

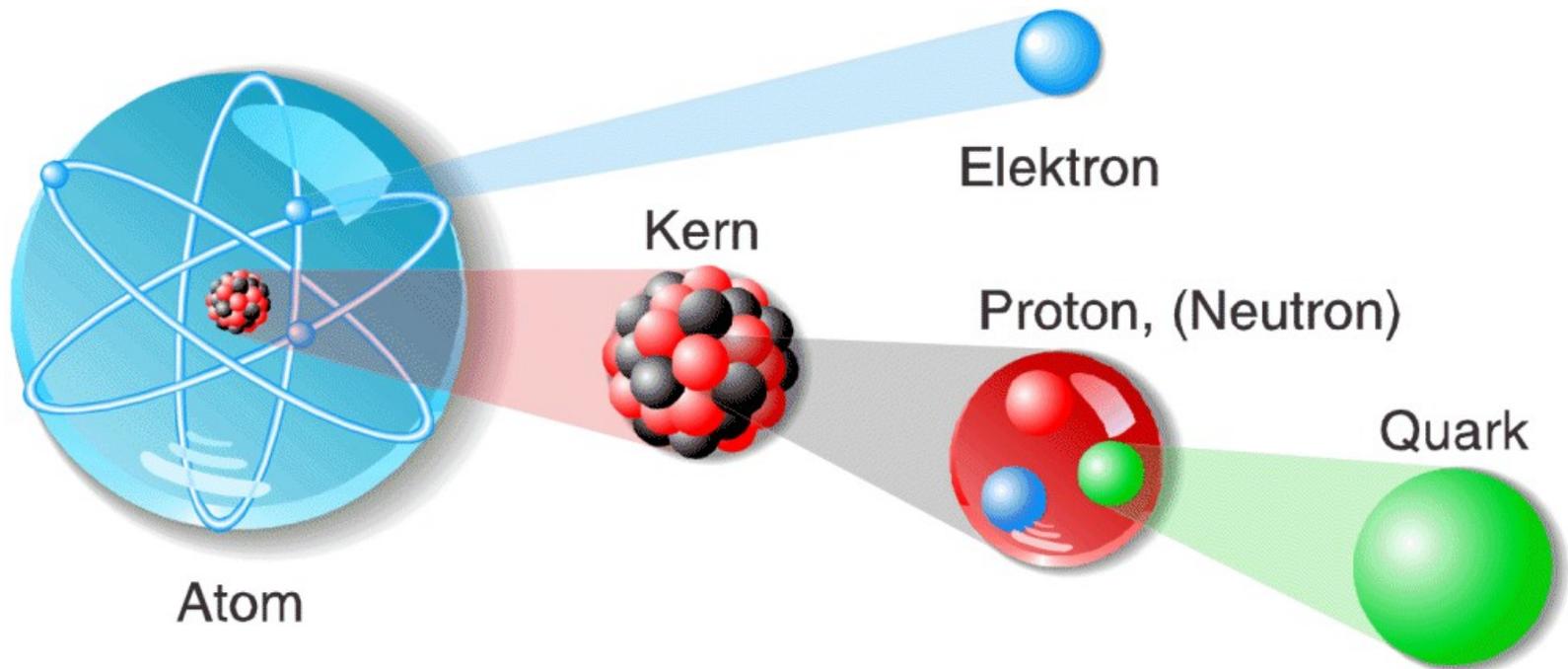


Beschleuniger und Detektoren

Experimentieren in der Teilchenphysik

Lea Caminada Lukas Wehrli
ETH Zürich

Wie macht man allerkleinste Dinge sichtbar?



1. Anschauen: Mikroskopie

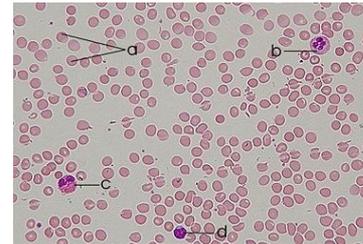
- Mit blossem Auge:
 $1/10$ mm



- Lichtmikroskop:
 $1/5$ μ m



- Elektronenmikroskop:
1 nm

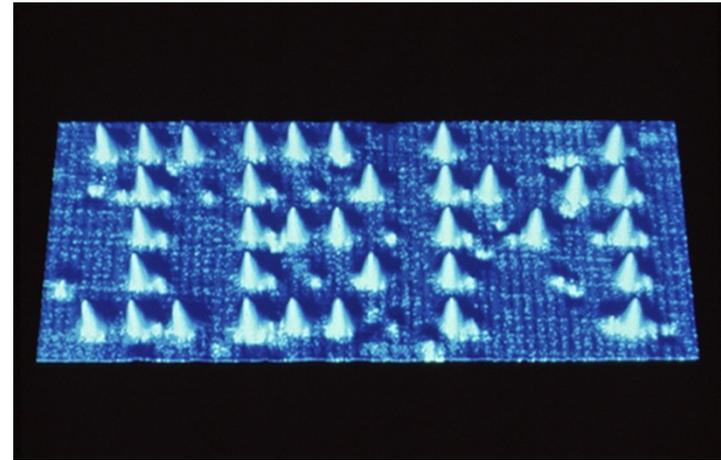


Reicht fast, um einzelne Atome zu sehen...



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

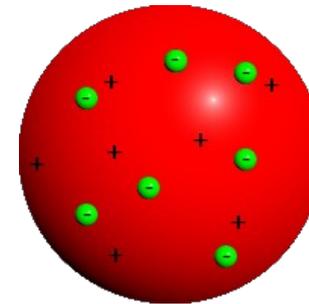


3. Beschiessen: Streuexperimente

- 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

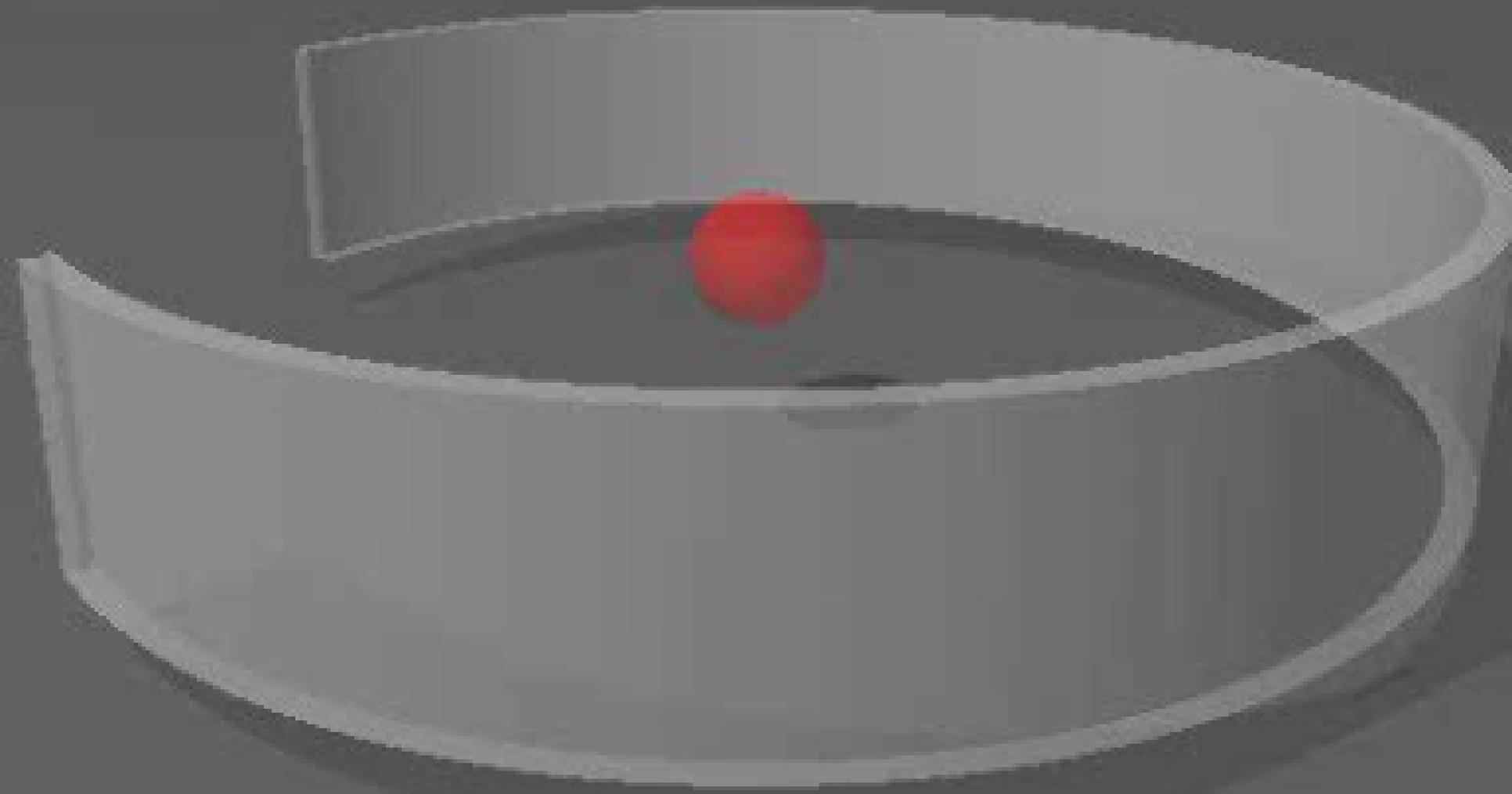
Rutherford-Streuung

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

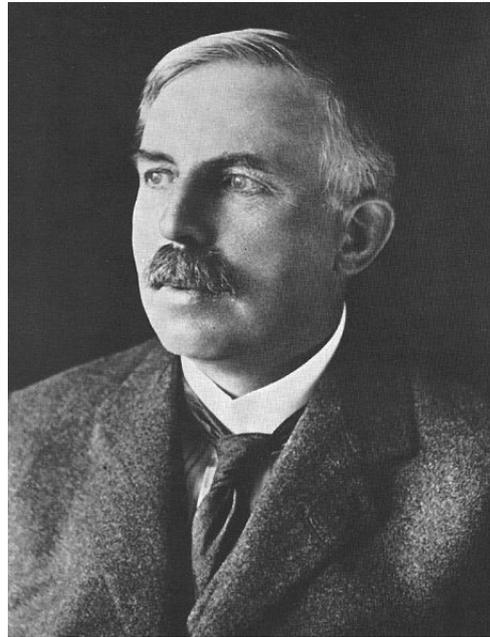


1911: Rutherford, Geiger und Marsden: Schiessen α -Teilchen auf Goldatome (dünne Folie) und messen die Streuwinkel

Erwartung: Die meisten α -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."

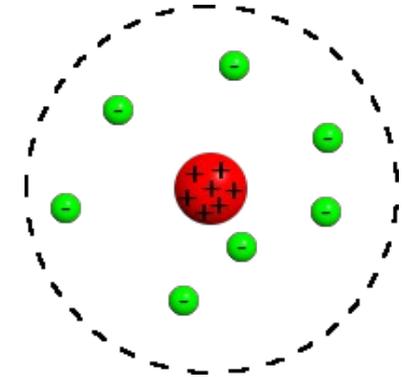
Entdeckung des Atomkerns

Erklärung von Rutherford:

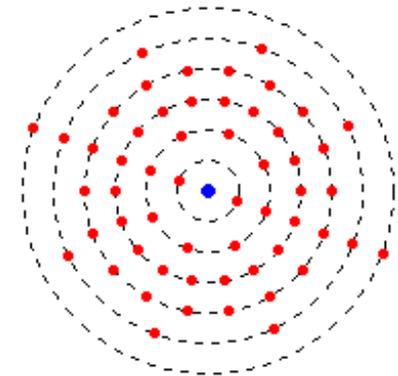
Teilchen stossen auf ein massives Zentrum im inneren der Atome.

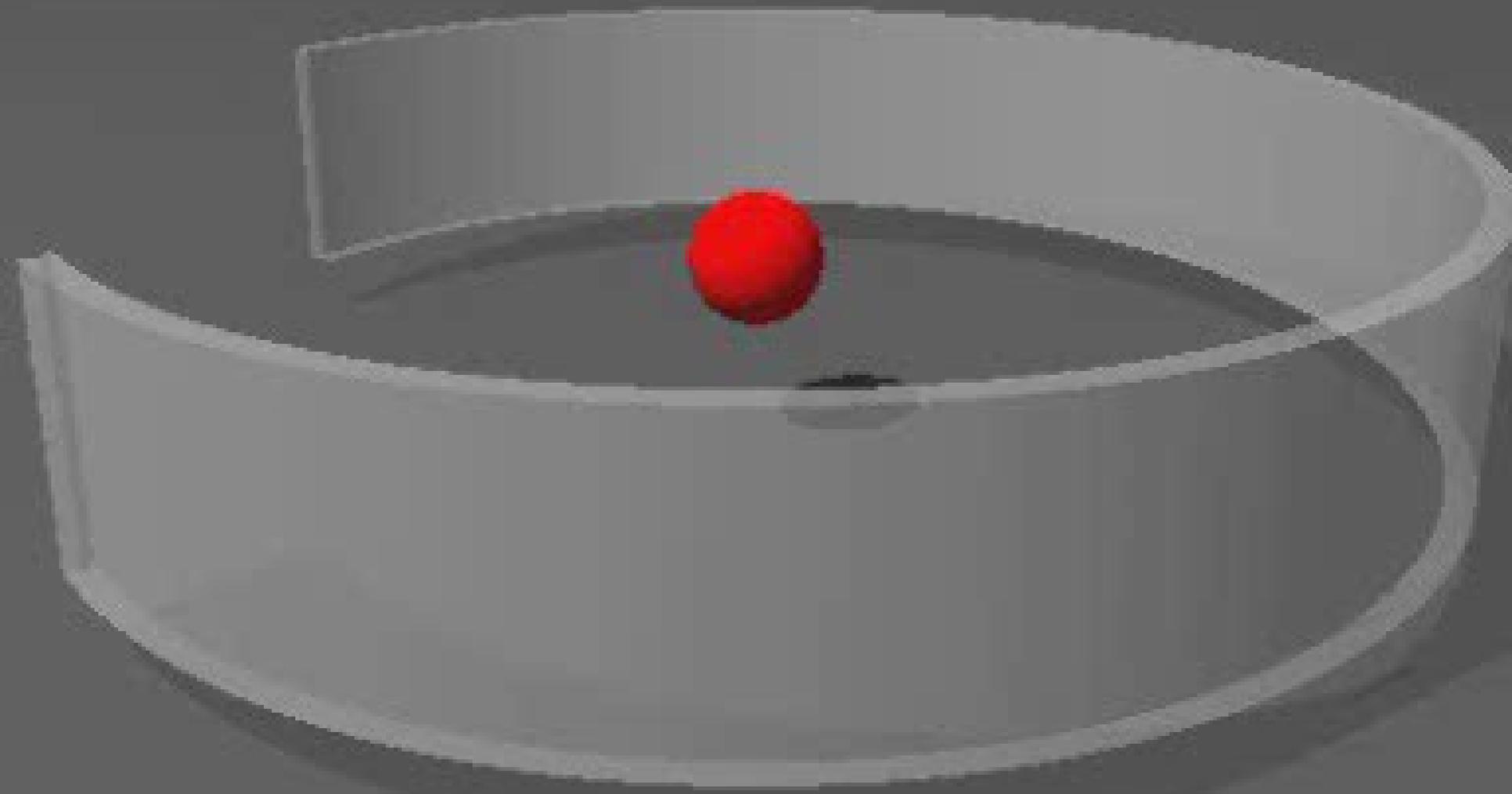
Neues Atommodell:

Positiv geladener Atomkern ist von negativen Elektronen umgeben.



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





Energie des Geschosses - Auflösungsvermögen

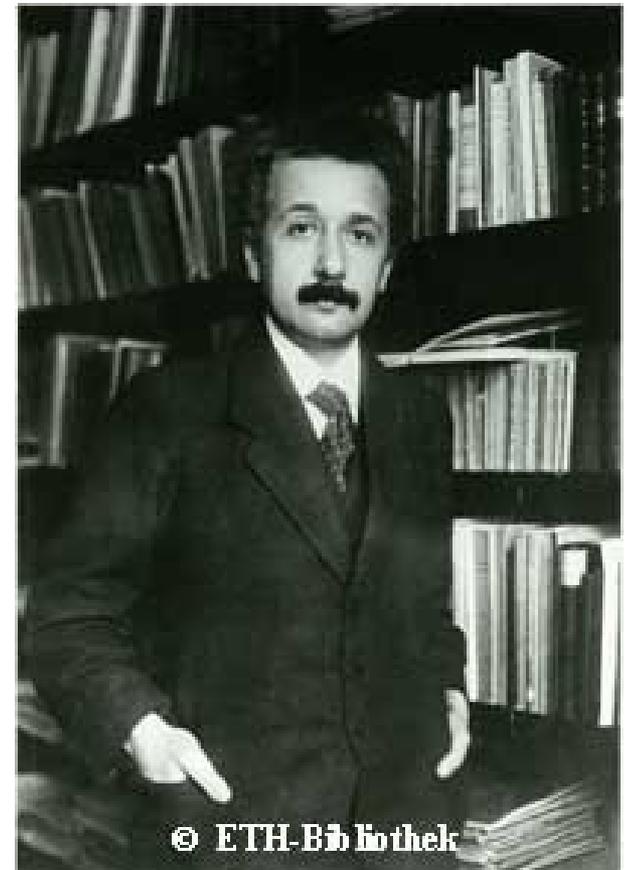
$$\begin{aligned} &\text{Kleinste sichtbare Distanz} \\ &= \\ &200 \text{ fm} / \text{Energie [MeV]} \end{aligned}$$

- 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



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

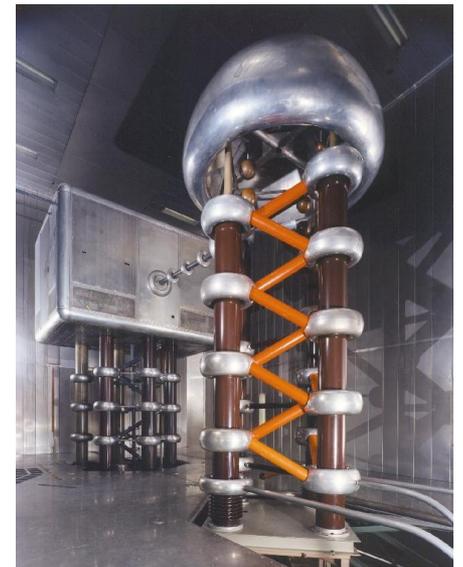
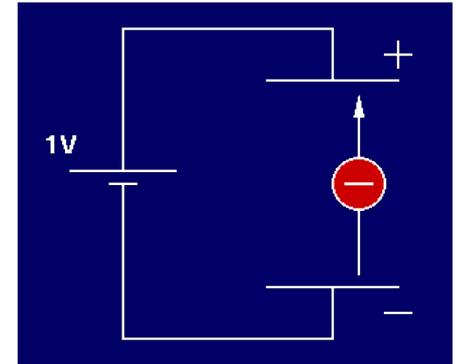


Protonen: Schiesse Elektronen auf Wasserstoff
H⁻-Ionen
Beschleunige im elektrischen Feld
Strippe beide Elektronen weg
(durch Folie schießen)
Oder: H-Atome mit elektrischem Feld
auseinanderreißen

II. Teilchenbeschleuniger

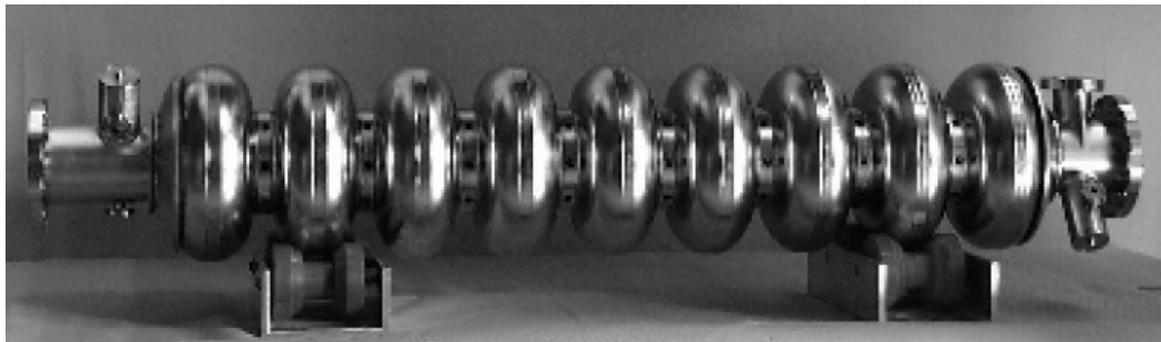
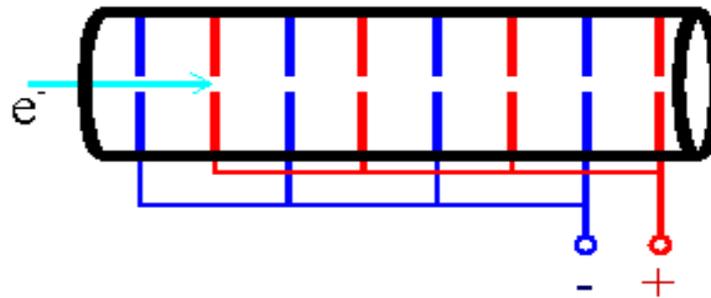
Teilchen beschleunigen: Statische Spannung

- 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 keV
- Höhere Spannung: Durchschlag

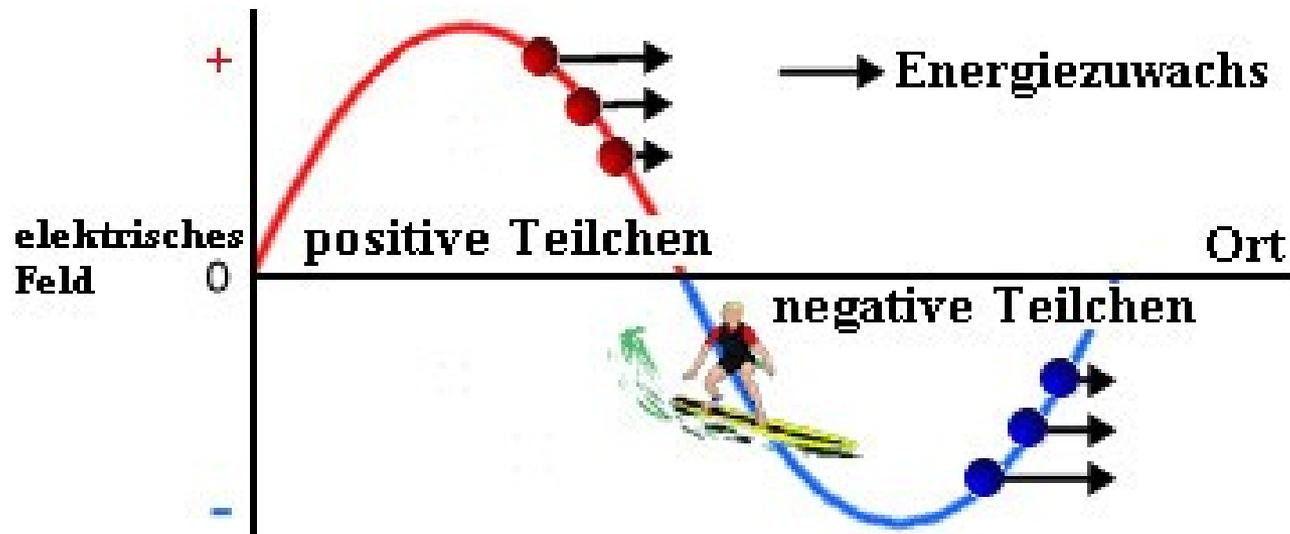


Wechselspannung:

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

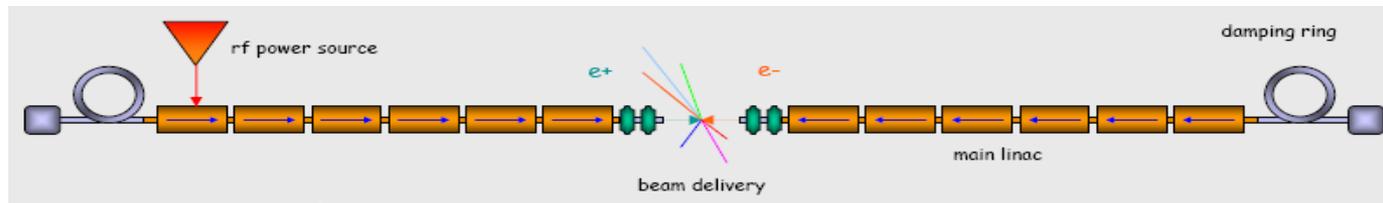


Wechselspannung: Teilchen in Paketen (Bunches)



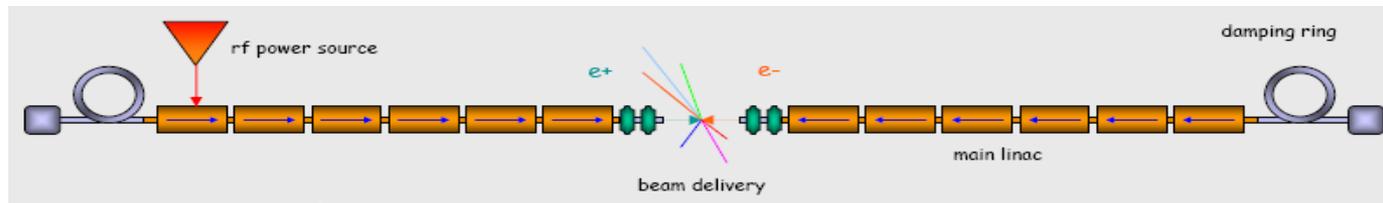
Linearbeschleuniger

- 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



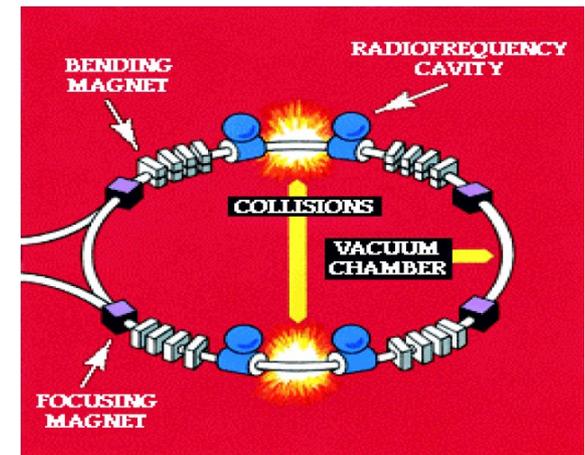
Linearbeschleuniger

- 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

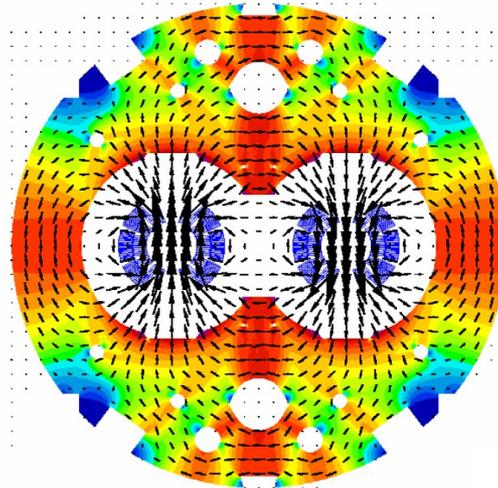
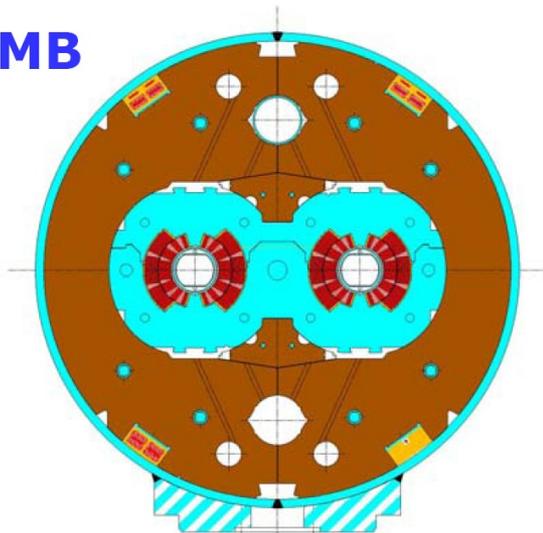
- Teilchen haben mehrere Chancen, zu kollidieren
- Teilchen können Runde für Runde beschleunigt werden
- Teilchen verlieren in jeder Kurve Energie
- Brauche viele Magnete



Teilchenstrahlen steuern: Magnete

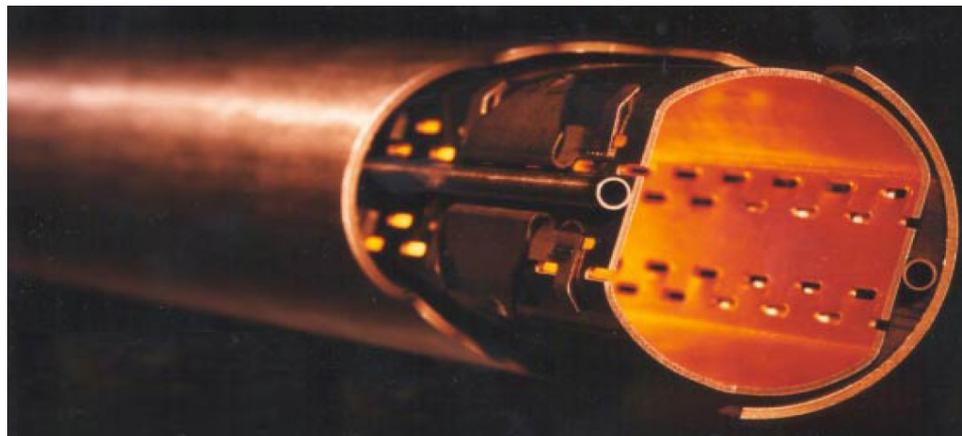
- Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt
- Damit können wir sie im Kreis herum lenken und die Strahlen bündeln
- Je grösser die Energie der Strahlteilchen, desto stärker müssen die Magnete sein
- Brauche supraleitende Magnete → Kühlung

MB



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
- Länge von mehreren Kilometern



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

Verschiedene Beschleuniger

- Elektron-Positron-Collider

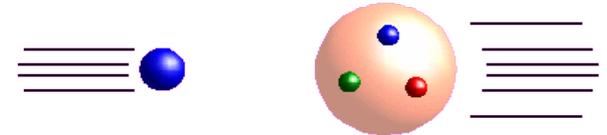
SLAC Stanford, 50 GeV Strahlenergie

LEP Genf, 1989-2000,
100 GeV Strahlenergie



- Elektron-Proton-Collider

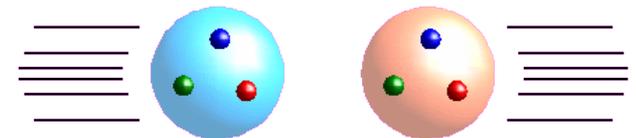
HERA Hamburg, 1990-2007,
27.5 GeV Elektronen, 920 GeV Protonen,



- Hadron-Hadron-Collider

SPPS Genf, 1981-1993 (läuft auch heute noch)
Proton-Antiproton, 400 GeV Strahlenergie

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



LHC Genf, ab 2008,
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

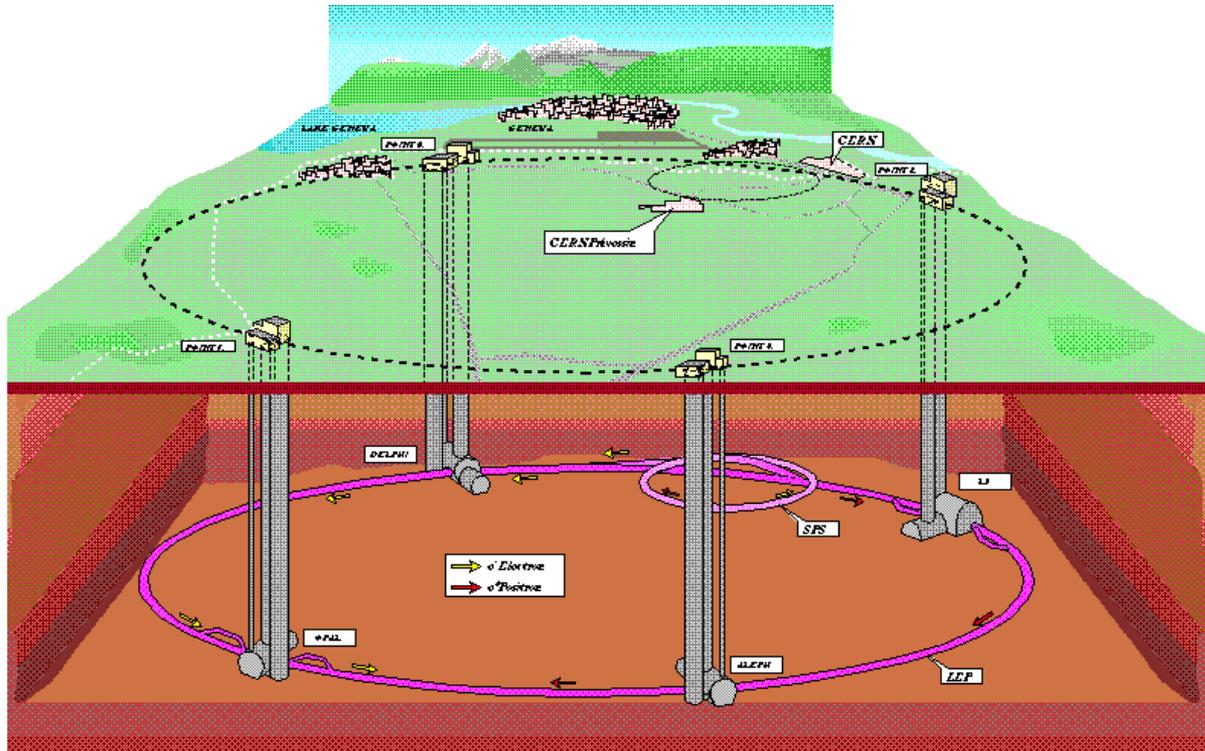


Von LEP...

Large Electron Positron Ring (1989-2000)

Energie: 100 GeV pro Strahl

27 km langer Tunnel, 100 m unter der Erde

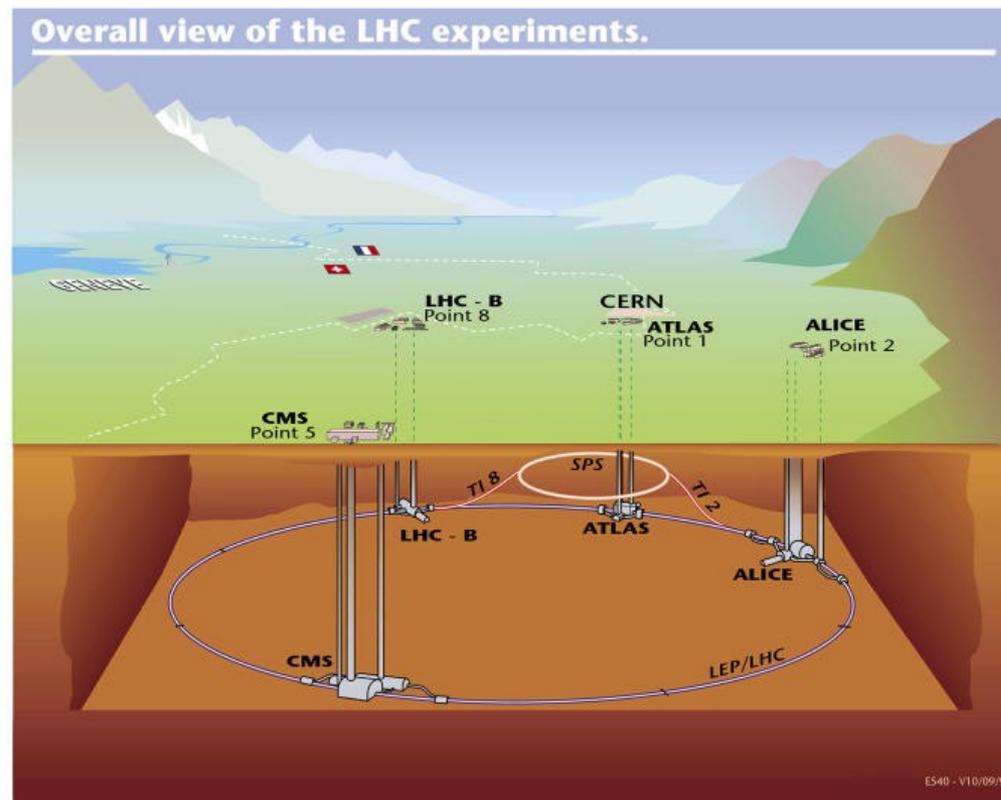


... zu LHC

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 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



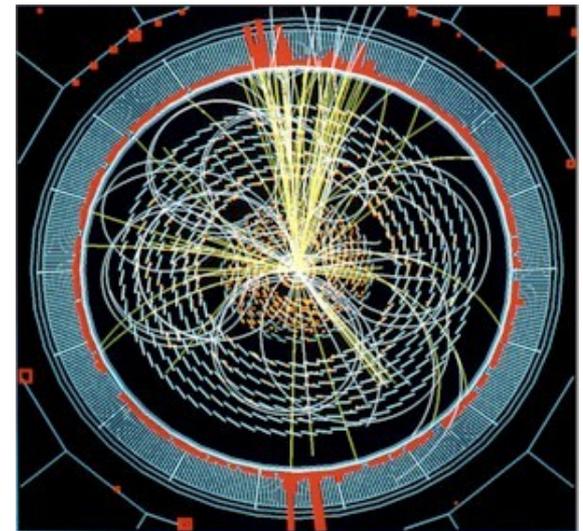
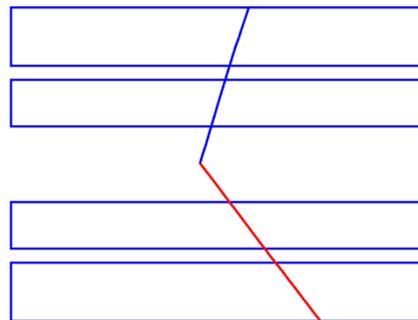
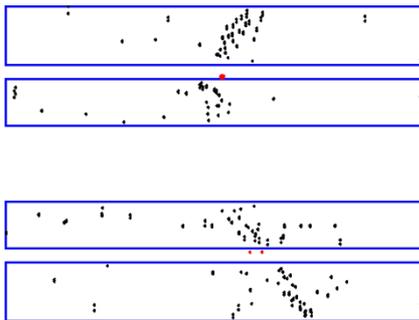
III. Detektoren

Was wollen wir messen?

- Wir produzieren / streuen Teilchen mit:
 - Typ
 - Ladung (+,0,-)
 - Impuls
 - Geschwindigkeit
 - 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

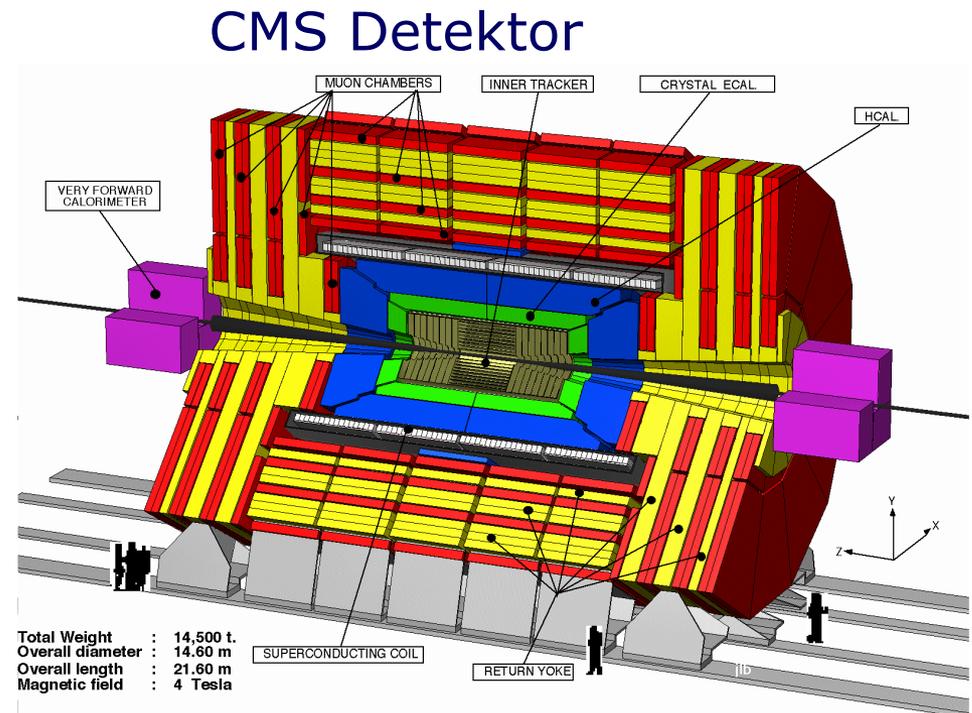
Was heisst eigentlich messen?

- Jede Kollision ist ein Event
- Teilchen die durch den Detektor fliegen, erzeugen elektrische Signale
- Diese werden digitalisiert und gespeichert
- Computerprogramme (Rekonstruktion) versuchen in den Signale die Spuren von Teilchen zu finden
- Mit diesen rekonstruierten Objekten macht man dann eine Analyse, d.h. versucht damit etwas über die Naturgesetze rauszufinden



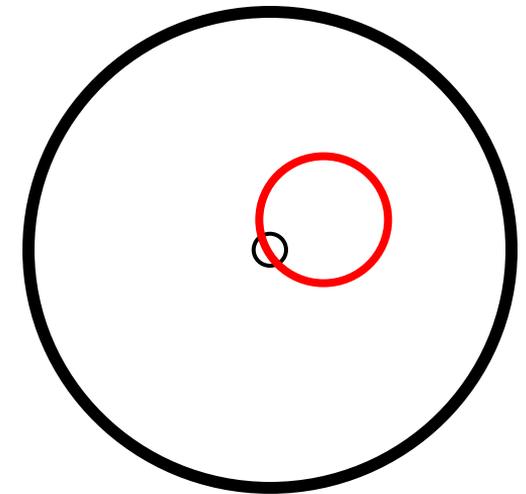
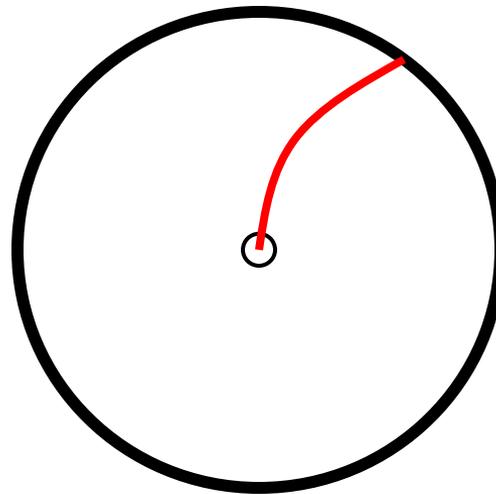
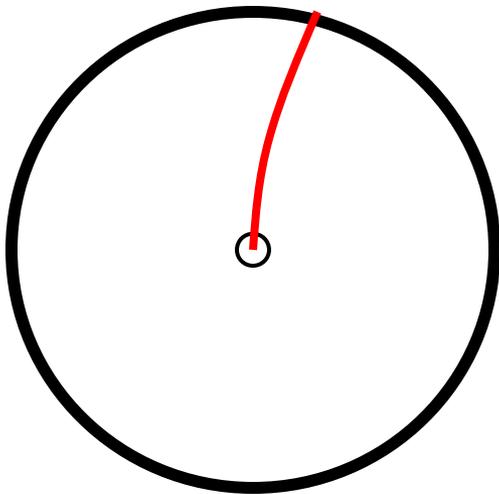
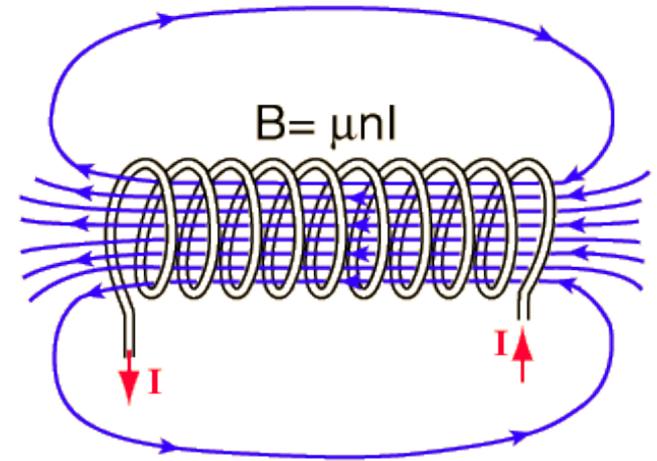
Zwiebelschalen

- 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



Innen: Spurdetektoren

- Messe Impuls (Vektor) der geladenen Teilchen
- Flugbahn im Magnetfeld:
Je kleiner der Impuls, desto grösser die Ablenkung

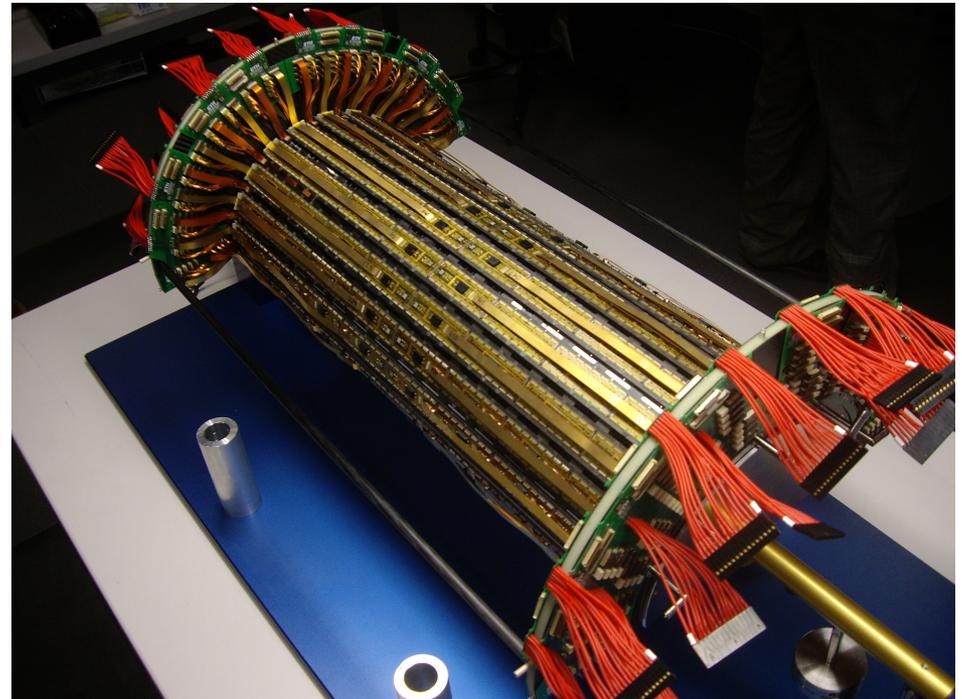
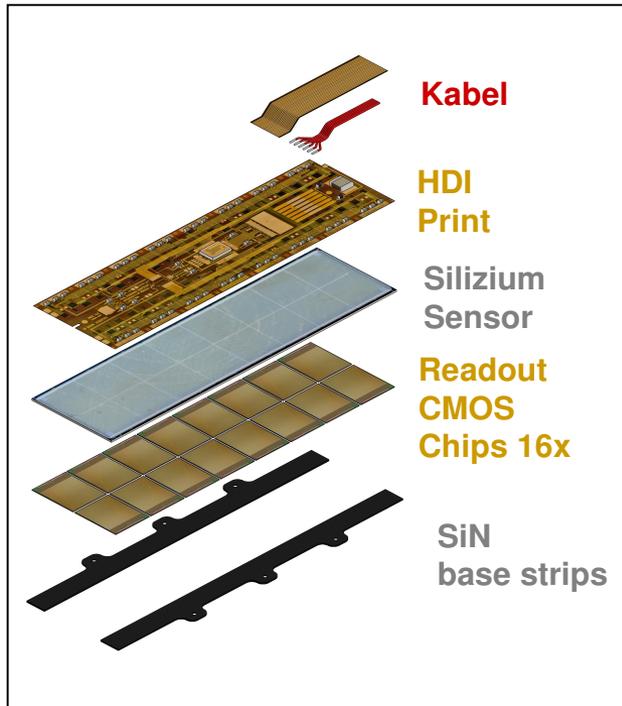


Spurdetektoren

- Geladene Teilchen können beim vorbeifliegen Elektronen aus Atomen rausschlagen (Ionisation)
- Diese können wir mit elektrischem Feld aufsammeln und den entstehenden Strom messen
- Wollen Detektoren aussen wenig stören: Wenig Material
- Sensor: Dünne Siliziumscheiben oder Gas

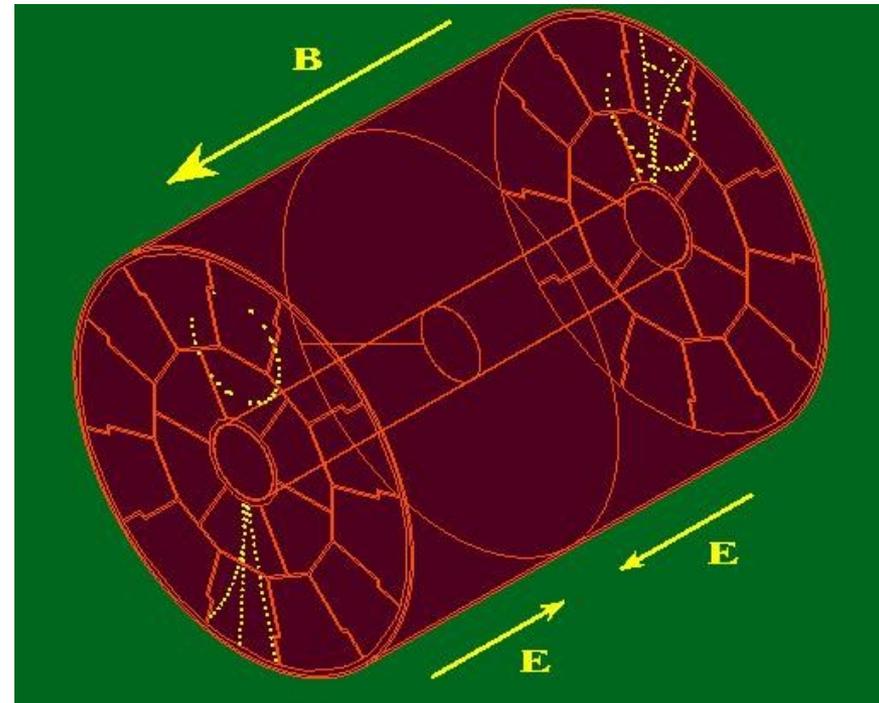
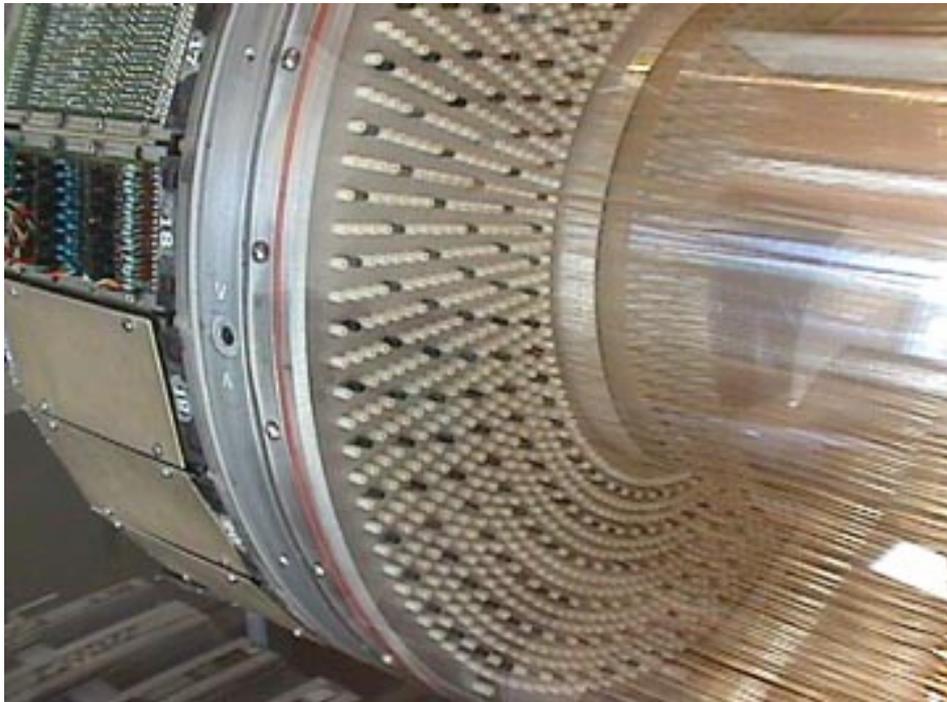
Siliziumdetektoren

Ähnlich wie eine Digitalkamera:
Pixel oder Streifen registrieren durchfliegende Ladung



Spurkammern

- Geladene Teilchen ionisieren Gas
- Ladungen driften in einem elektrischen Feld entweder zu Drähten (Driftkammer) oder zum Ende der Kammer (Time Projection Chamber TPC)

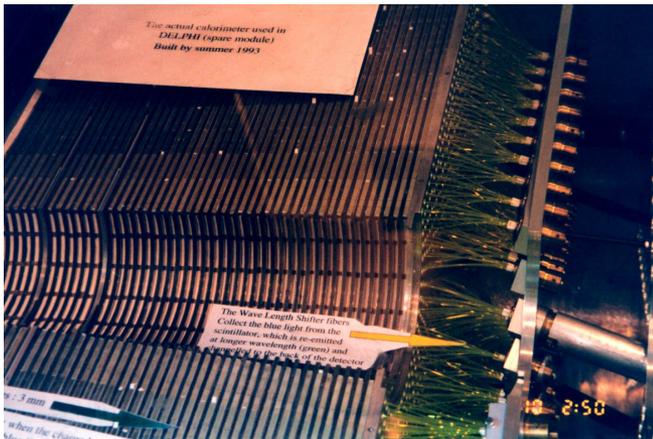


Energien messen

- Stoppe Teilchen und messe Energie die dabei frei wird
- Zwei Designoptionen:

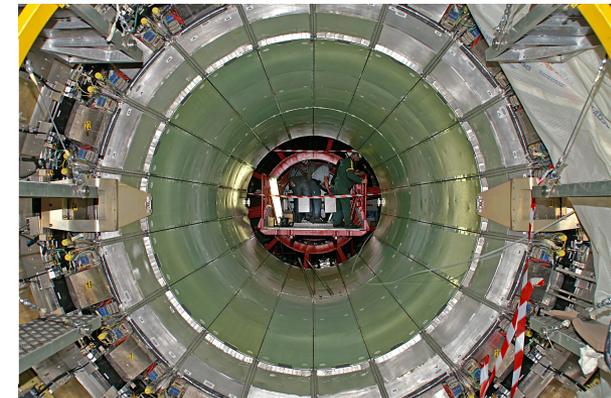
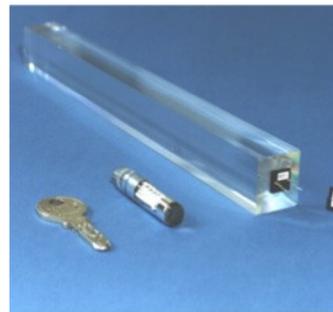
Sampling Calorimeter

Messe, wie viele Schichten ein dichten Materials ein Teilchen durchdringt



Kristallkalorimeter

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



Zwei Arten von Teilchen

Elektromagnetisch
(Elektronen und Photonen)

Wechselwirkung mit Materie:

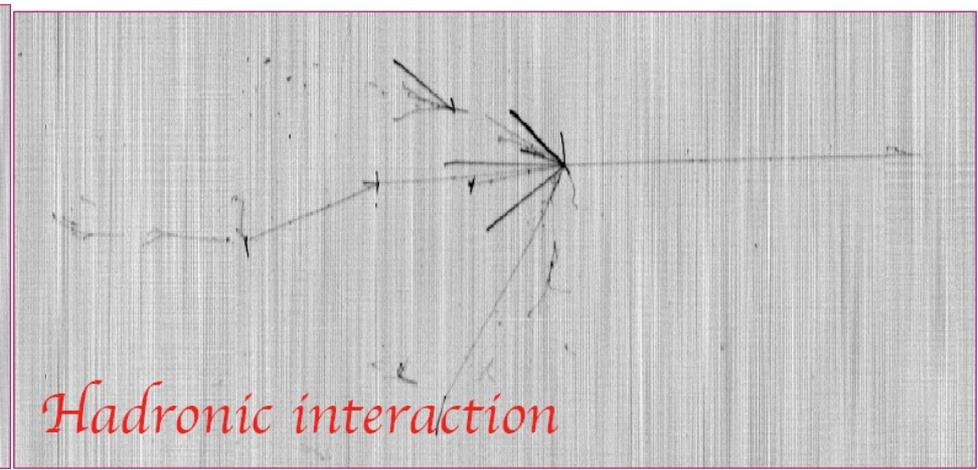
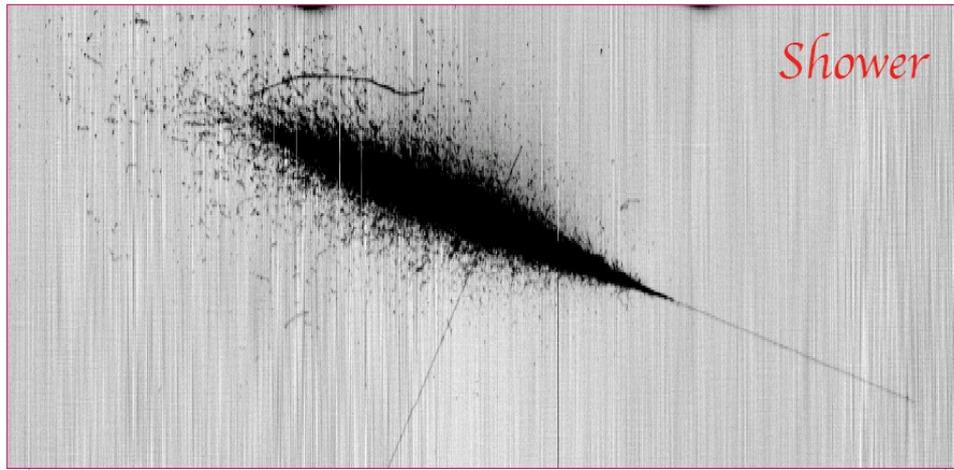
- Elektronen strahlen Photonen ab
- Photonen konvertieren zu Elektron – Positron
- Produzieren schnell sehr viele Teilchen
- Kurze, heftige Schauer

Hadronisch
(bestehen aus Quarks)

Wechselwirkung mit Materie:

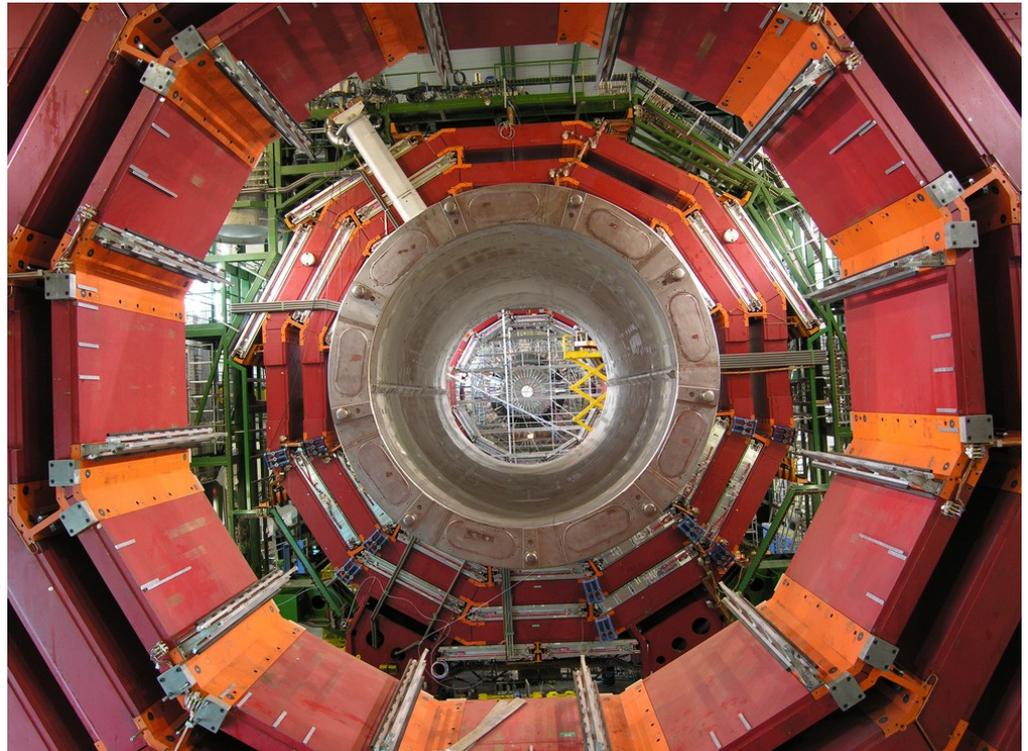
- Stösse mit Atomkernen produzieren mehr Hadronen
- Tiefe, dünnere Schauer

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



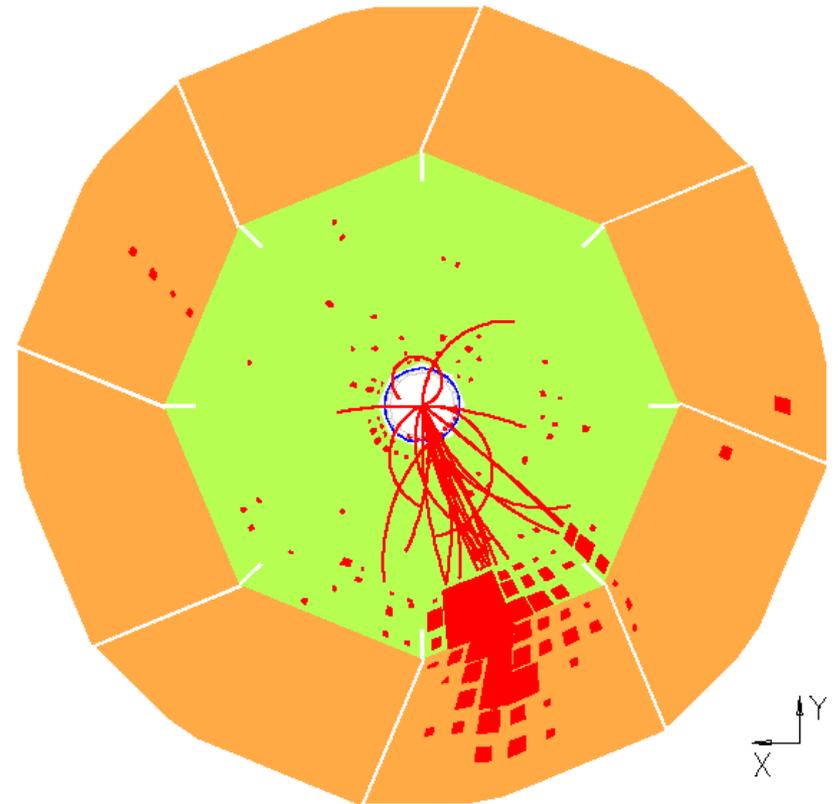
Myonen

- 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

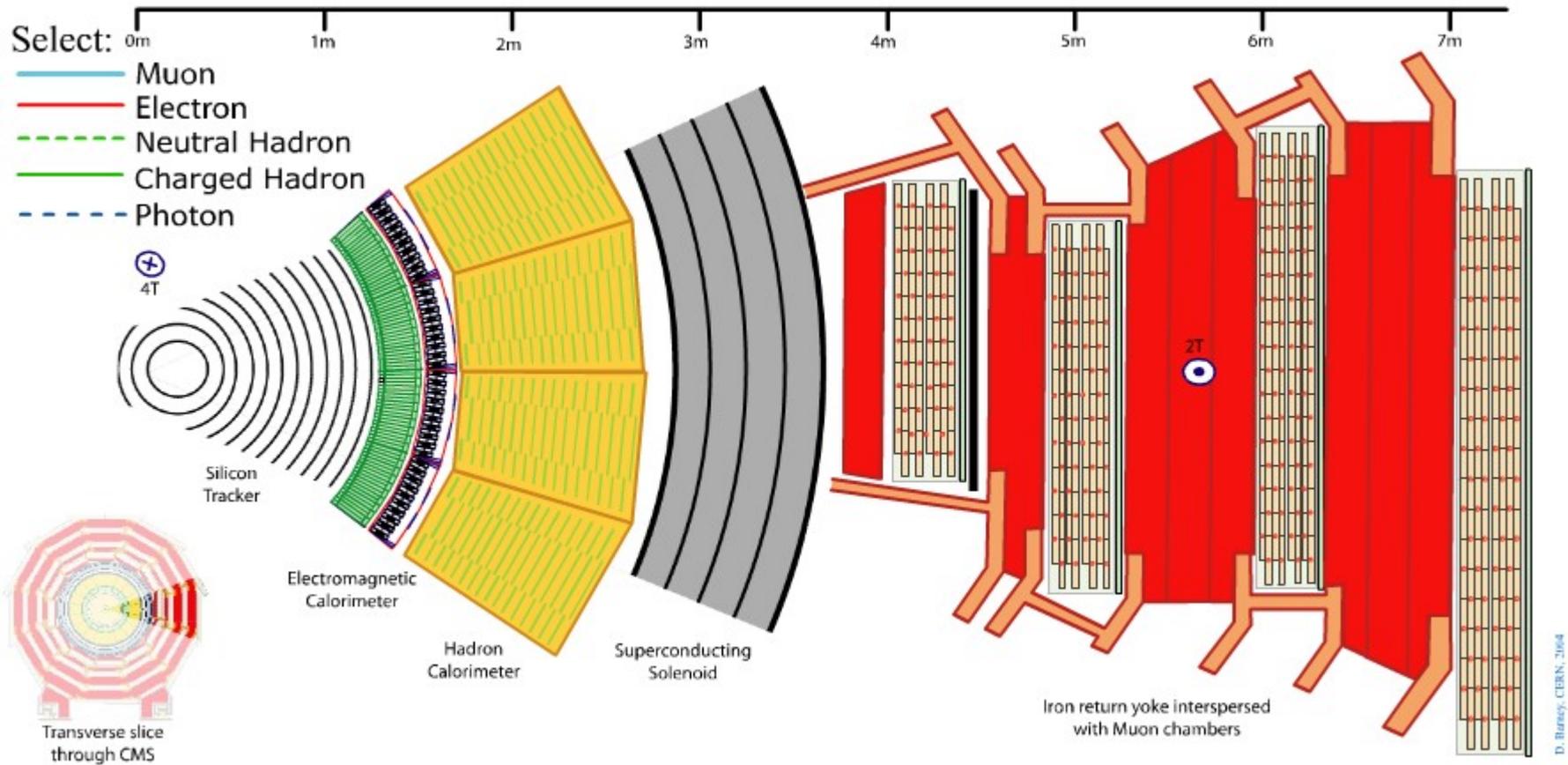


Neutrinos

- 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



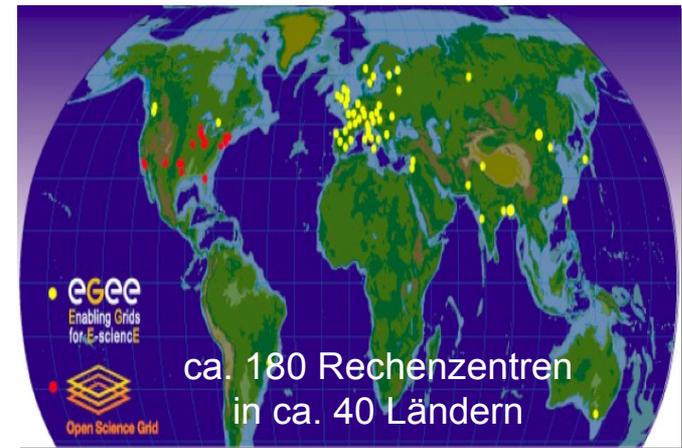
Alle Puzzleteilchen zusammen



Datenraten und Computing

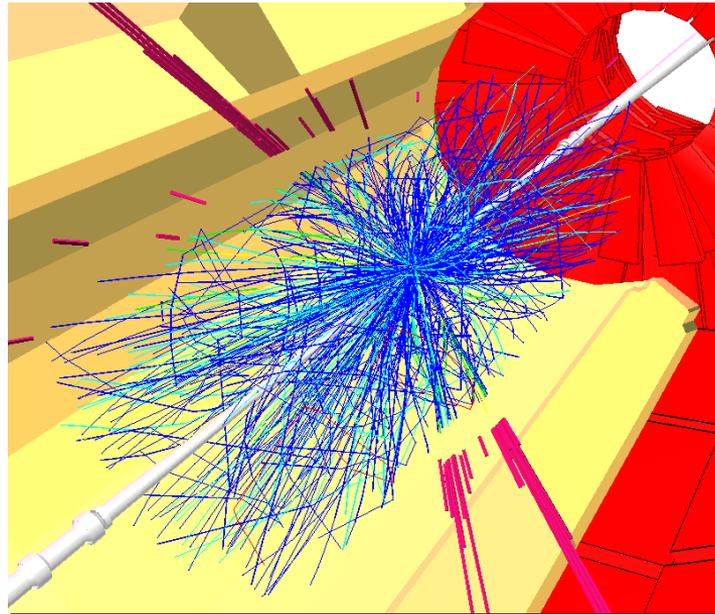
- LEP: 2 Ereignisse/s à einige KB
- LHC: 100 Ereignisse/s à 1 MB
TB pro Tag!
Mehr als 1 DVD pro Minute
- Brauche insgesamt PB (10^{15} B)
an Speicher
- Brauche „beliebig viel“
Prozessor-Power:

Grid: Schalte Computer aller
beteiligter Institute zusammen



Ausblick

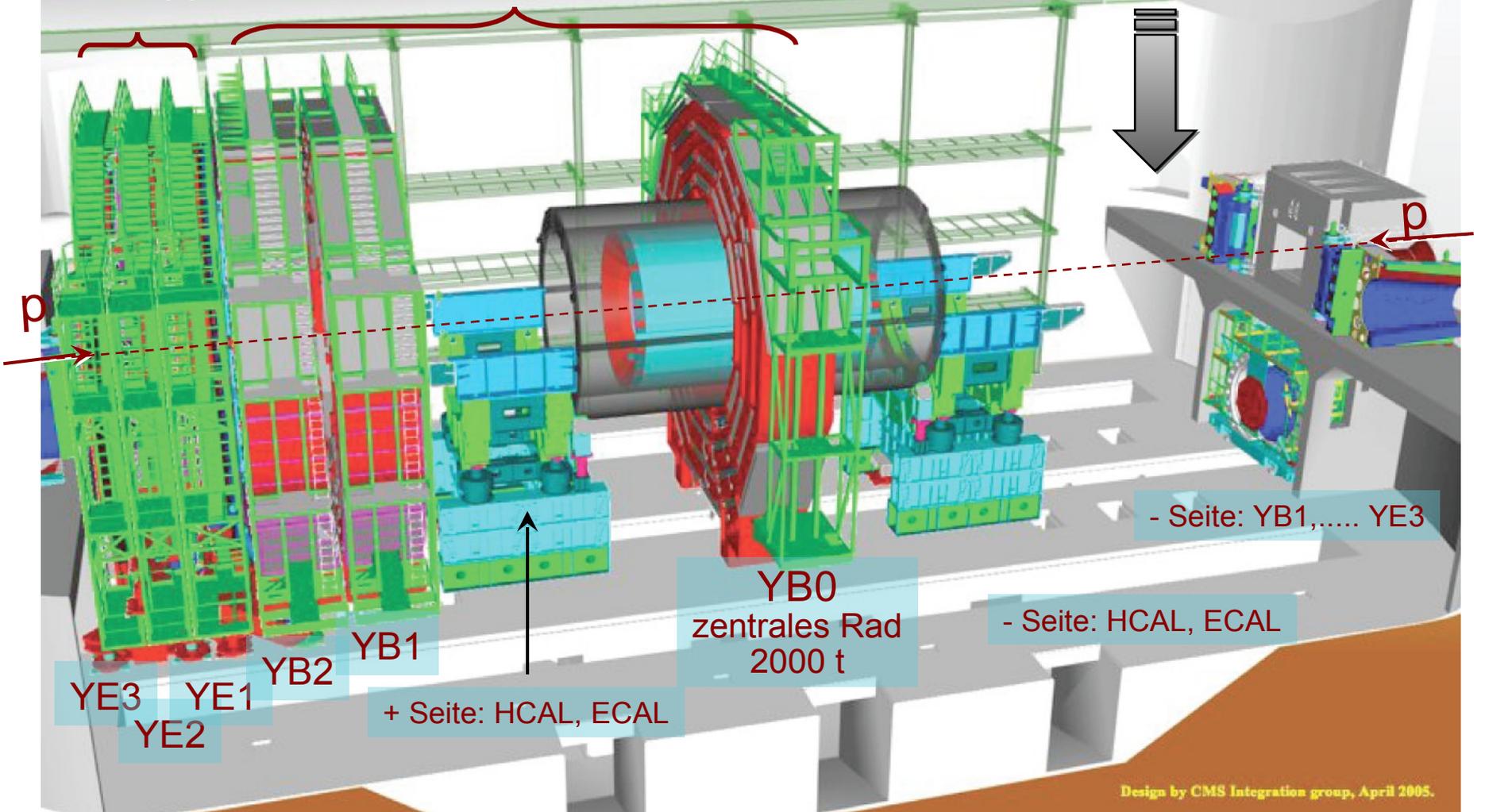
- Der Beschleuniger LHC und die Experimente sind in den letzten Vorbereitungsphasen
- Messungen beginnen in diesem Jahr...
- Erhoffen uns Antworten auf die offenen Fragen der Teilchenphysik
- Wir dürfen gespannt sein...



Endkappen

Barrel Räder

Schacht



p

p

- Seite: YB1,..... YE3

YB0
zentrales Rad
2000 t

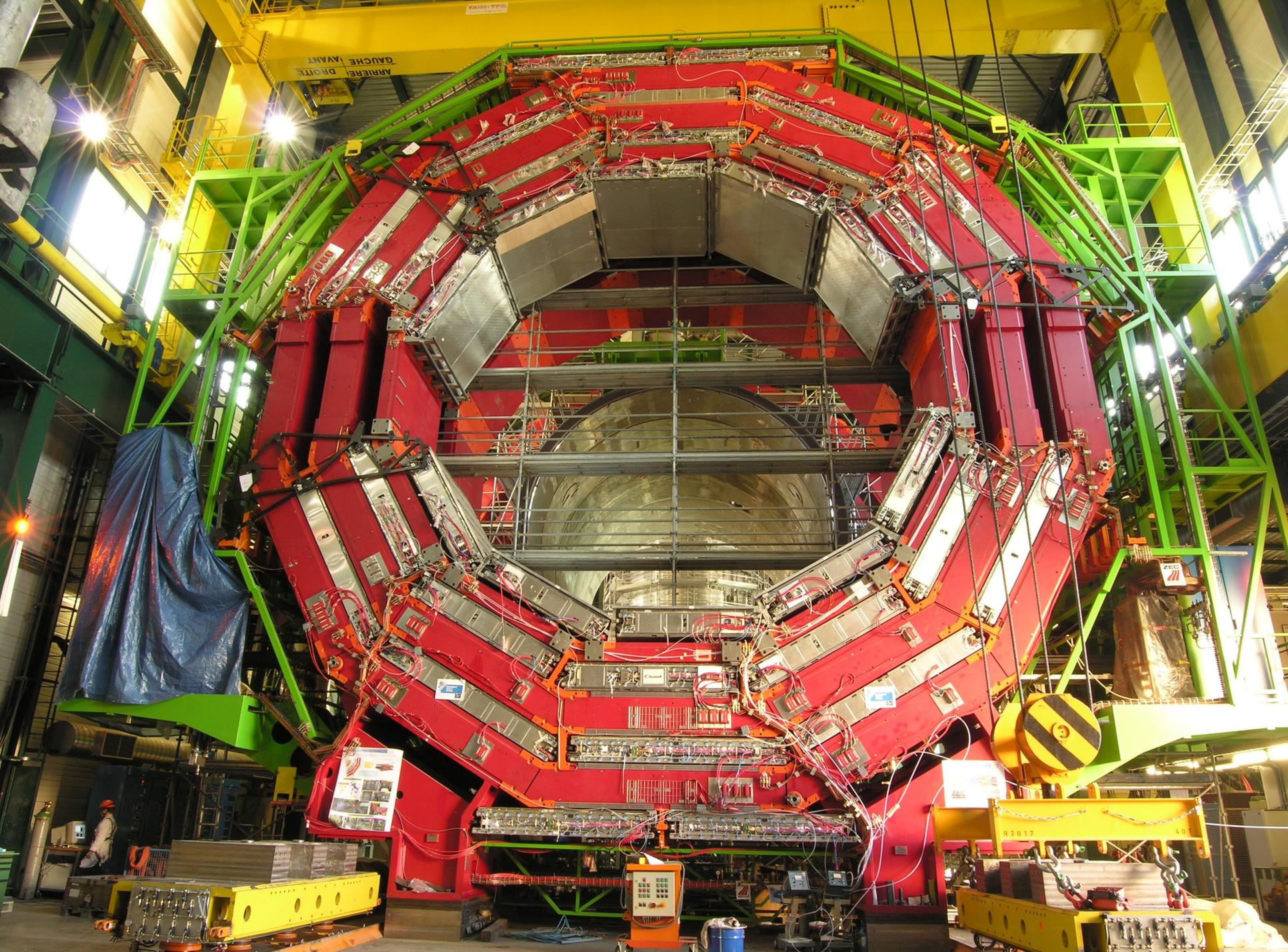
- Seite: HCAL, ECAL

YE3
YE1
YE2

YB2

YB1

+ Seite: HCAL, ECAL



ARRIÈRE DROITE
GAUCHE AVANT

R2017 40

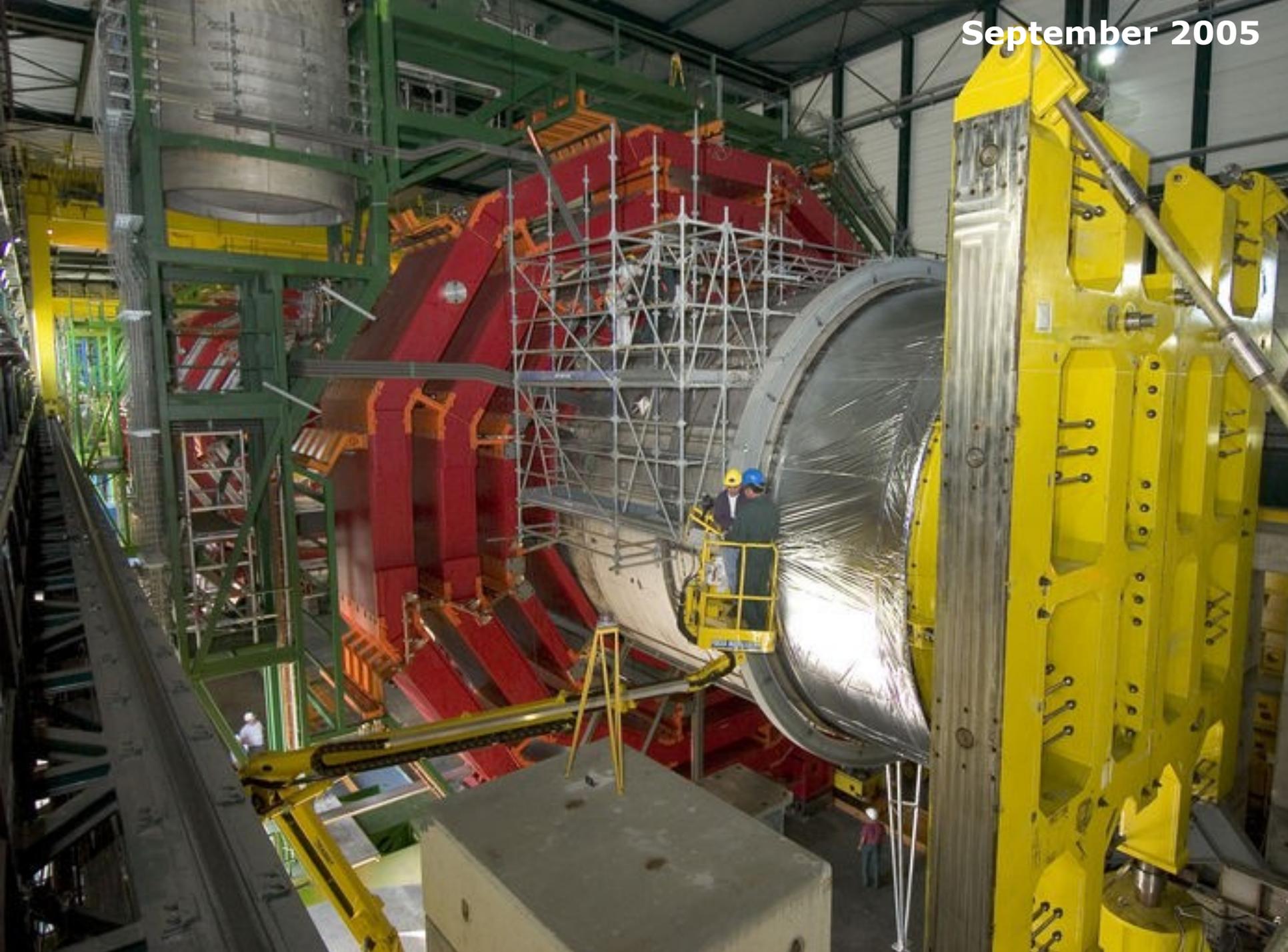
September 2005



September 2005



September 2005



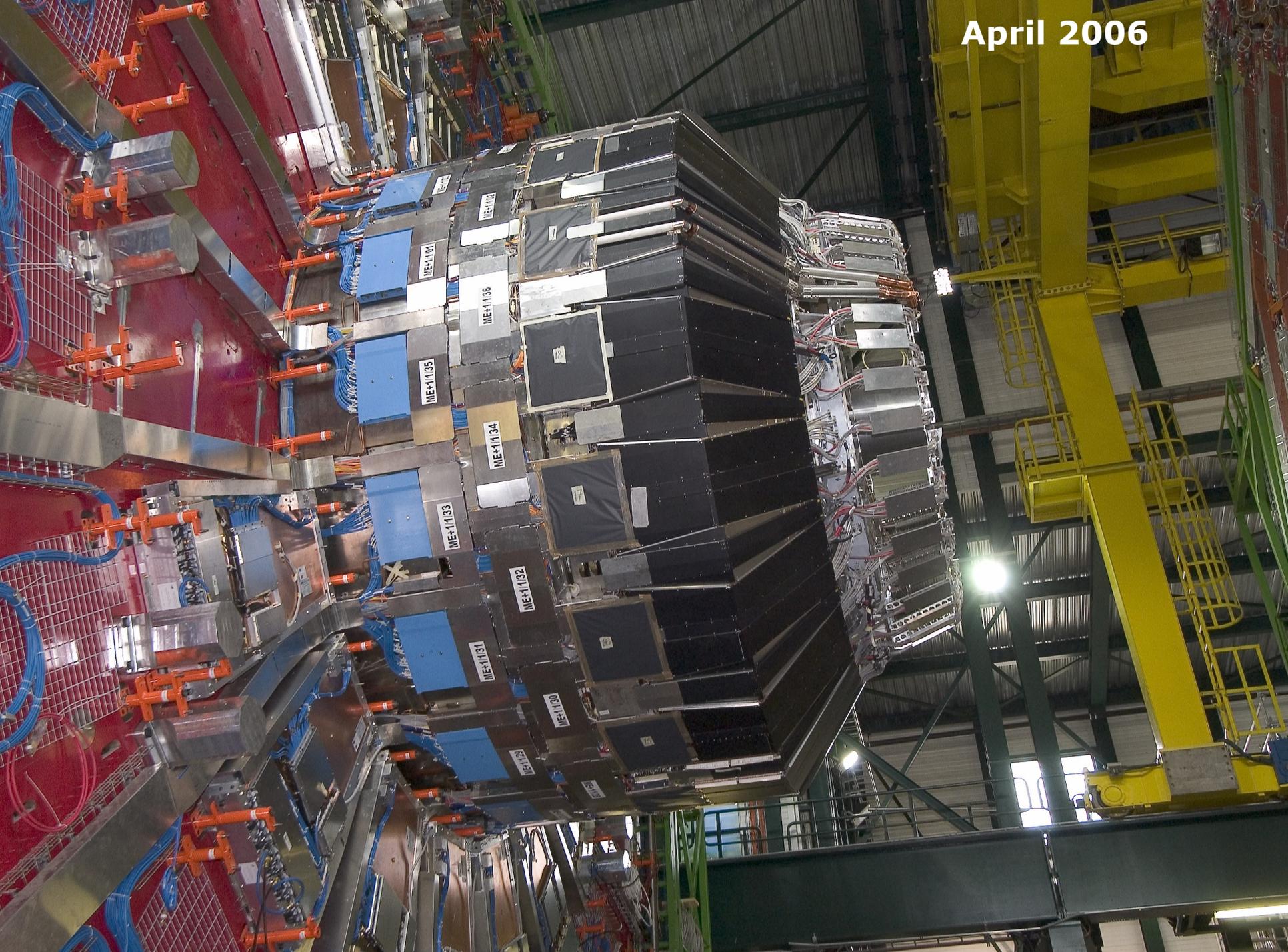
April 2006



April 2006



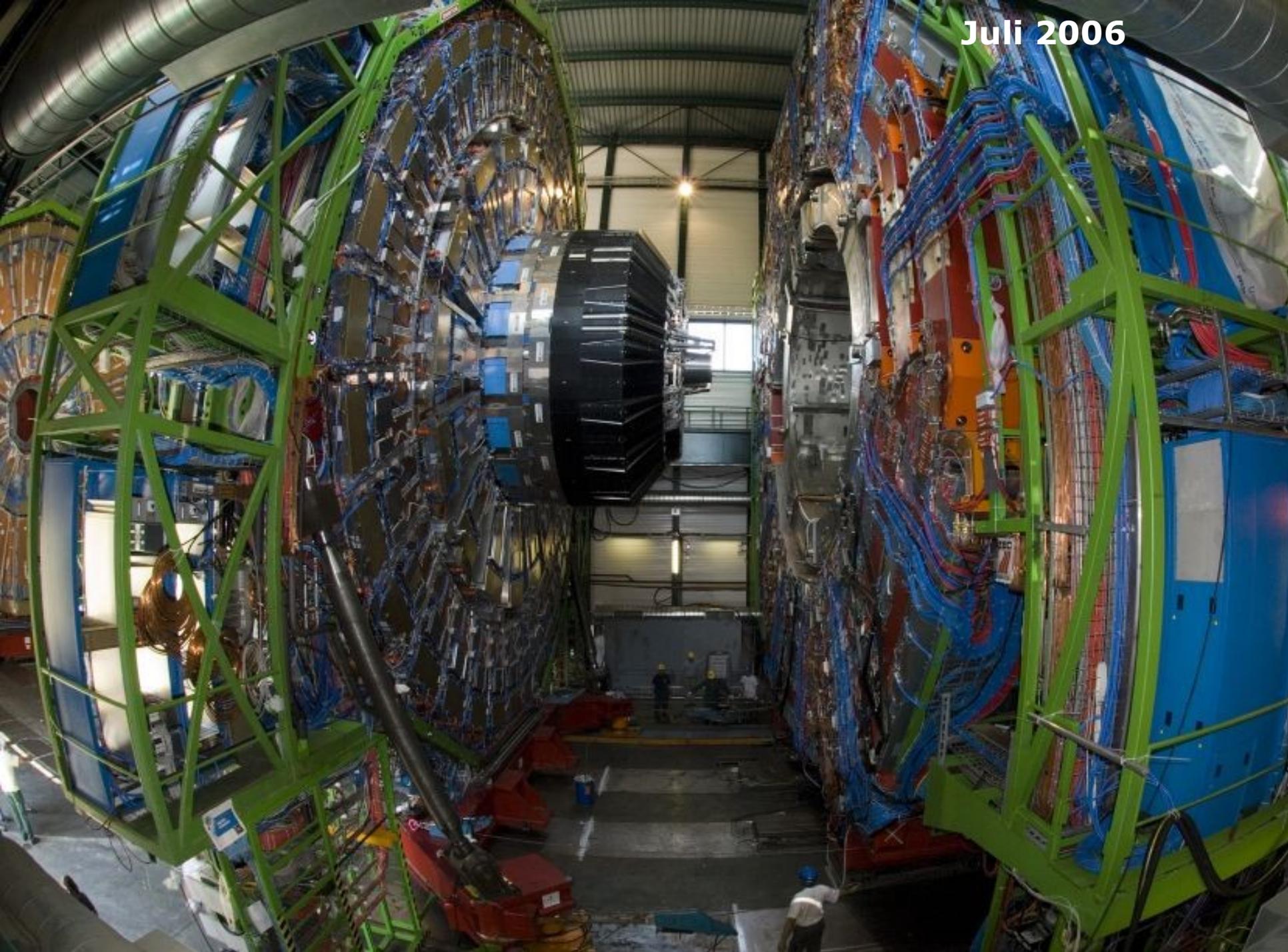
April 2006



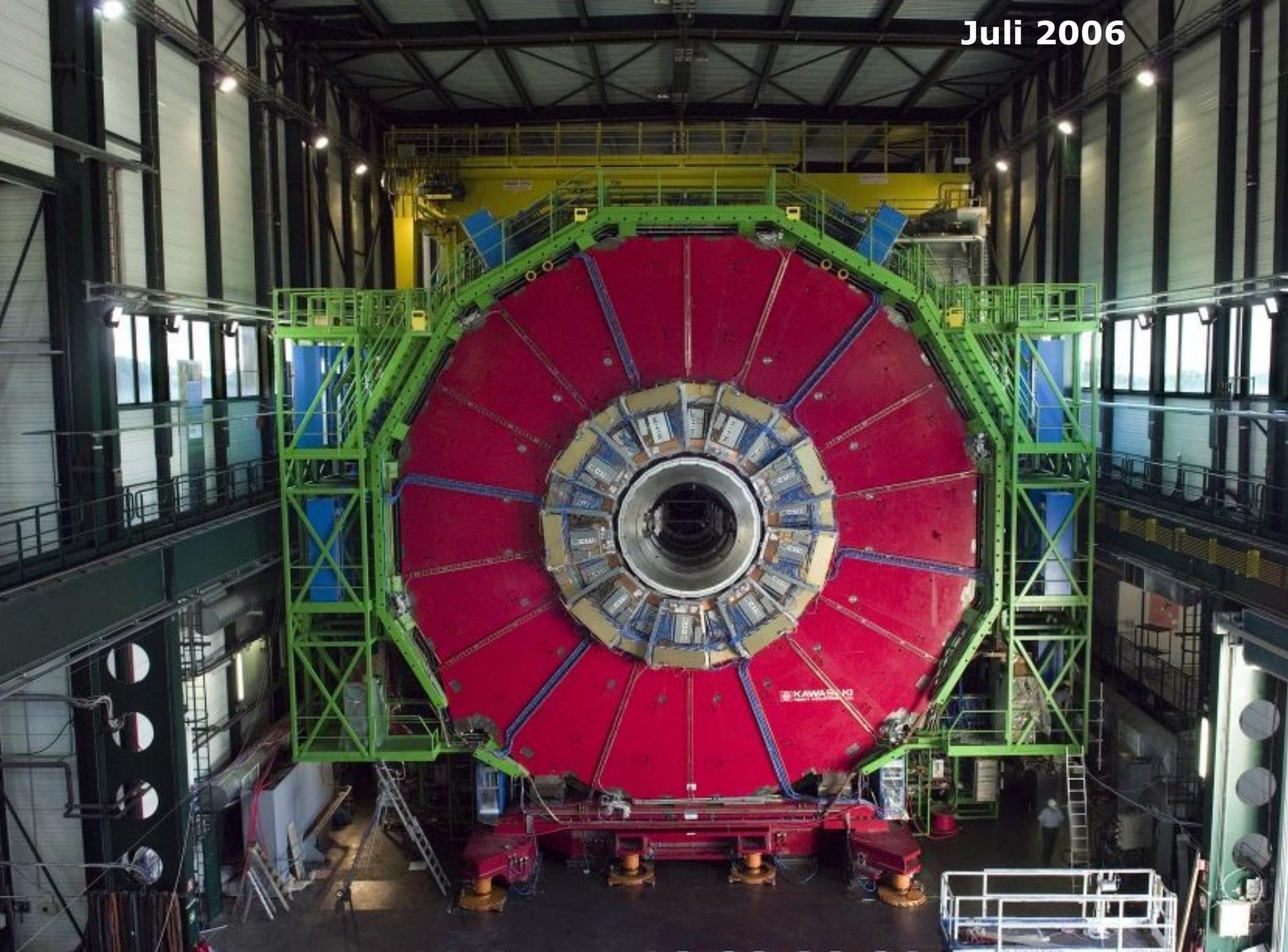
Juli 2006

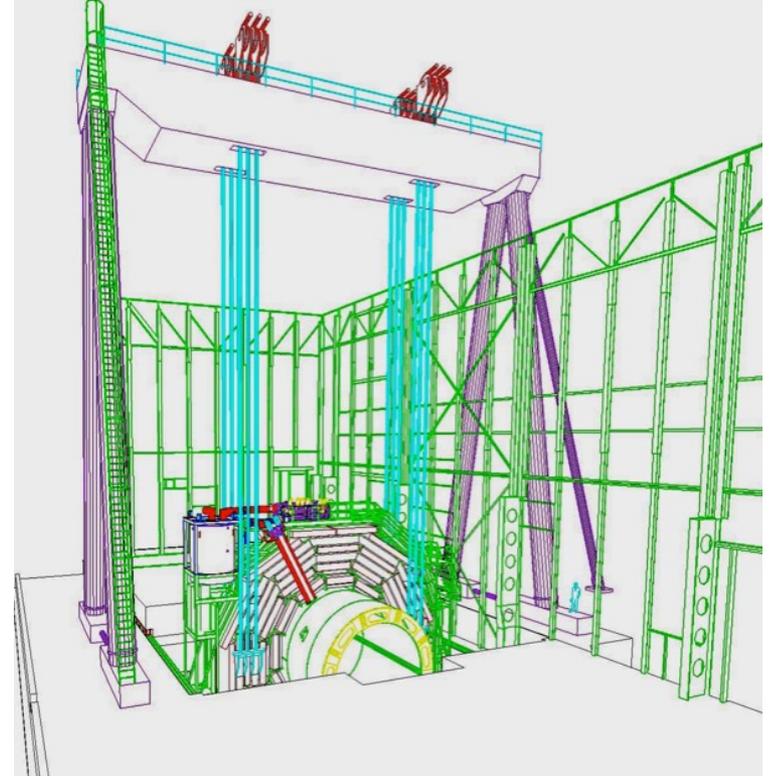
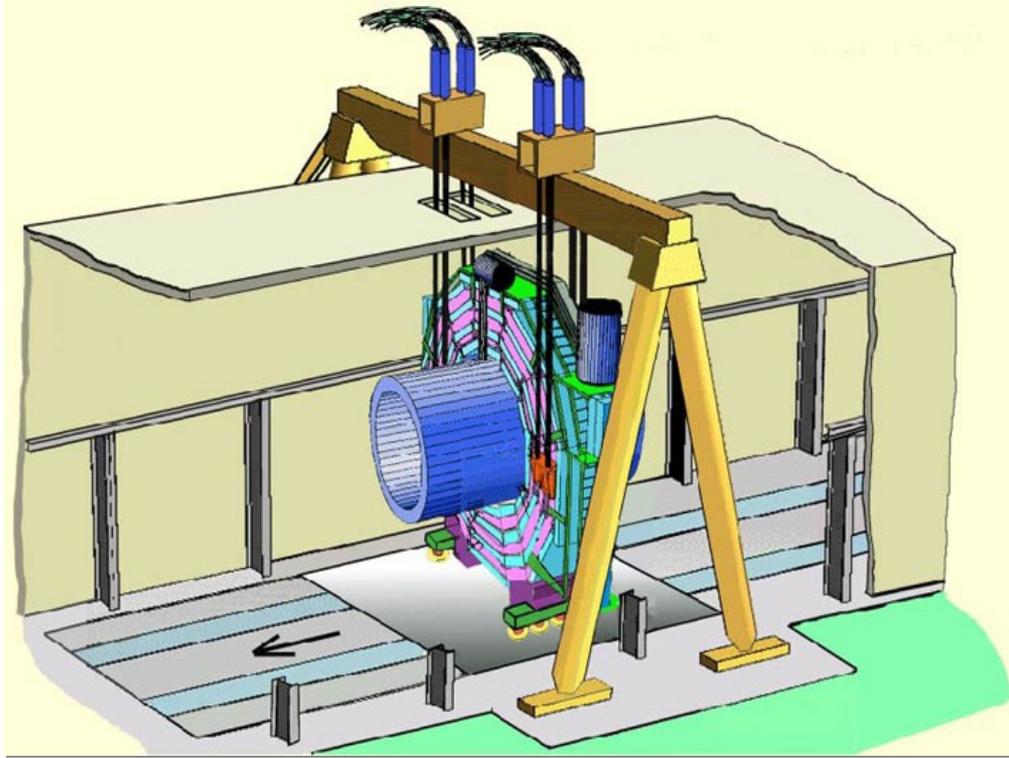


Juli 2006



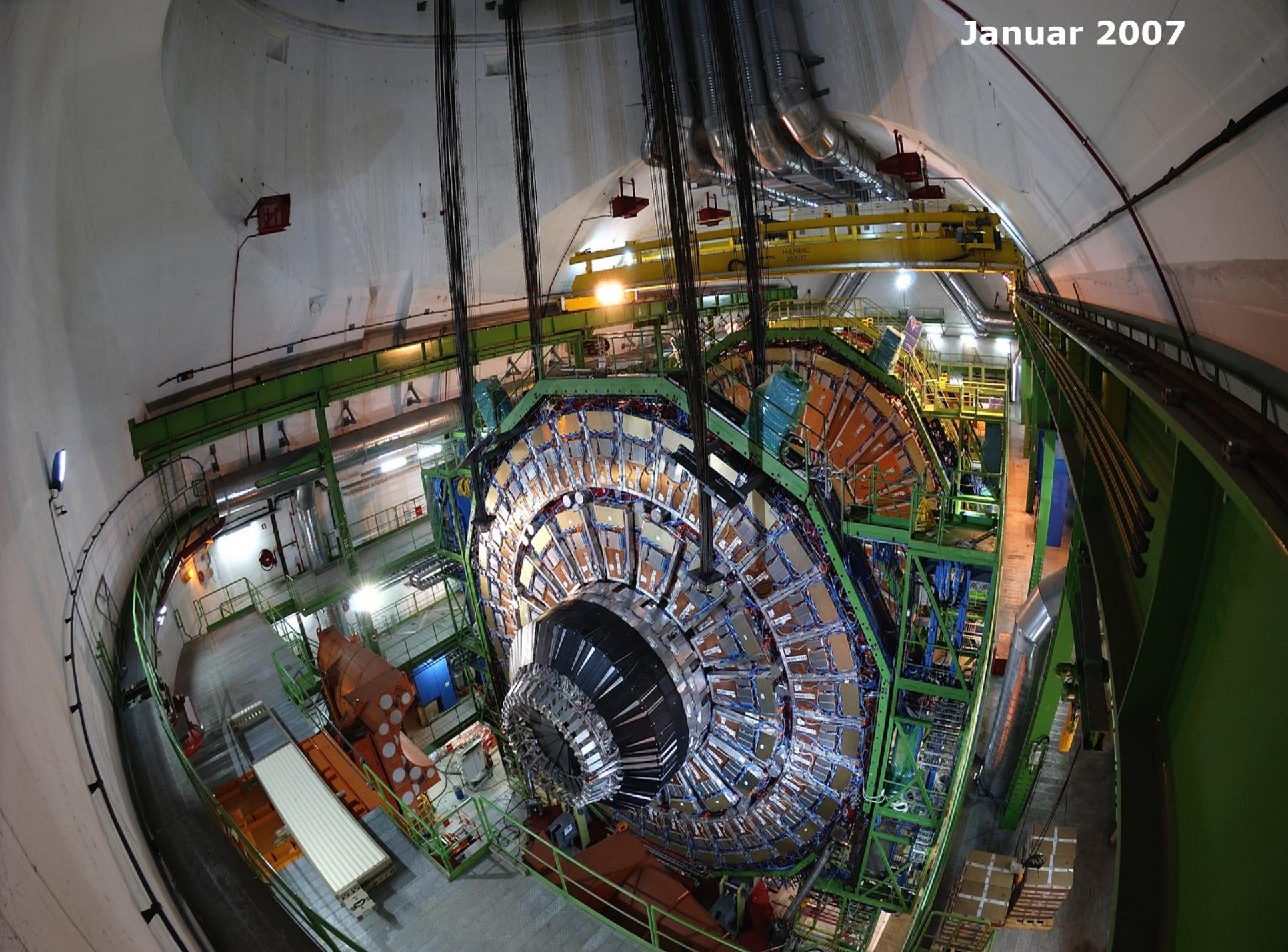
Juli 2006



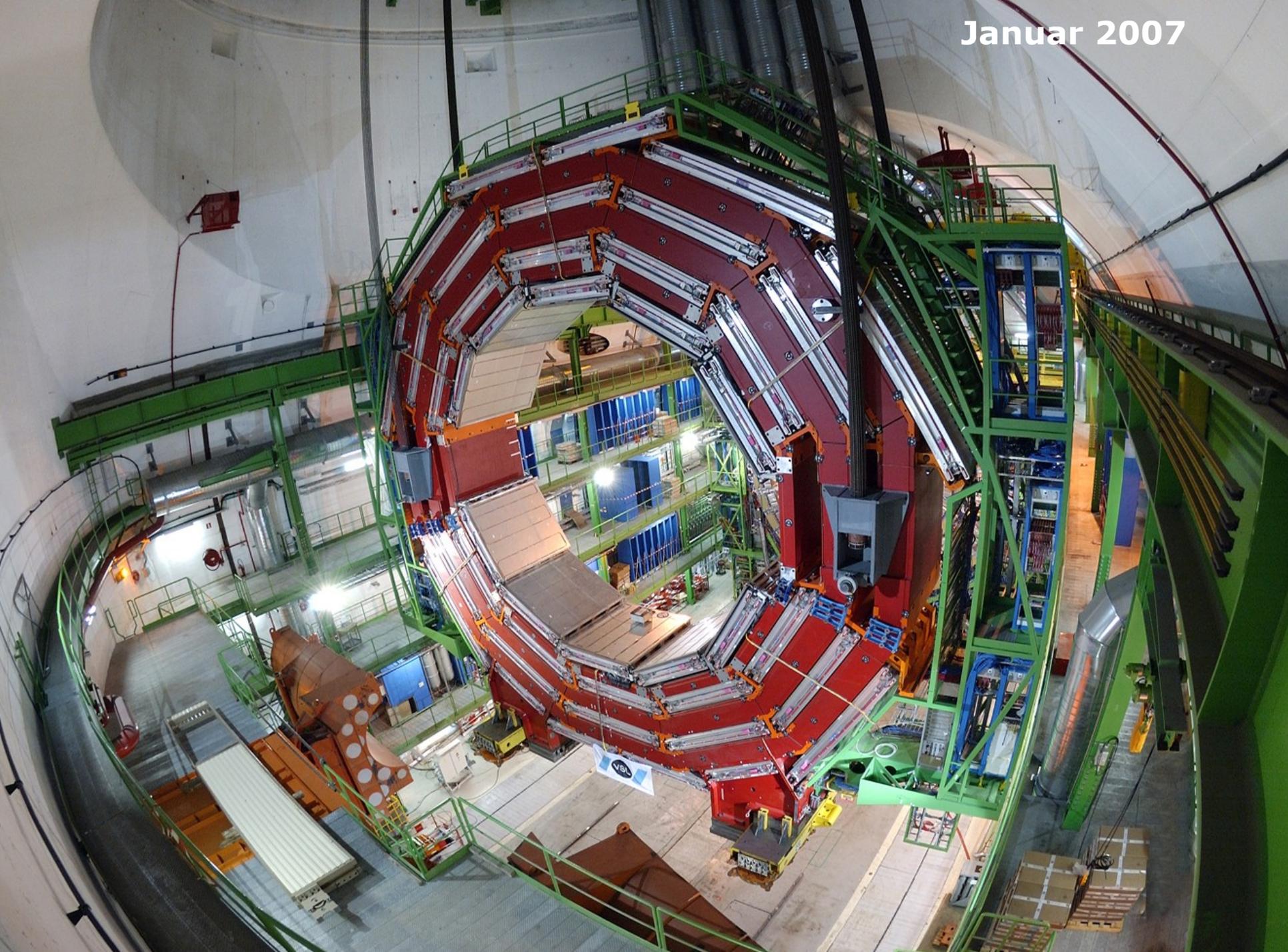




Januar 2007



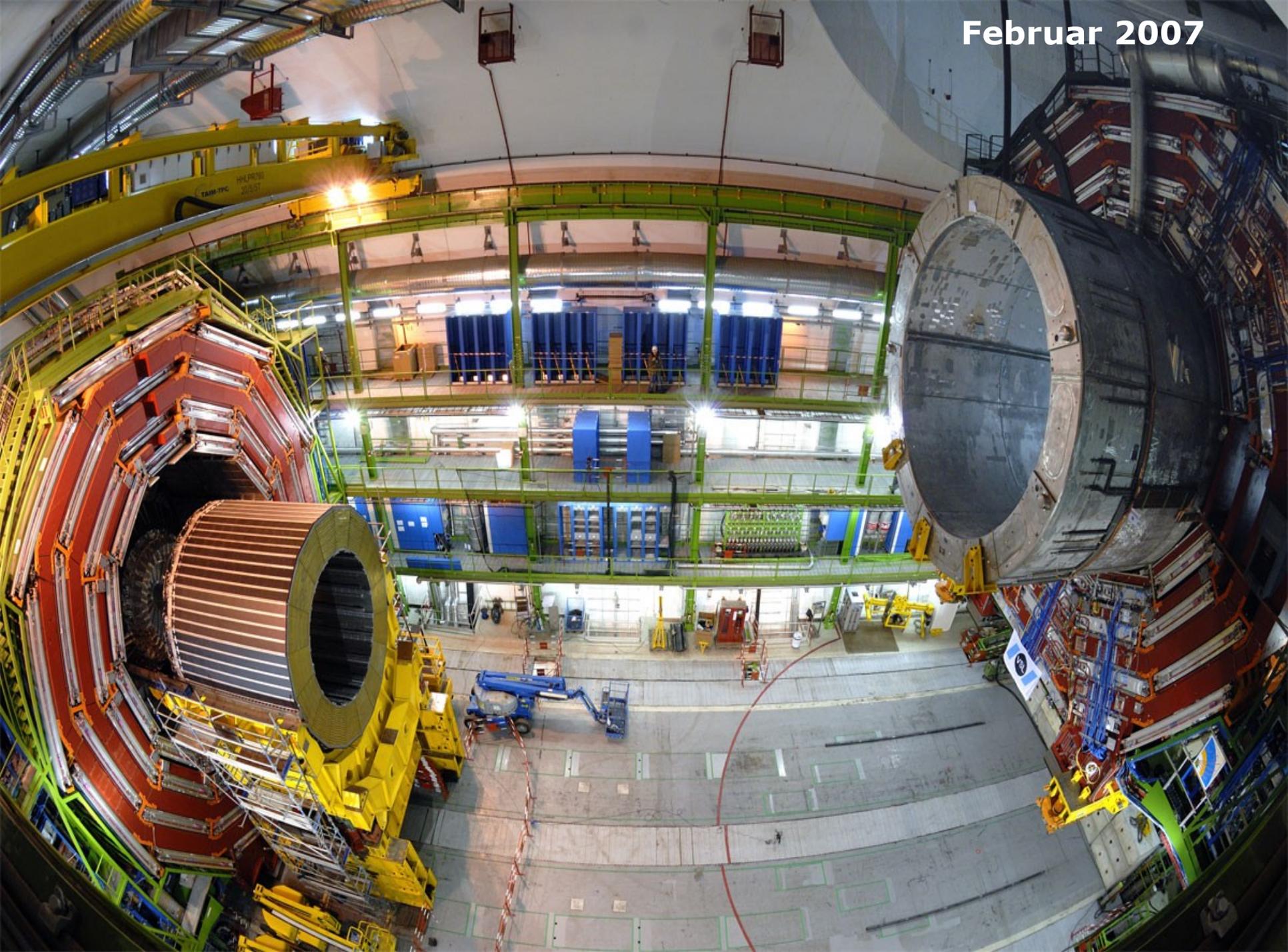
Januar 2007



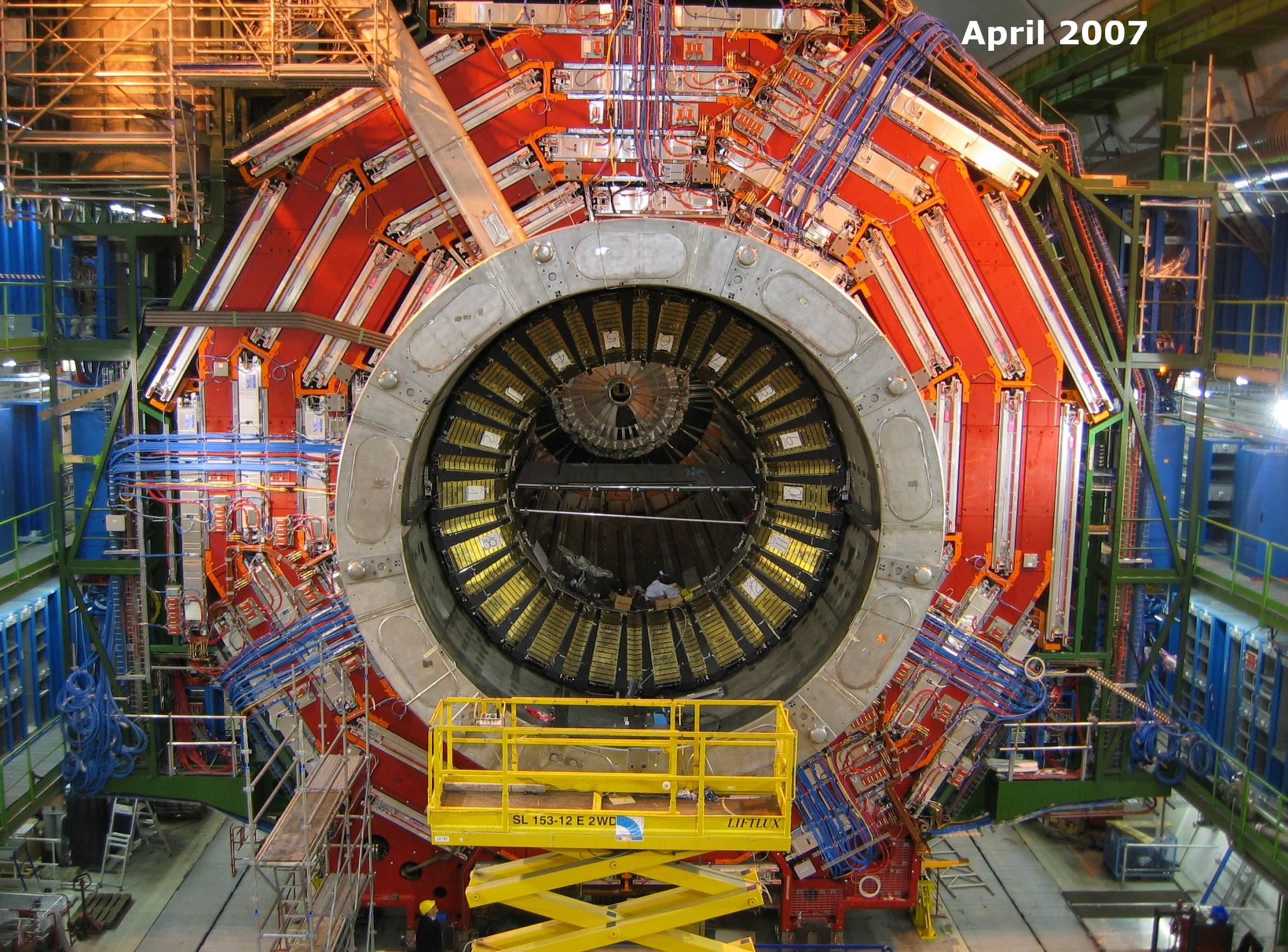
Februar 2007



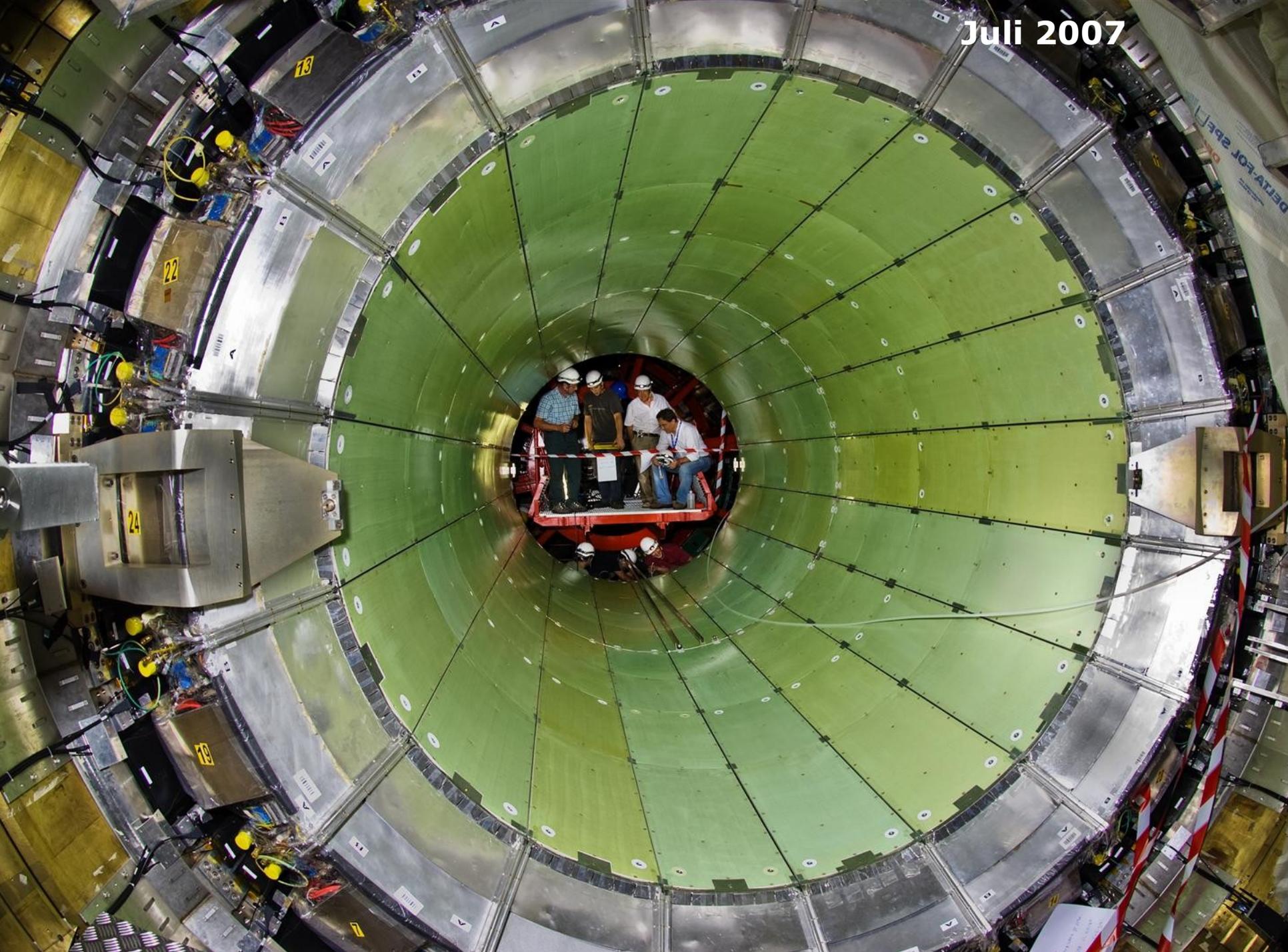
Februar 2007



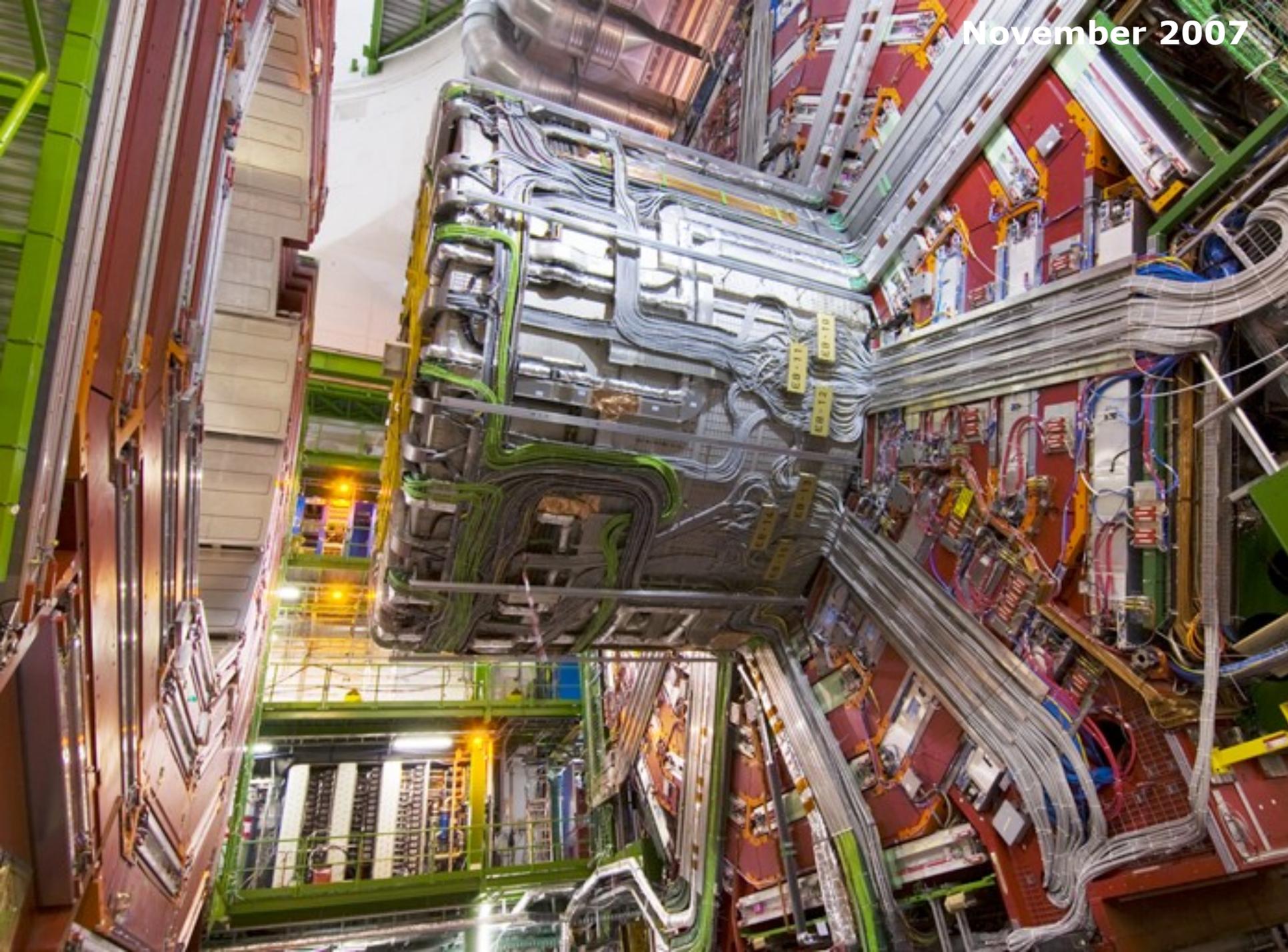
April 2007

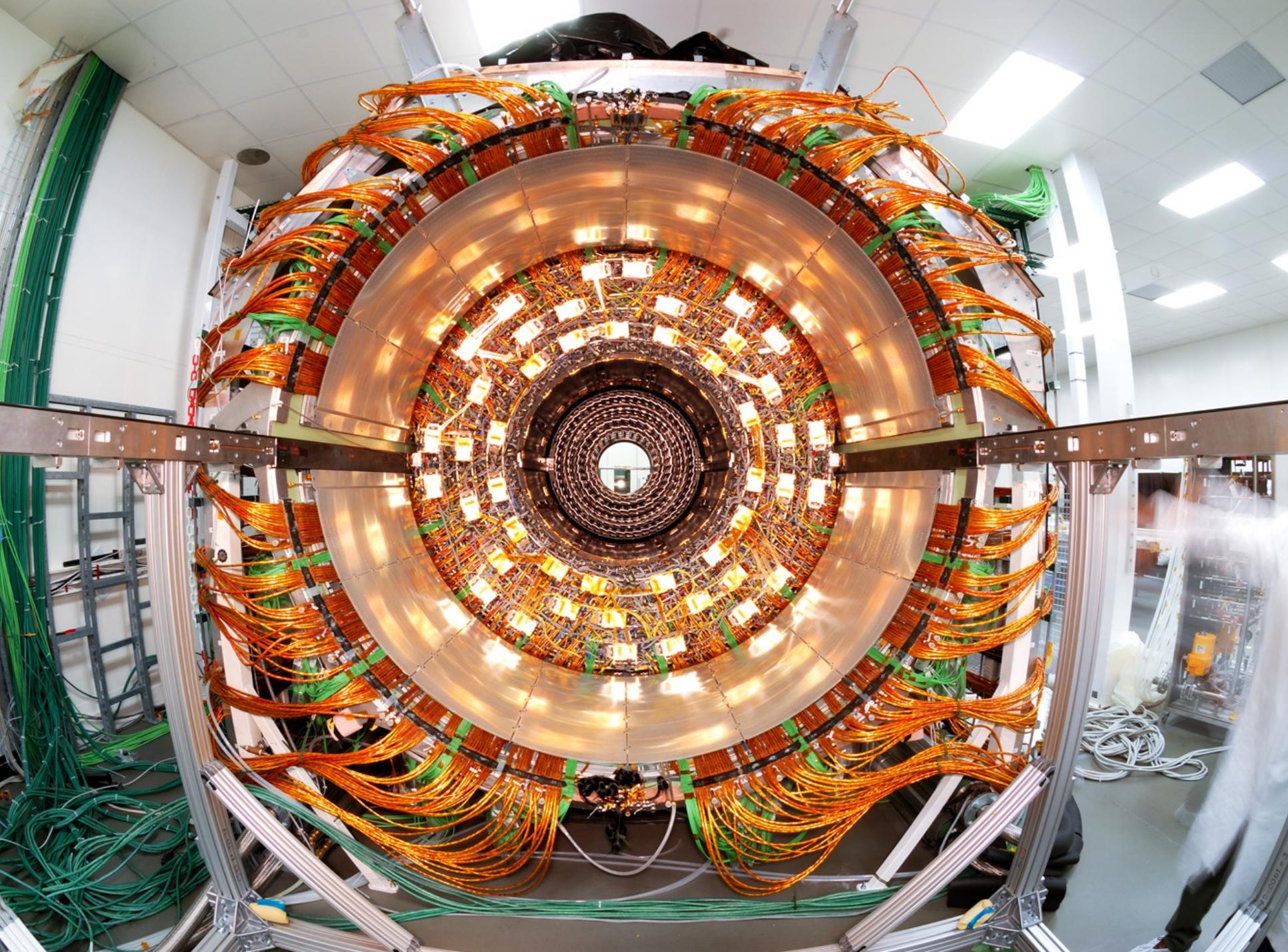


Juli 2007

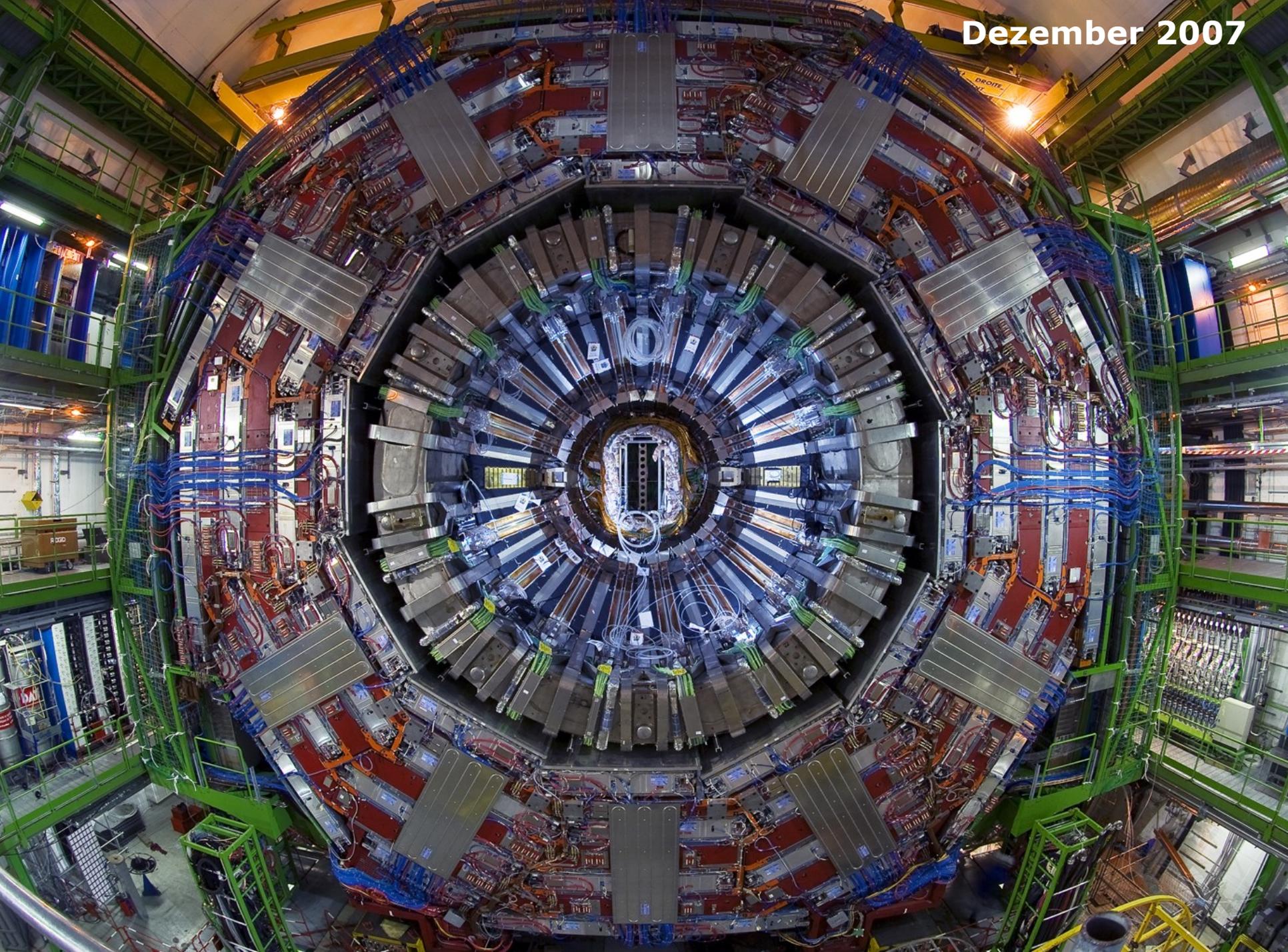


November 2007





Dezember 2007



Januar 2007

