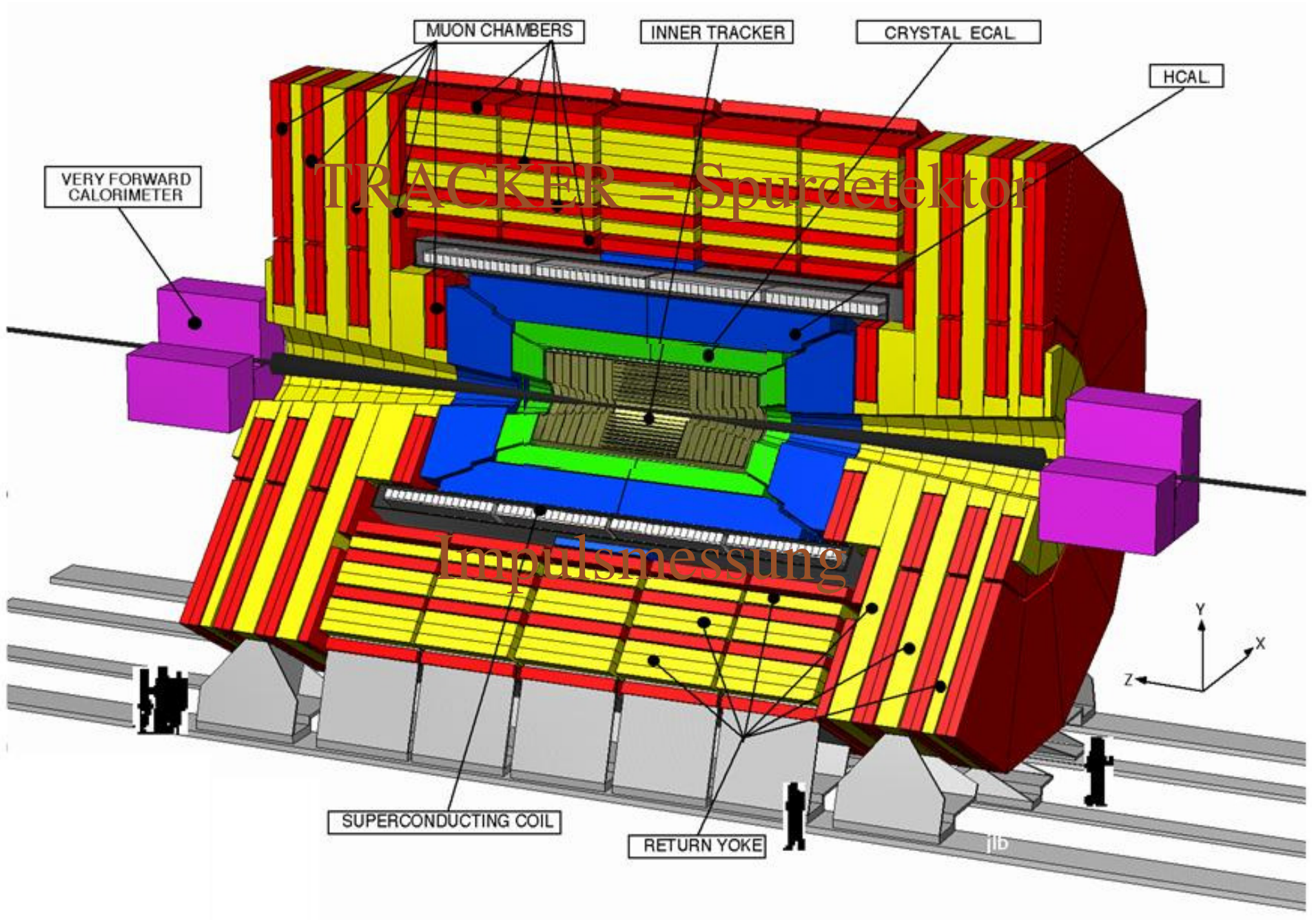


- Teilchen fliegen durch Detektor
- erzeugen elektrische Signale ●
- werden digitalisiert und gespeichert
- Computerprogramme rekonstruieren Spuren —
- für Analyse verwendbar

# Zwiebelschalen

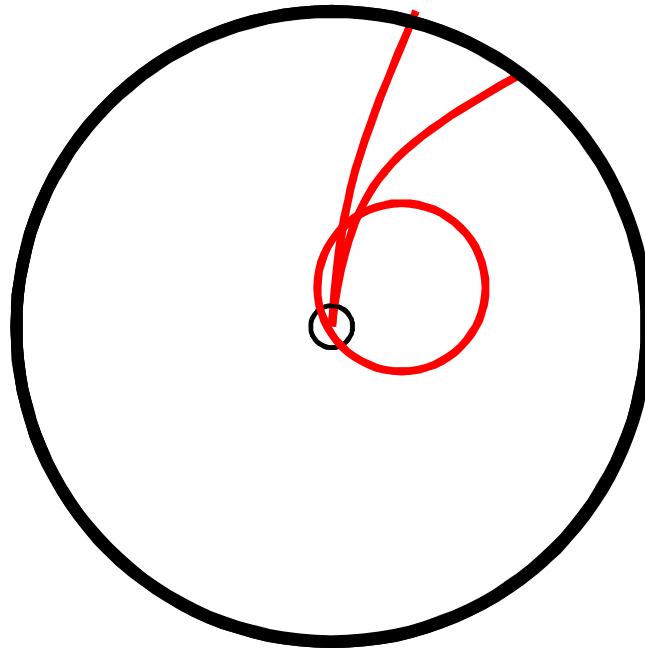
- Wir wollen verschieden Dinge von denselben Teilchen wissen – Detektor besteht aus mehreren Teilen (Subdetektoren)
- Vom Strahlkreuzungspunkt an nach aussen in Schalen angeordnet
- Subdetektoren innen sollen die aussen möglichst wenig stören





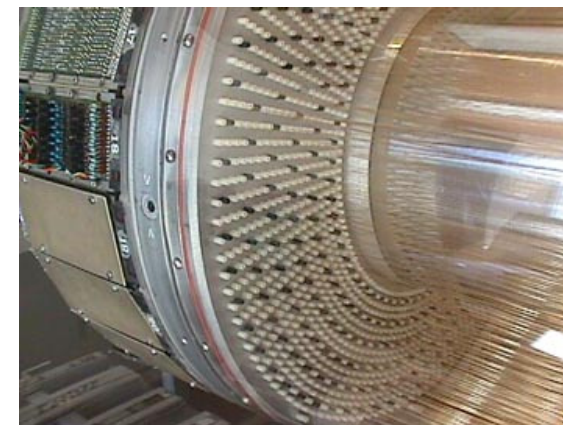
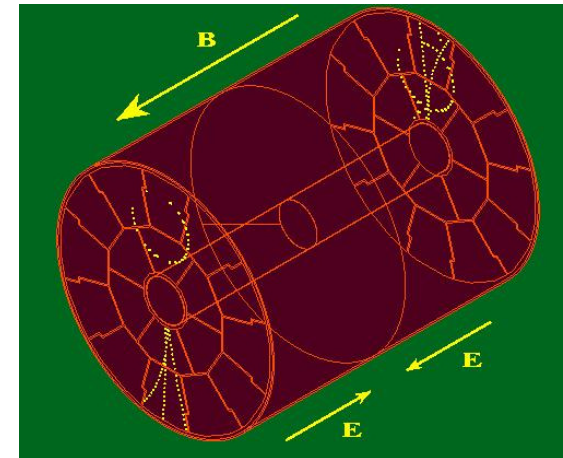
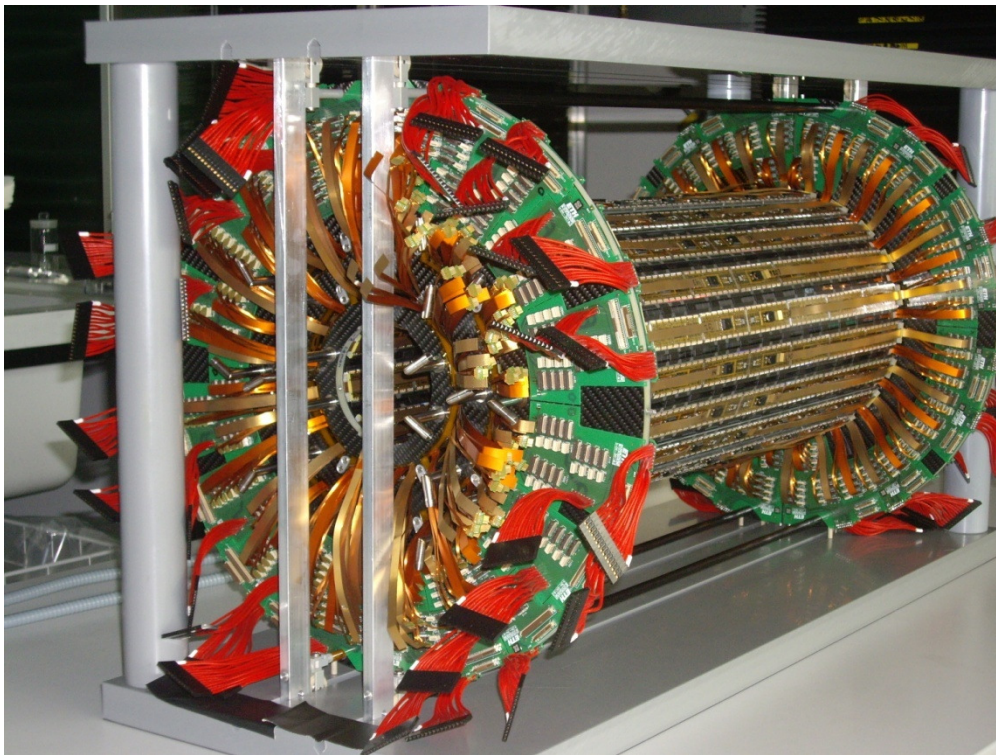
# Spurdetektoren

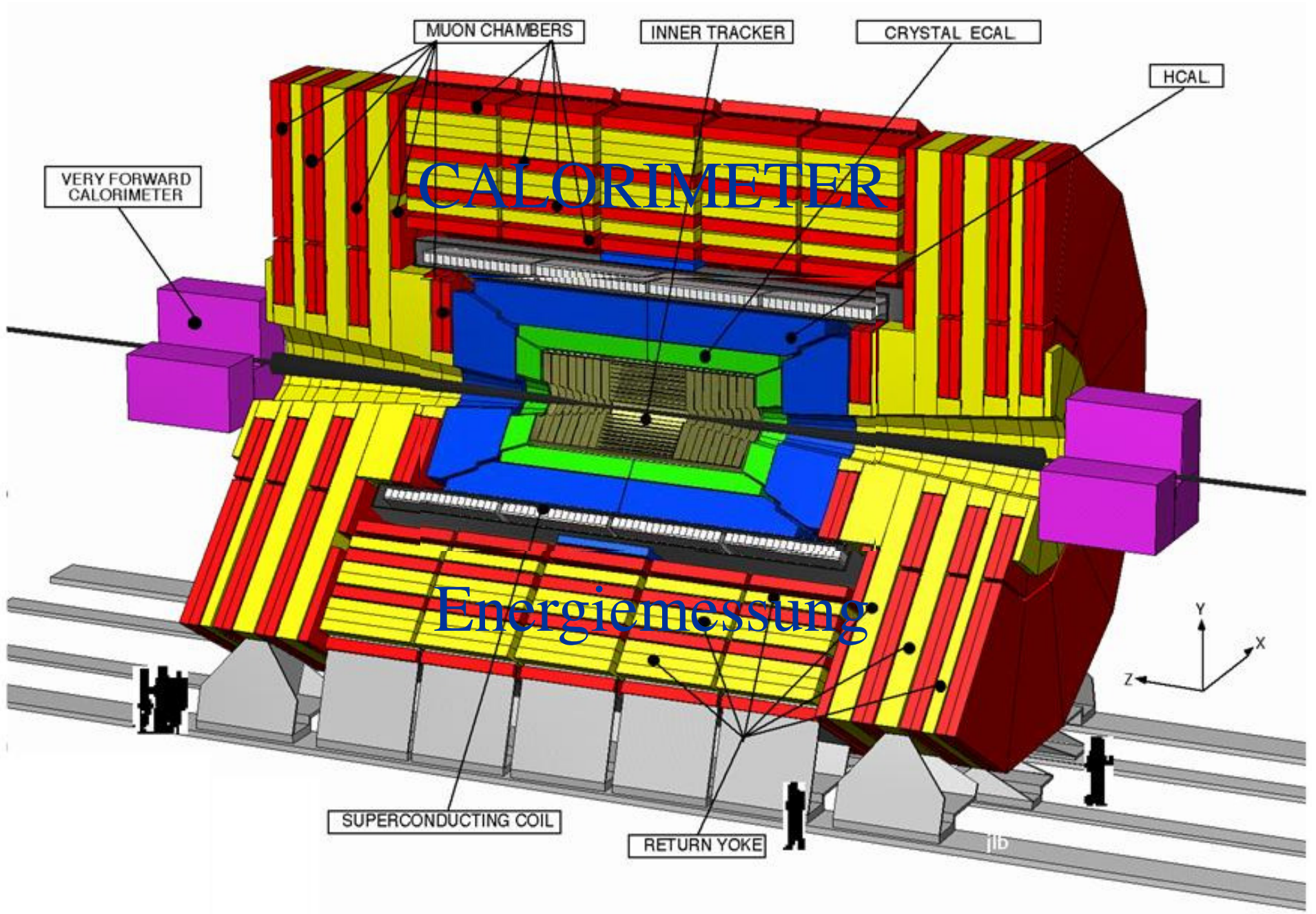
Je kleiner der Impuls,  
desto grösser die Ablenkung



# Spurdetektoren

- Funktionieren ähnlich wie eine Digitalkamera.
- Sensor: Dünne Siliziumscheiben (links) oder Gas (rechts).





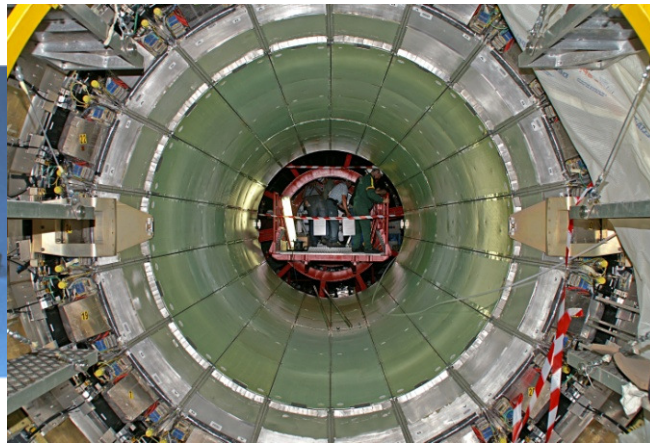
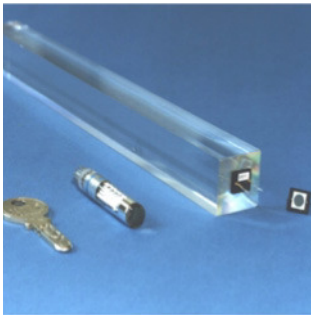


# Energien messen

→ Stoppe Teilchen und messe Energie die dabei frei wird

## Kristallkalorimeter

Stoppe das Teilchen  
in einem schweren Kristall  
und messe, wie viel Licht  
dabei entsteht



## Sampling Calorimeter

Messe, wie viele  
Schichten eines dichten  
Materials ein Teilchen  
durchdringt



# Zwei Arten von Teilchen

## Elektromagnetisch (Elektronen und Photonen)

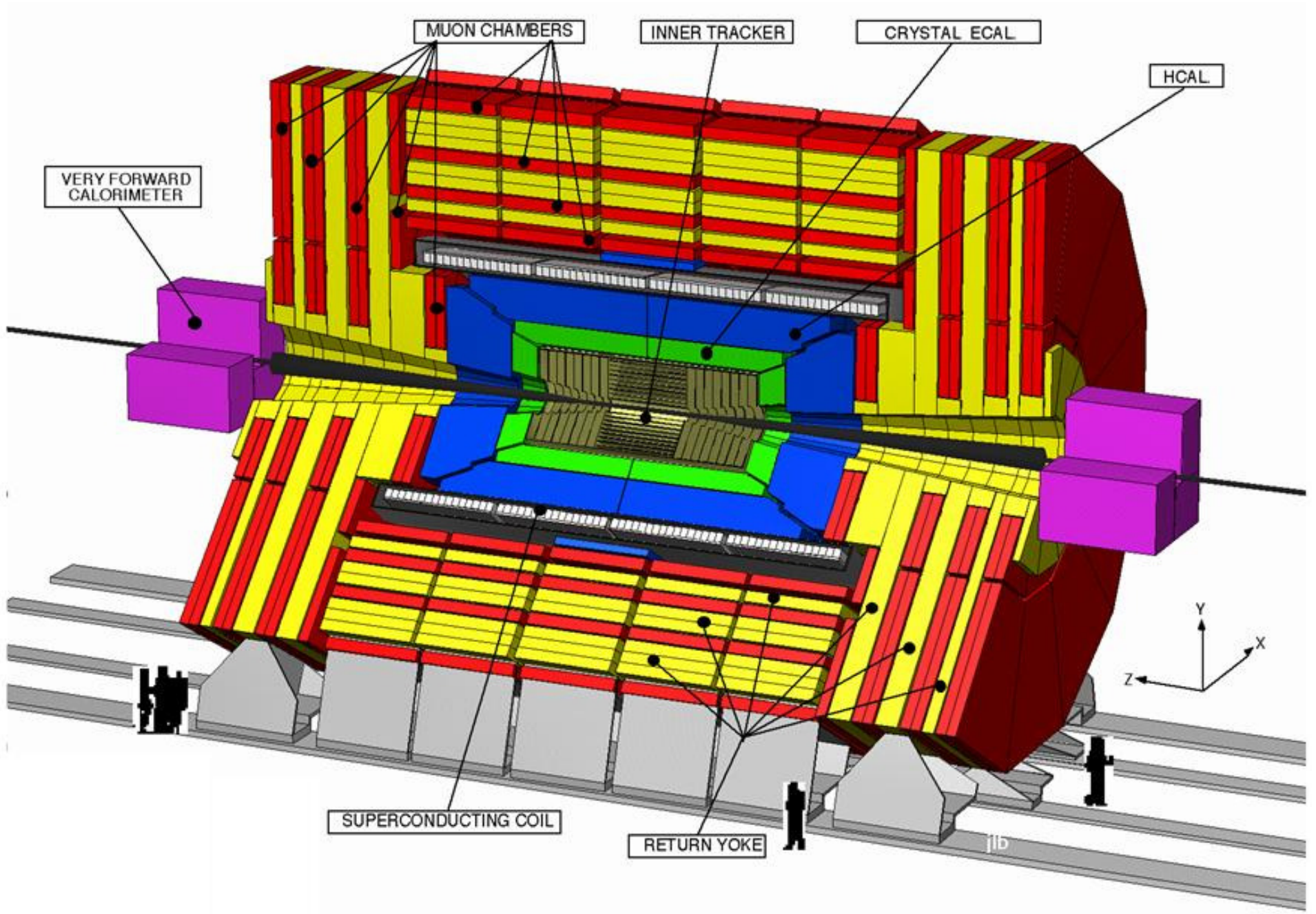
- Elektronen strahlen Photonen ab
- Photonen konvertieren zu Elektron – Positron
- Kurze, heftige Schauer

## Hadronisch (bestehen aus Quarks)

- Stösse mit Atomkernen produzieren mehr Hadronen
- Tiefe, dünnere Schauer

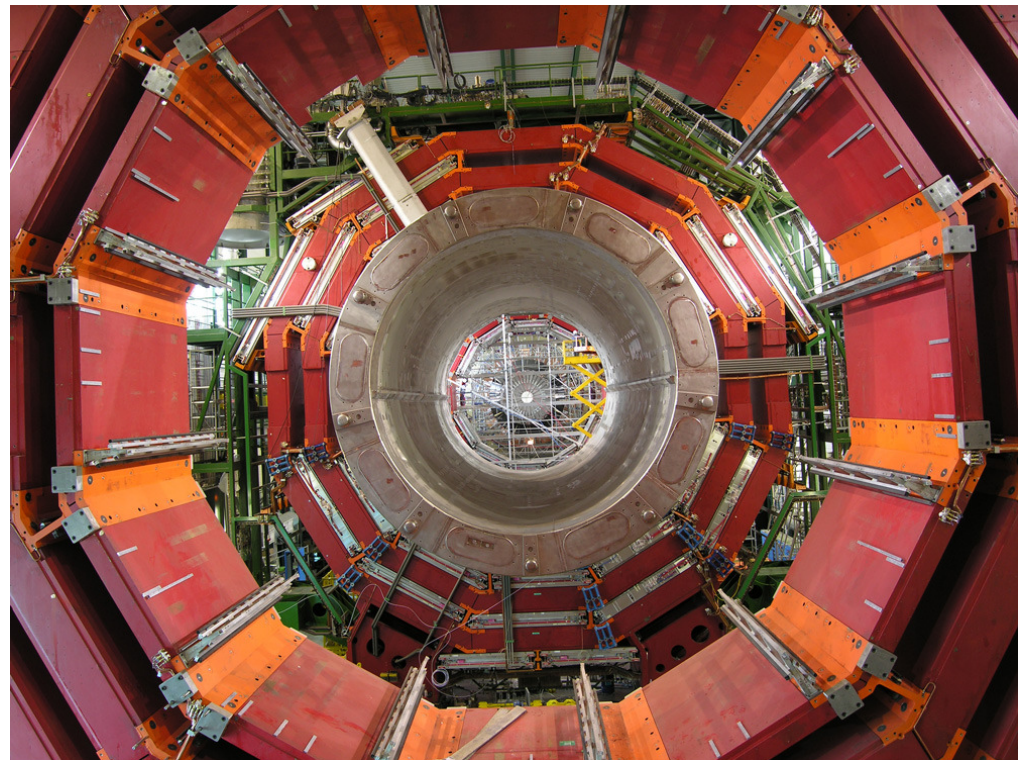
Weil die Hadronen tiefer im Kalorimeter wechselwirken, heisst der innere Teil **elektromagnetisches Kalorimeter**,  
der äussere **hadronisches Kalorimeter**





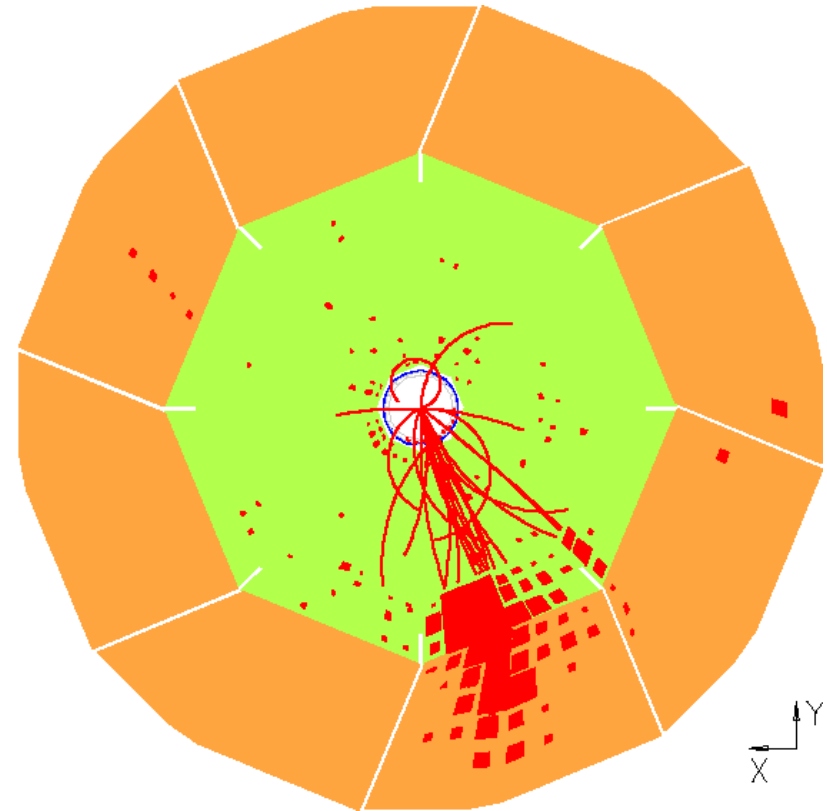
# Myonen

- Myonen sind die schwereren Partner der Elektronen
- Sind sehr durchdringend, d.h. sie bleiben im Kalorimeter nicht stecken
- Weise Myonen mit einem Detektor aussen am Kalorimeter nach

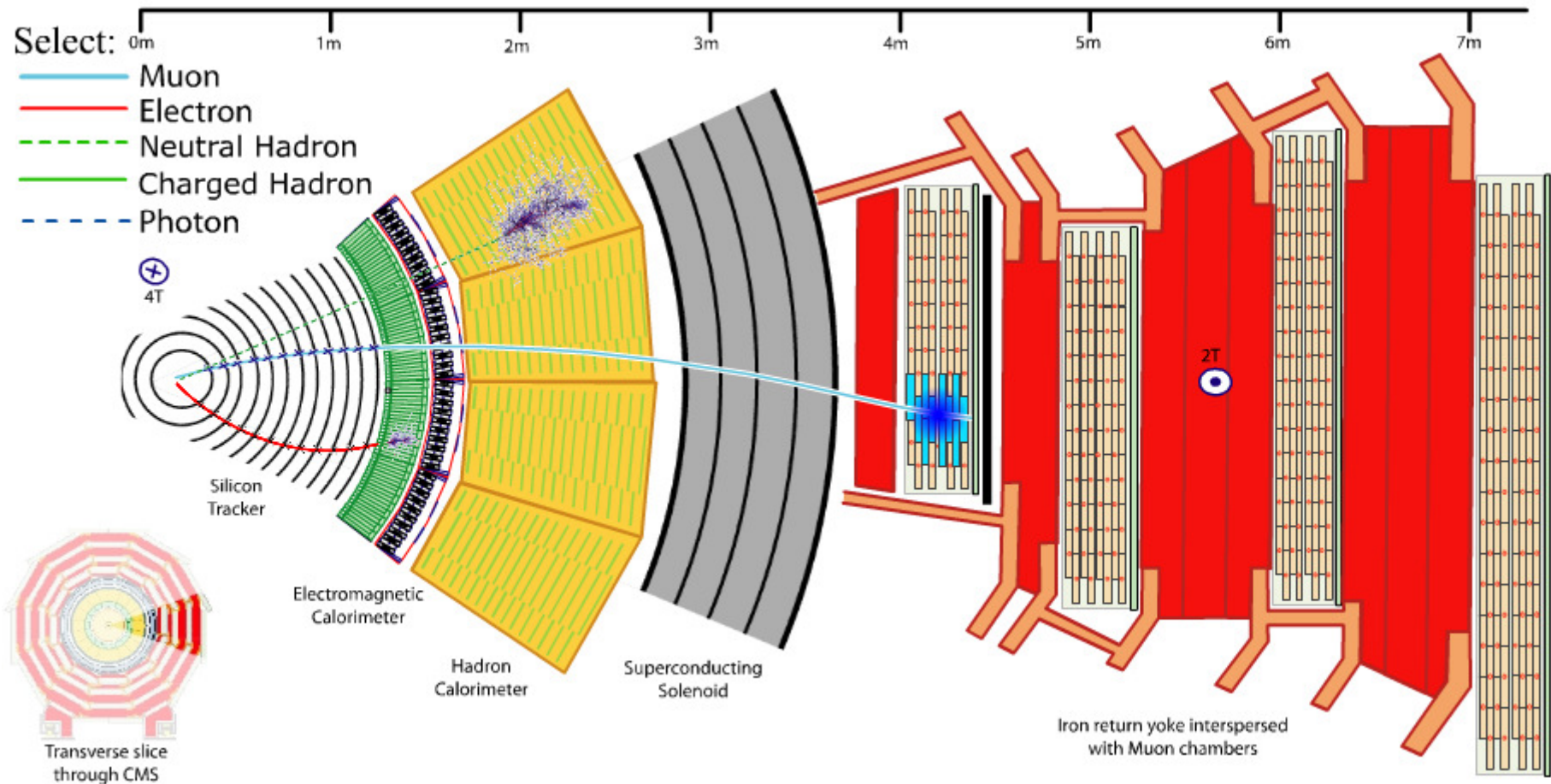


# Neutrinos

- Neutrinos wechselwirken fast nie mit Materie
- Fliegen unbemerkt durch den Detektor (und auch durch die Erde)
- Aber: Es fehlt Energie und Impuls
- Brauche Detektor, der möglichst wenig Löcher hat, um sicher zu sein, dass fehlender Impuls ein Neutrino ist



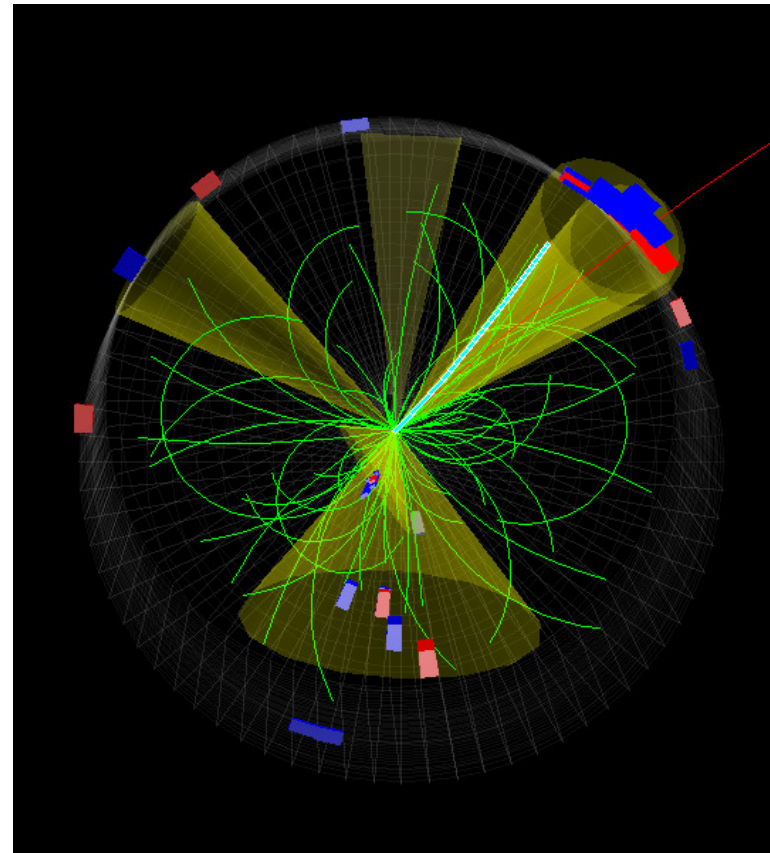
# Alle Puzzleteilchen zusammen



# Event Displays

- Jede Kollision die aufgezeichnet wurde, ist ein Ereignis (Event)
- Jedes Experiment hat ein Computerprogramm, um die Information von einem Ereignis darzustellen
- Man kann vom betrachten des Events viel über die Physik lernen

Mehr dazu am Nachmittag



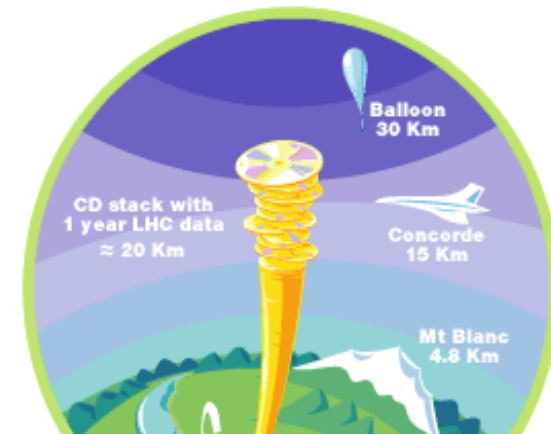
# Datenraten und Computing

## Produziere immense Datenmenge:

- Mehr als 1 DVD pro Minute
- 20 km hoher CD Turm pro Jahr

→ Brauche „beliebig viel“  
Prozessor-Power:

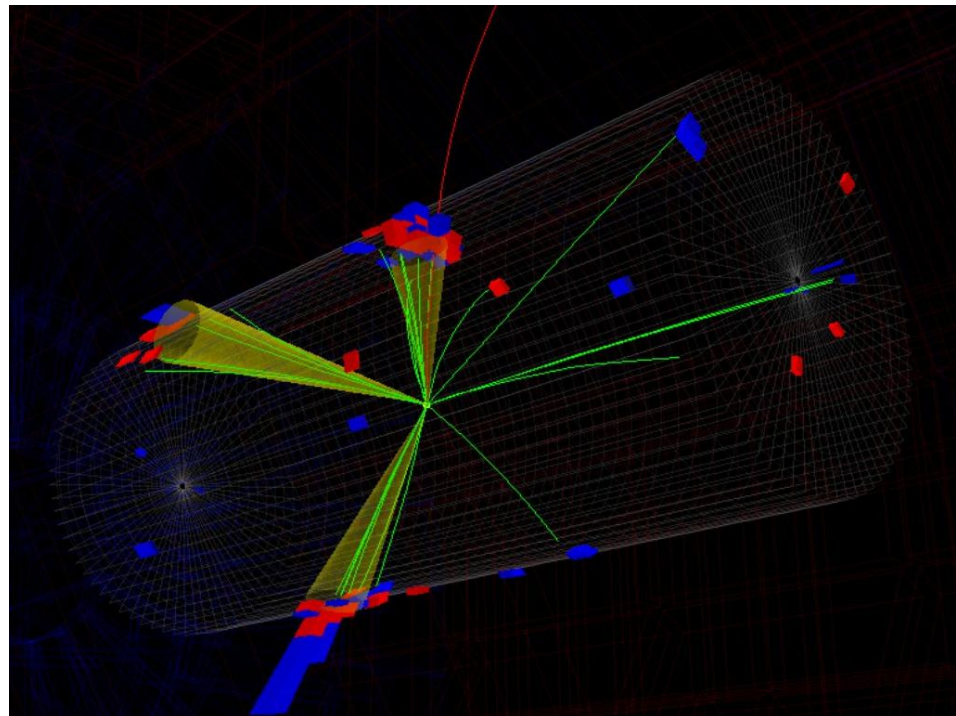
→ **Grid:** Schalte Computer aller  
beteiligter Institute zusammen



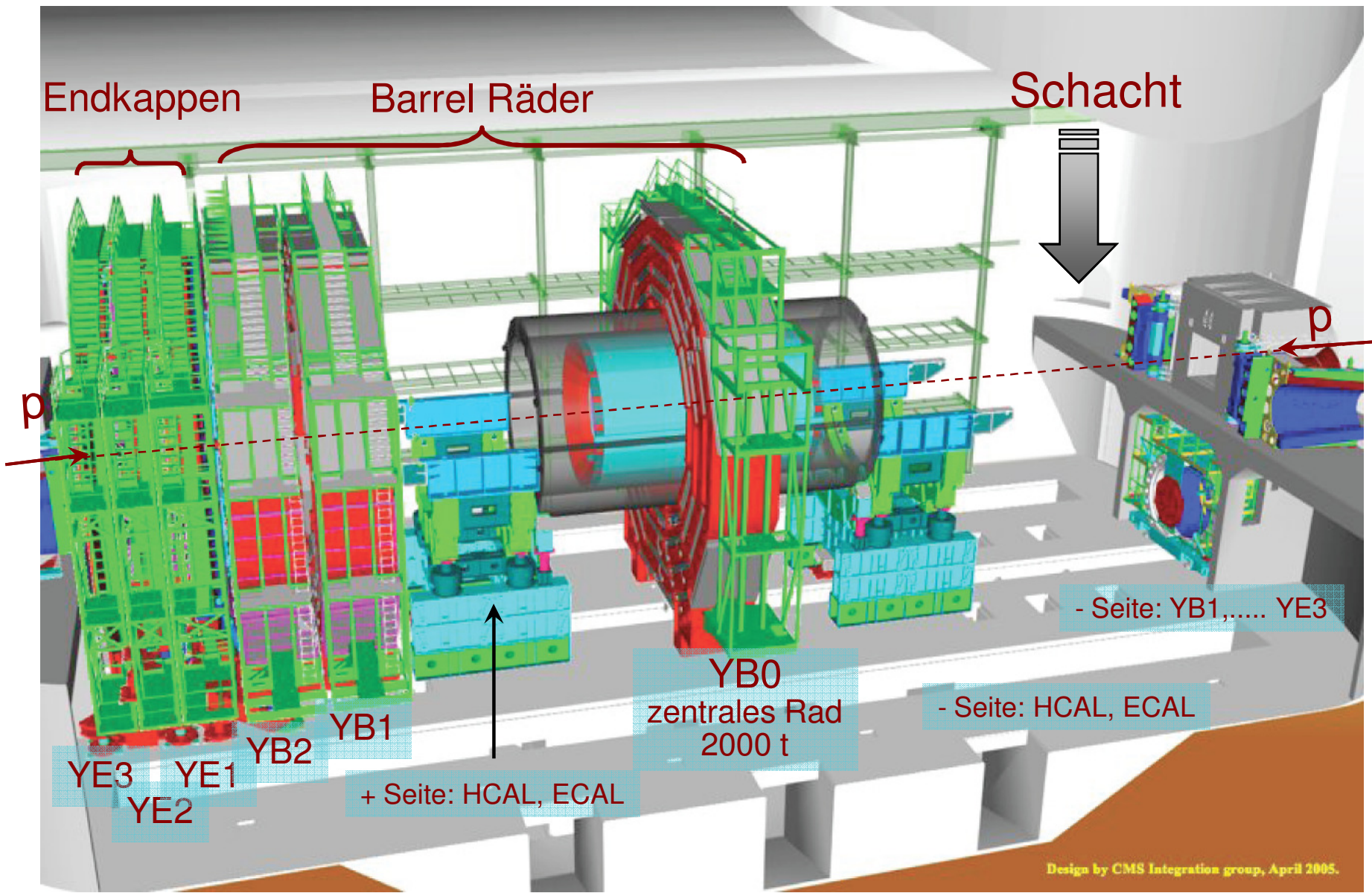


# Ausblick

- Der Beschleuniger LHC und die Experimente sind in den letzten Vorbereitungsphasen
- Messungen beginnen in diesem Jahr...
- Erhoffen uns Antworten auf die offenen Fragen der Teilchenphysik
- Wir dürfen gespannt sein...



Fotos vom CMS Detektor



Endkappen

Barrel Räder

Schacht

p

p

YE3

YE1

YE2

YB2

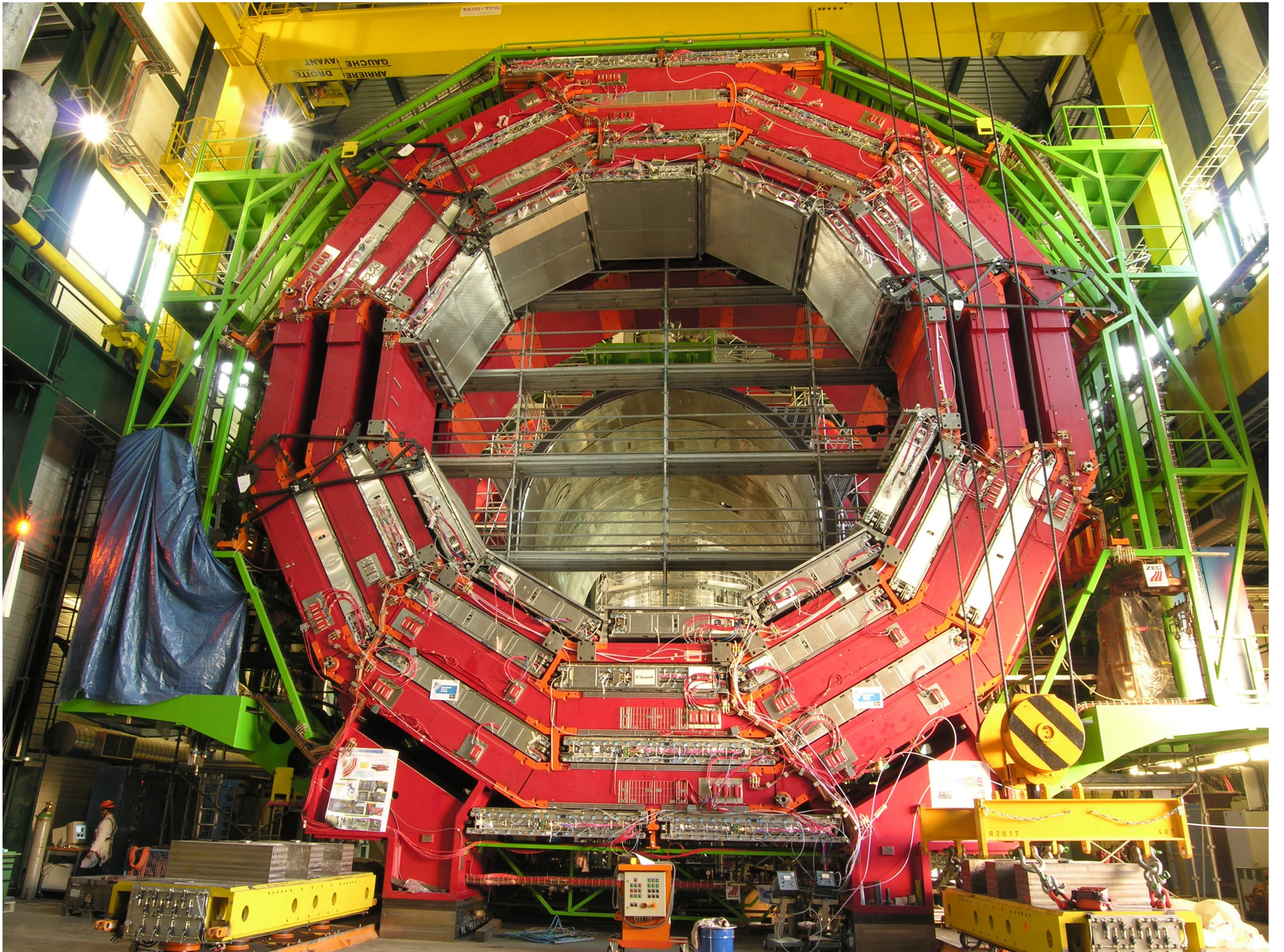
YB1

YB0  
zentrales Rad  
2000 t

- Seite: YB1,..... YE3

- Seite: HCAL, ECAL

+ Seite: HCAL, ECAL



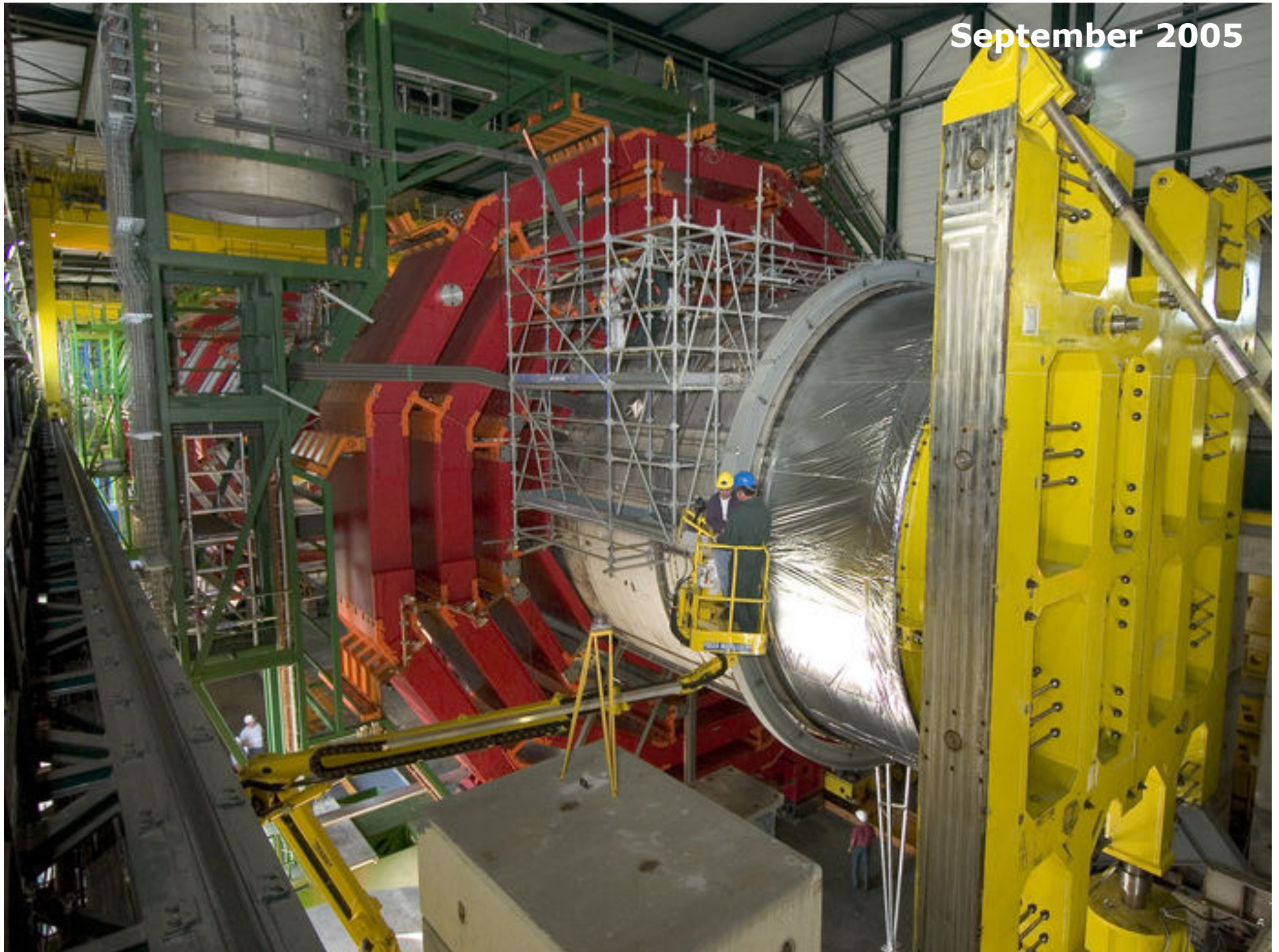
September 2005



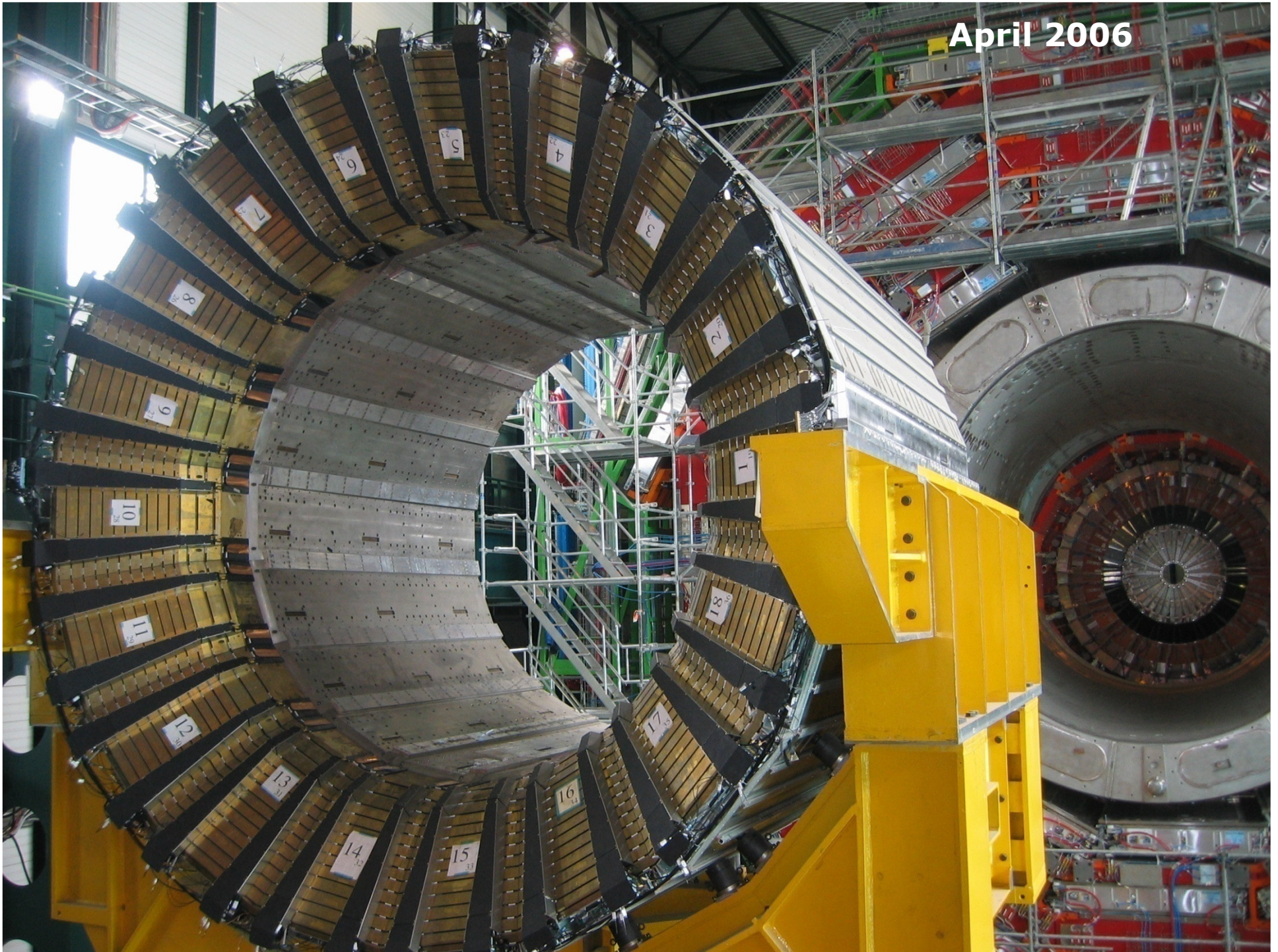
September 2005



September 2005

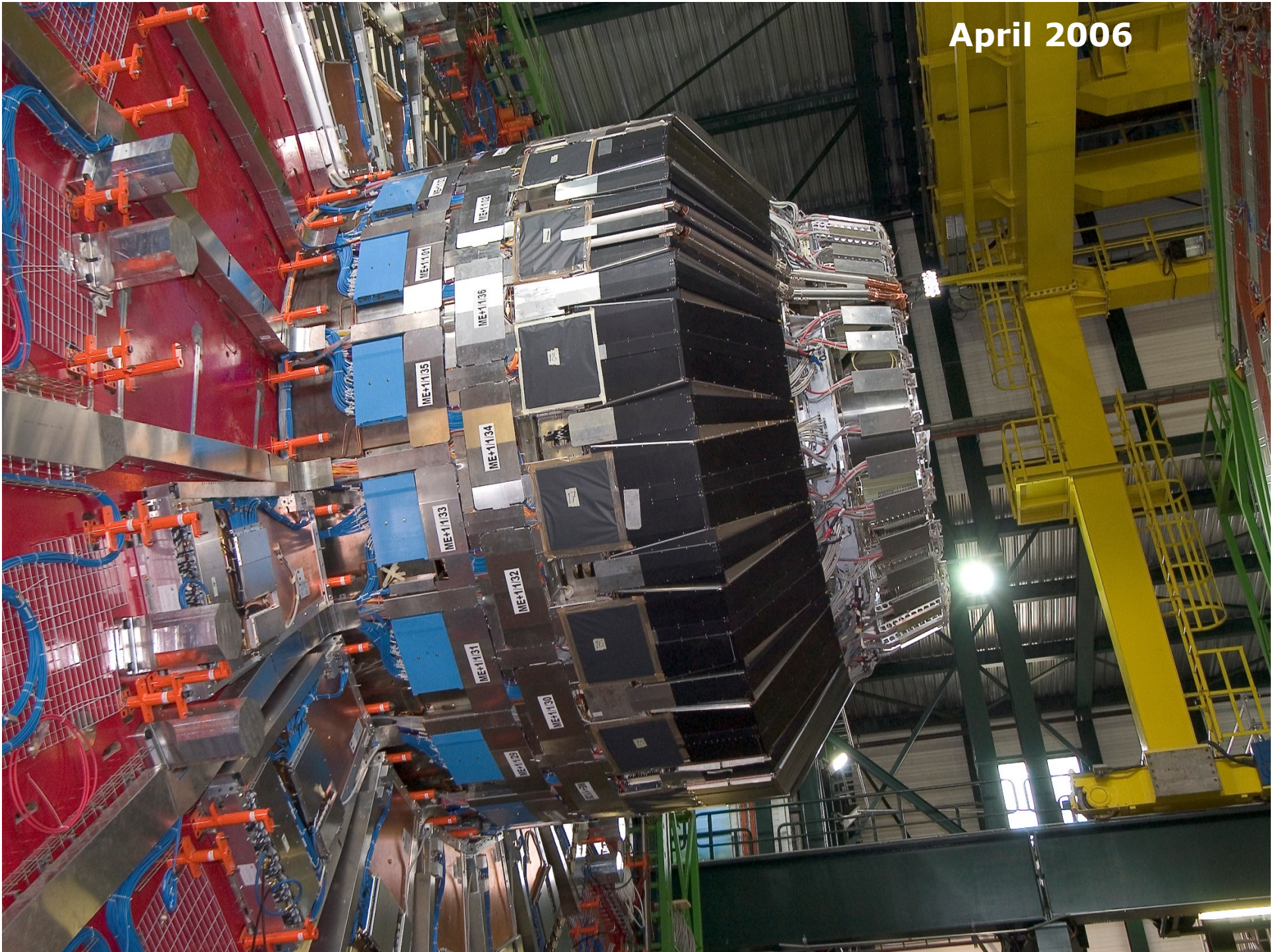


April 2006





April 2006



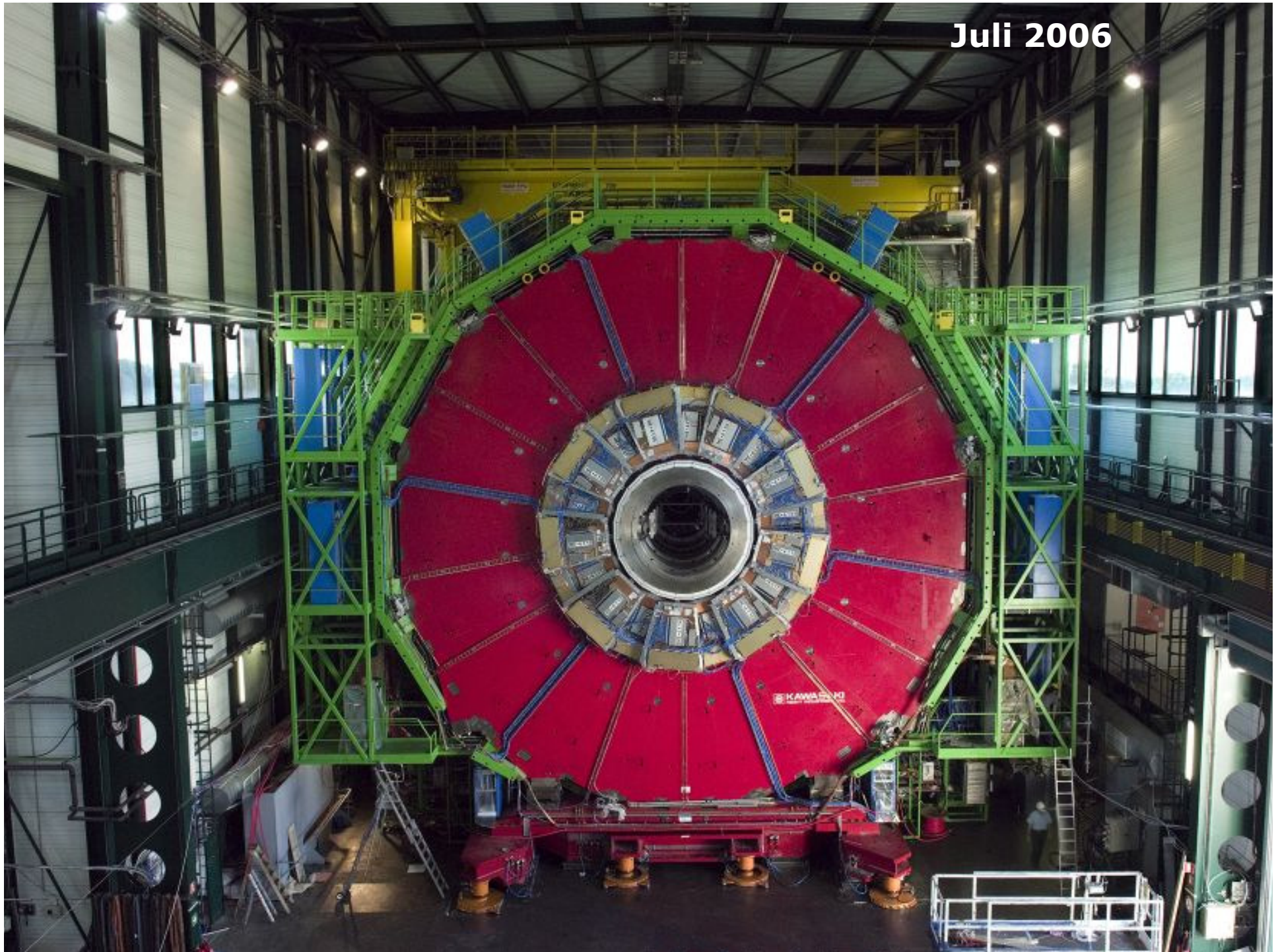
Juli 2006

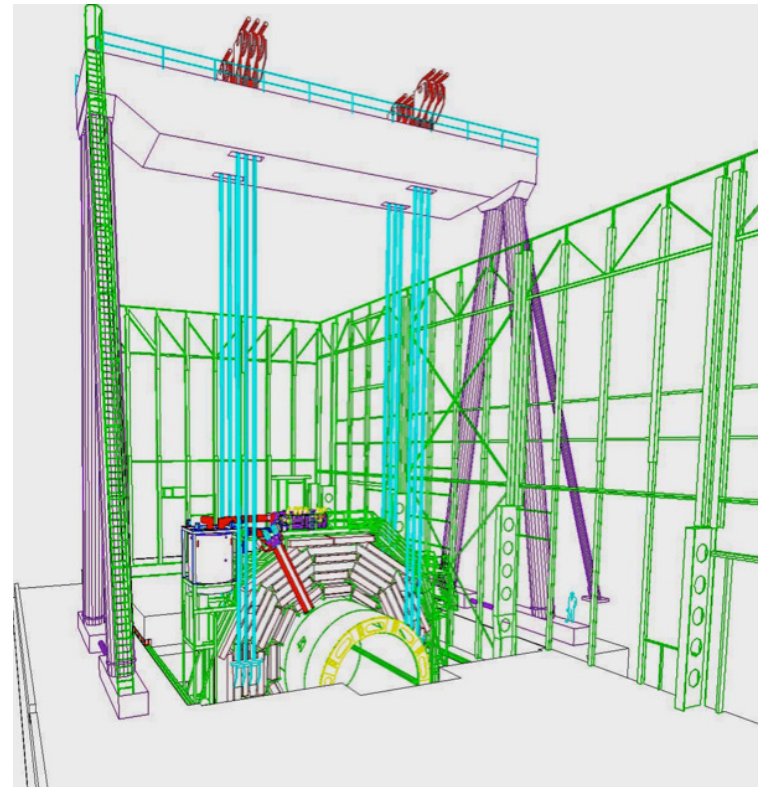
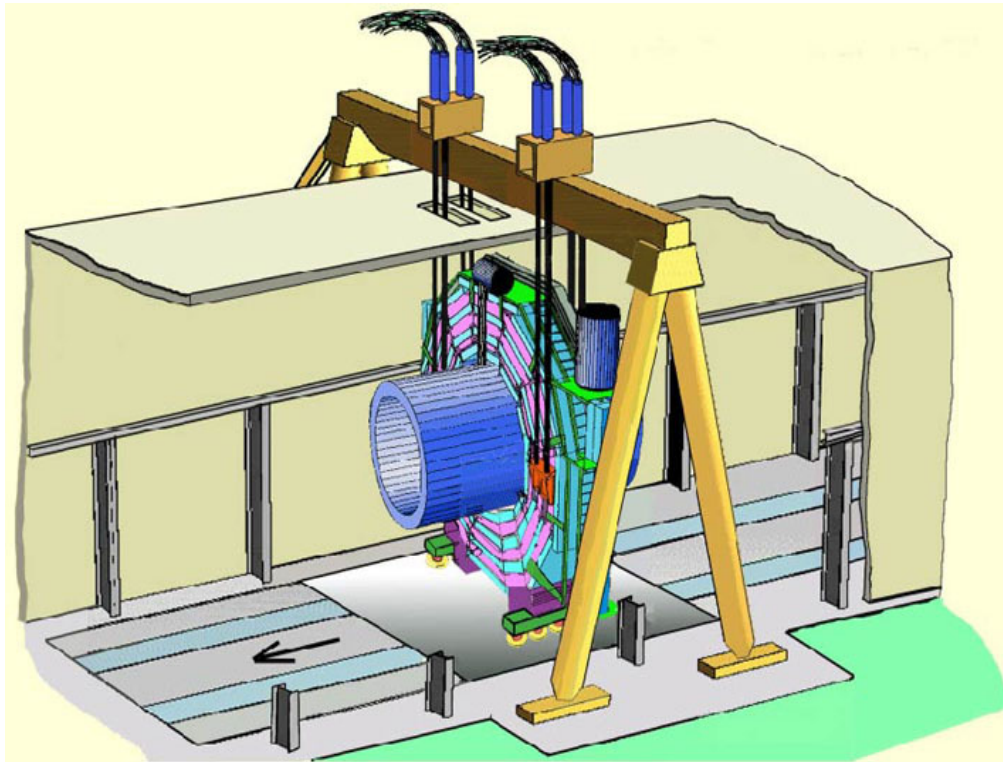


Juli 2006



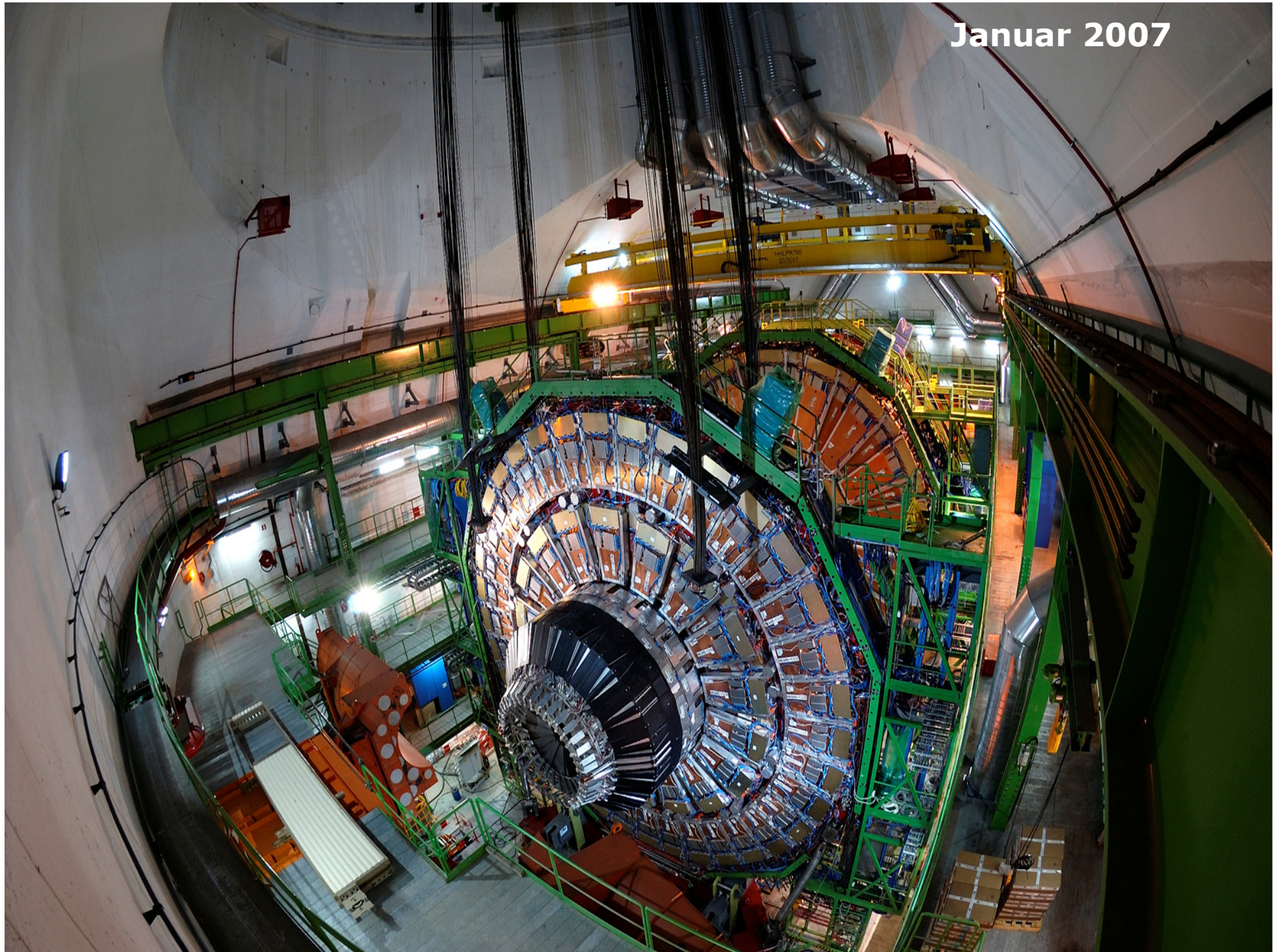
Juli 2006



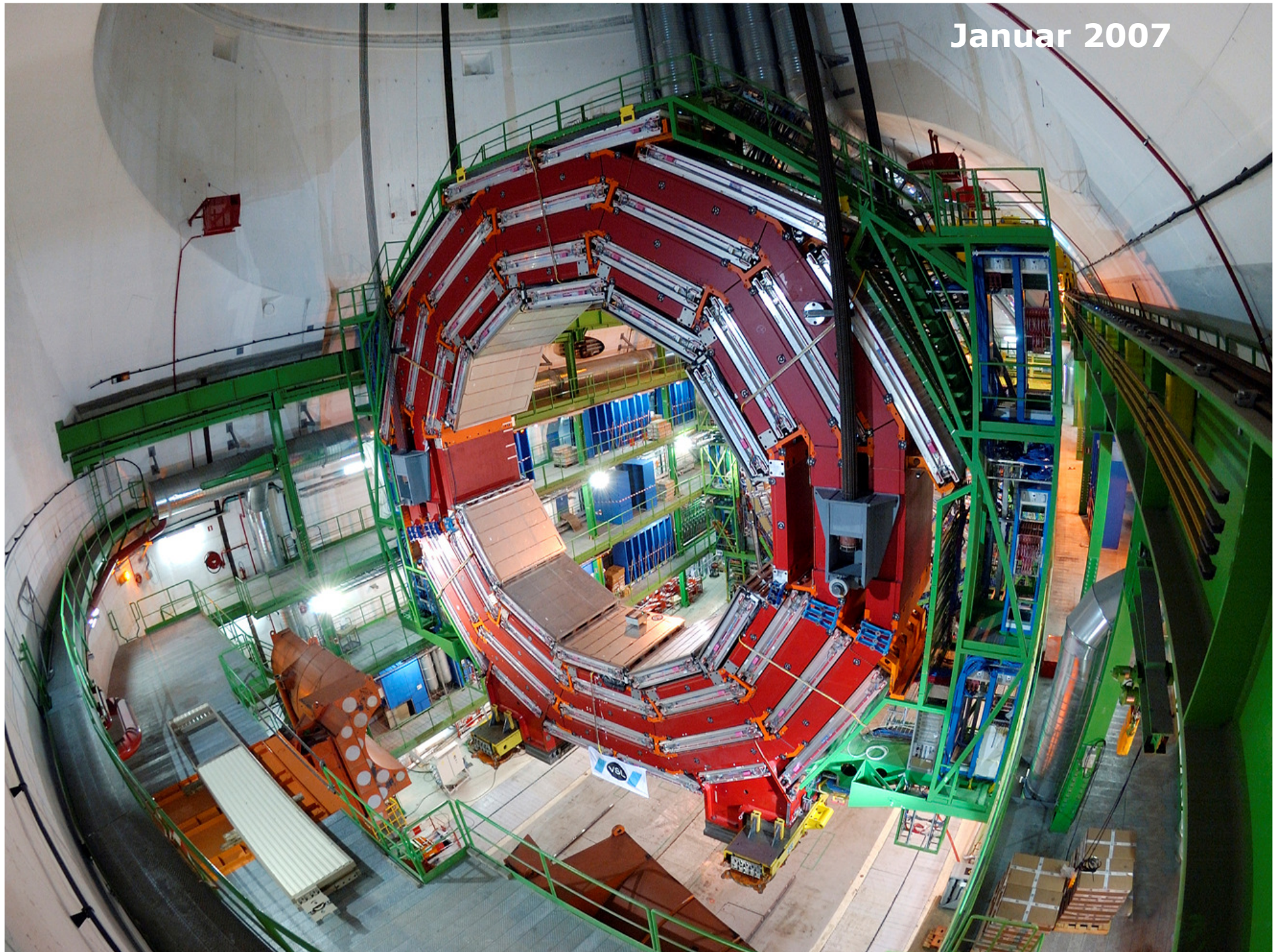




Januar 2007

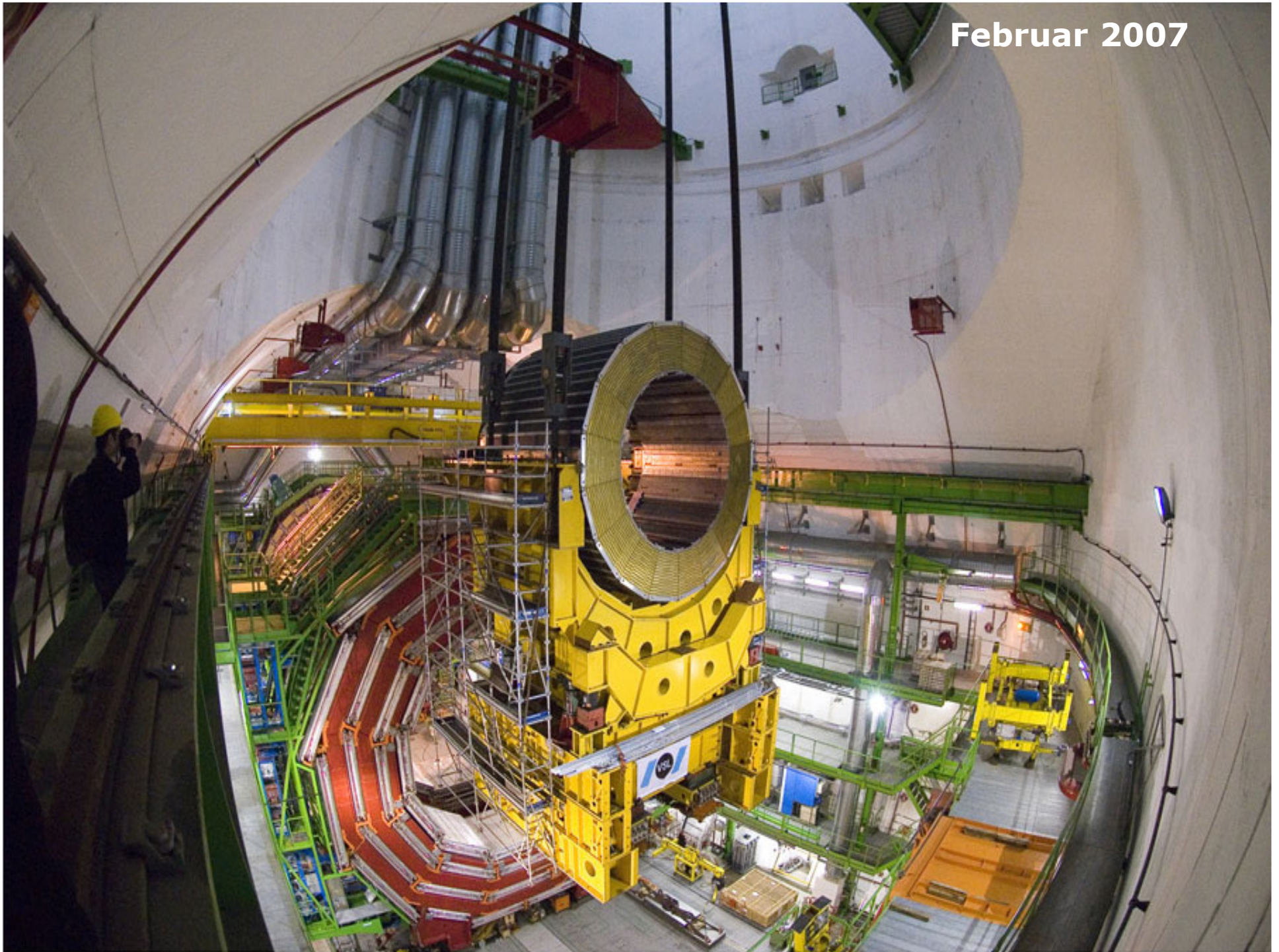


Januar 2007

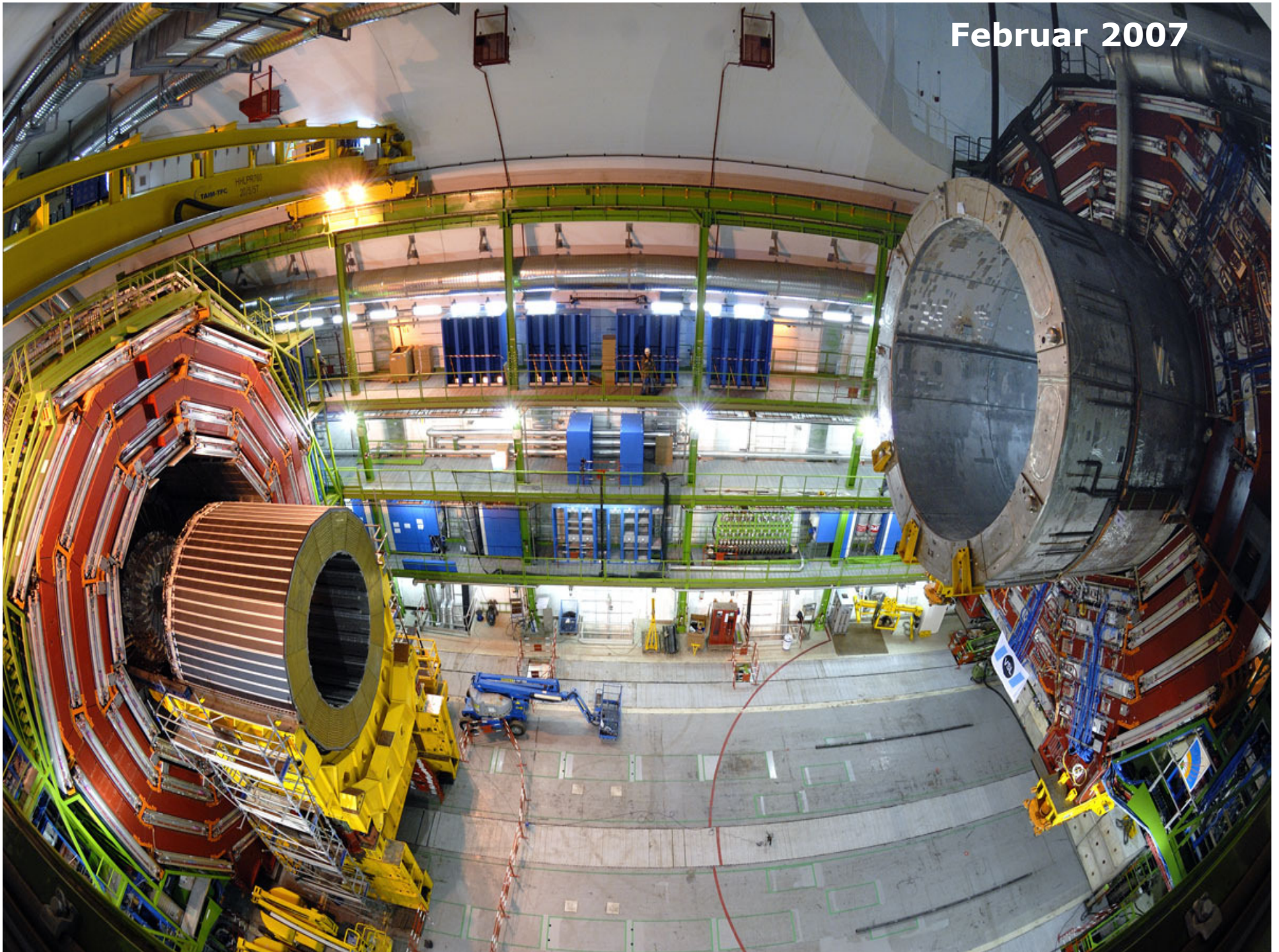




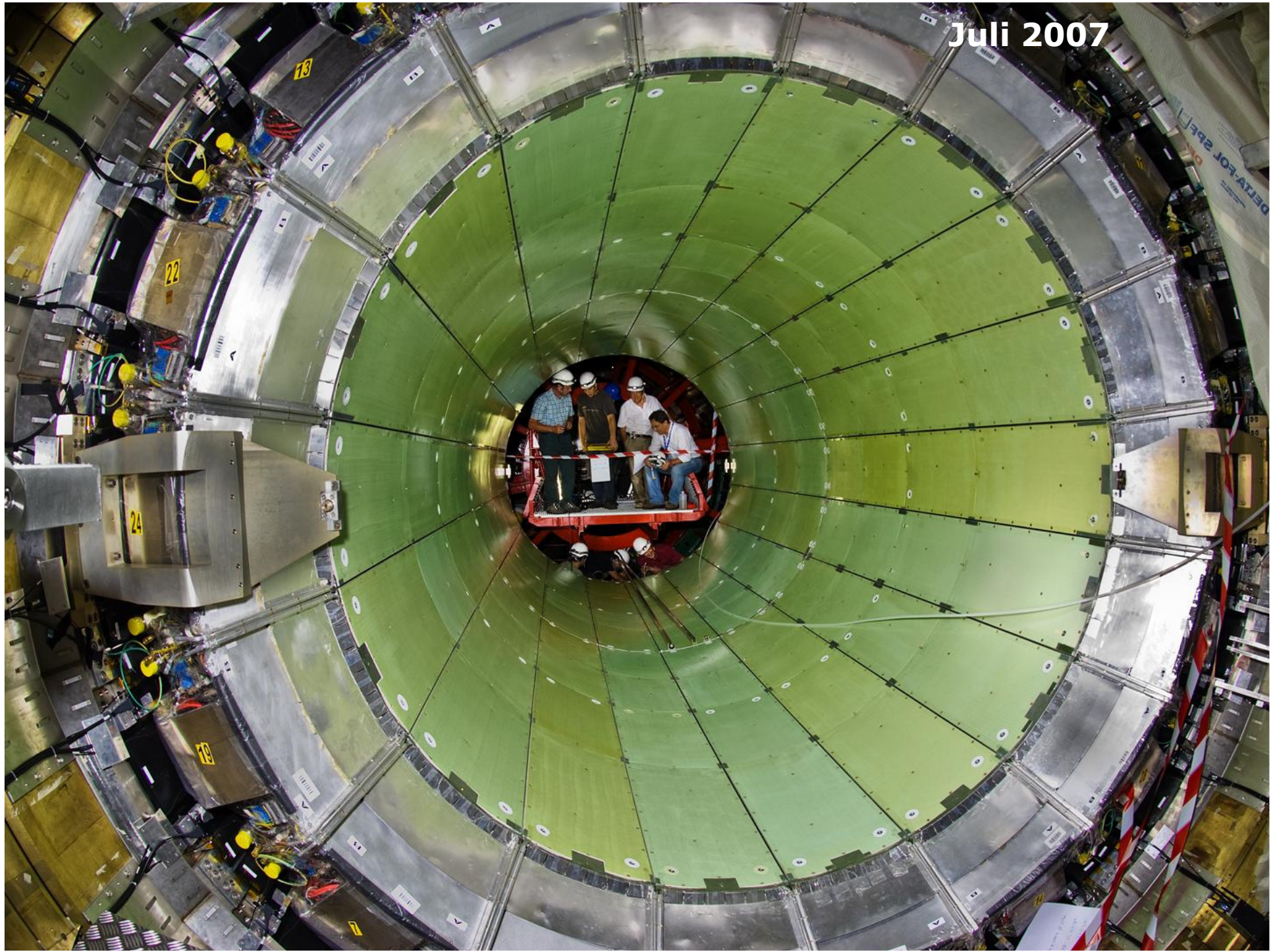
Februar 2007



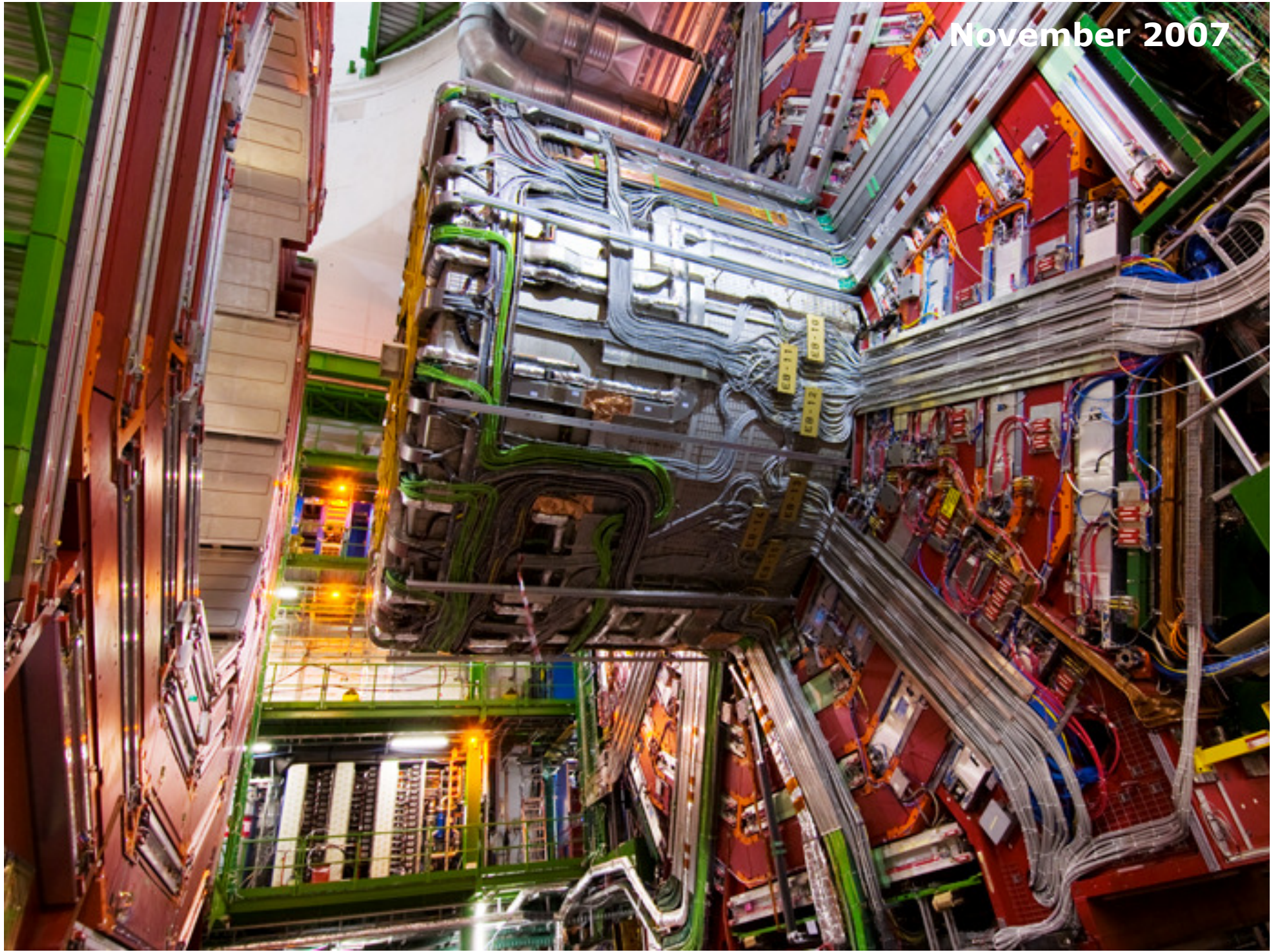
Februar 2007

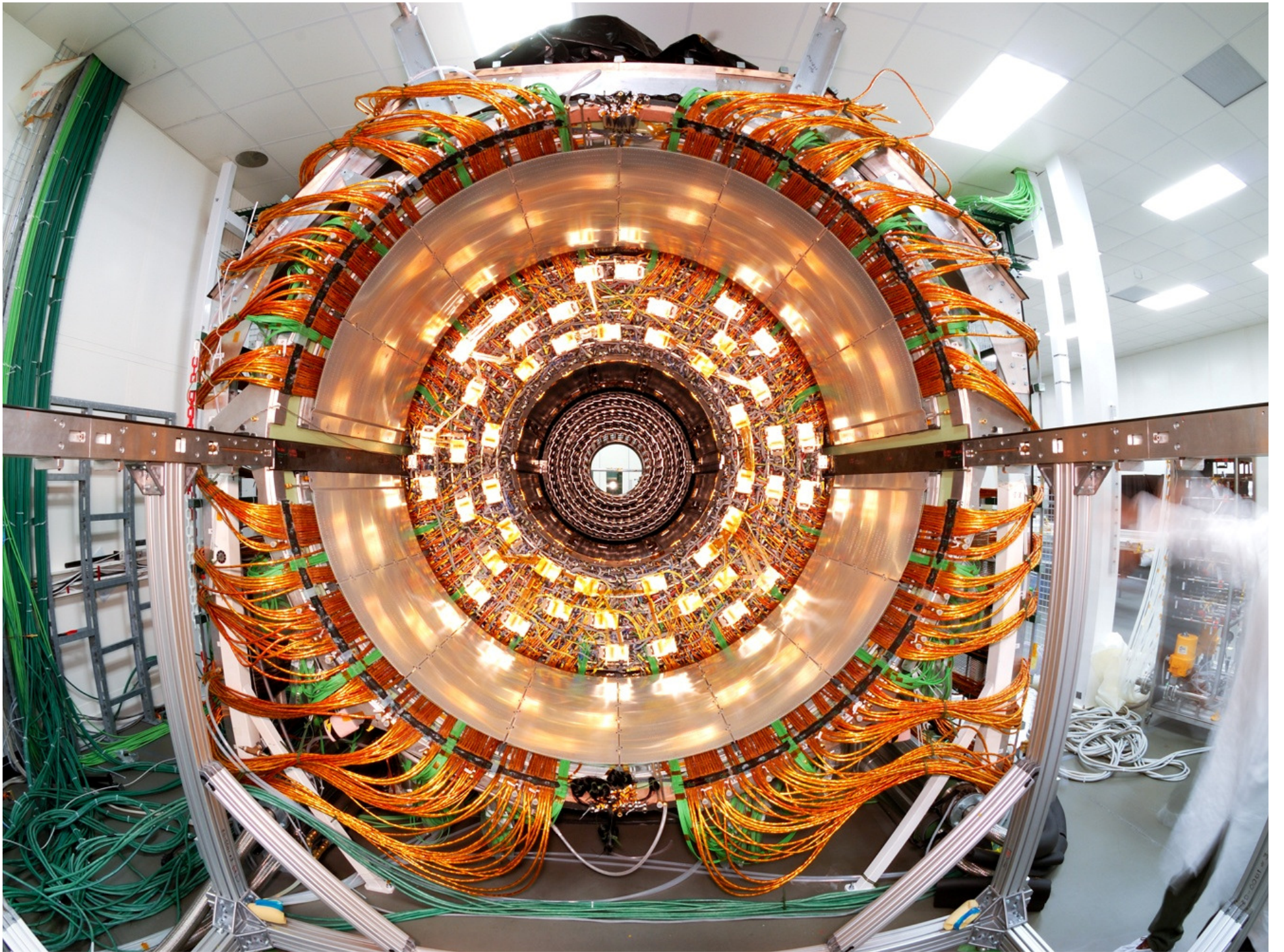


Juli 2007

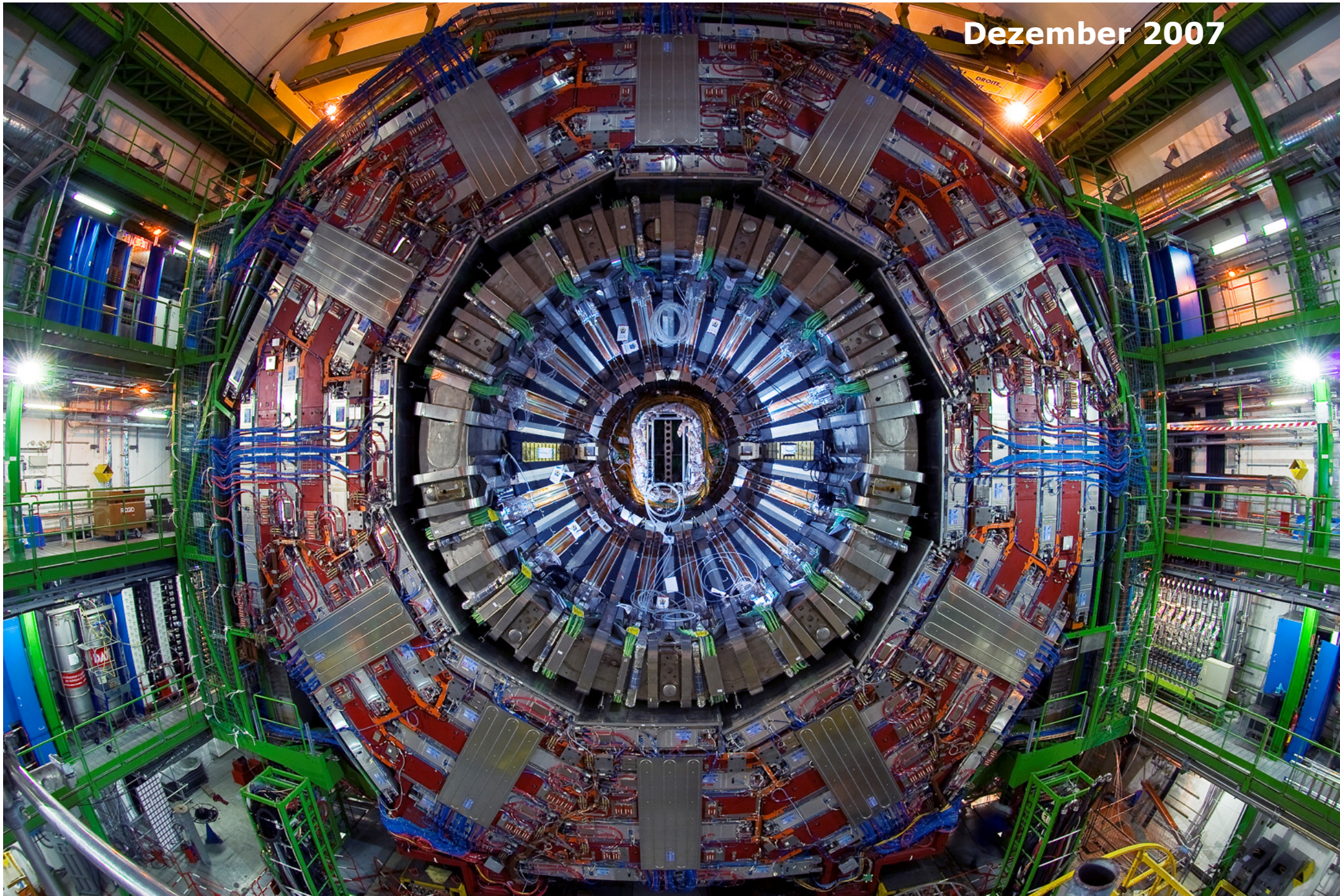


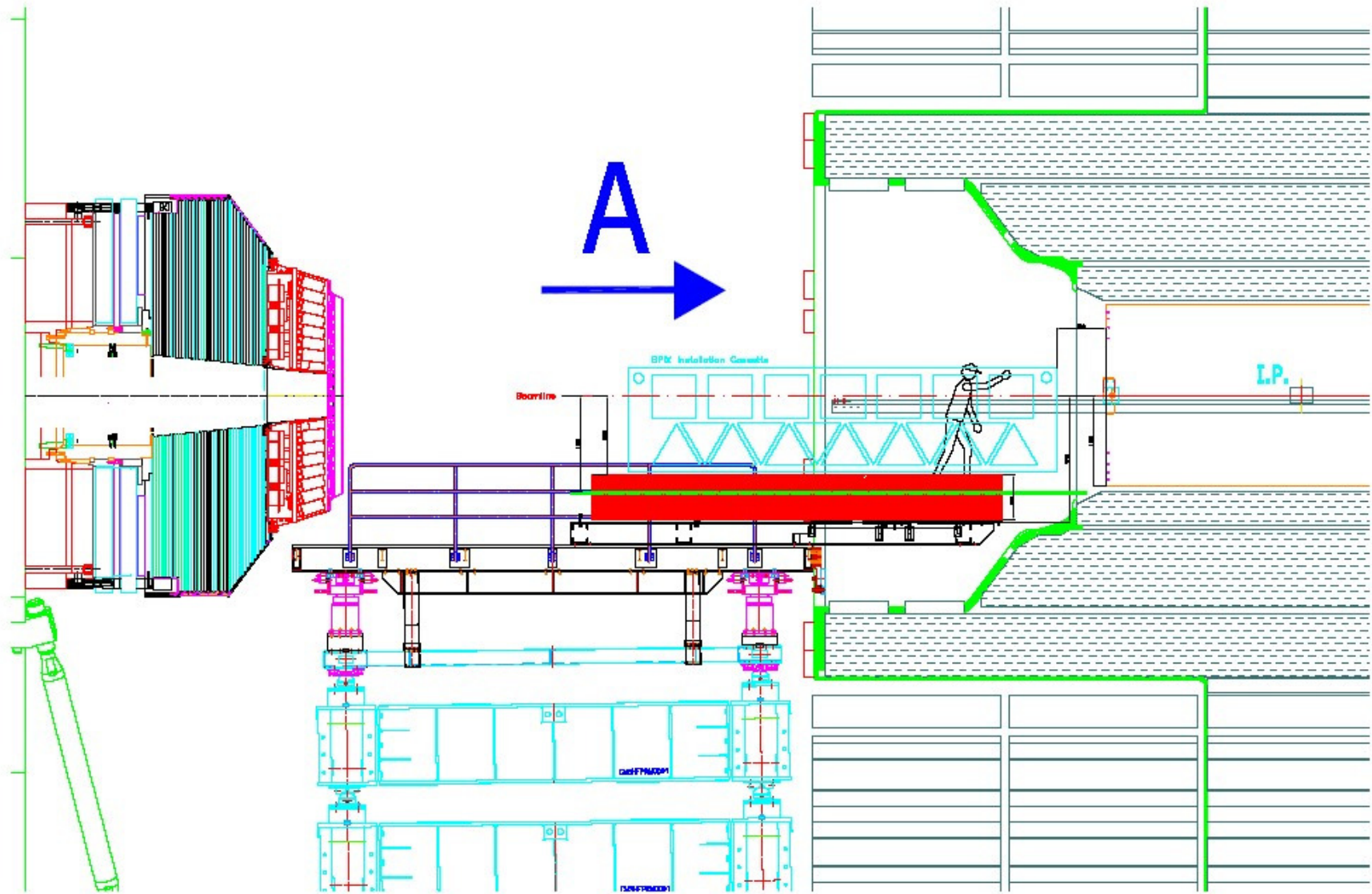
November 2007





Dezember 2007





## Installation Pixel Detektor





Besten Dank für die Aufmerksamkeit!

Fragen?

