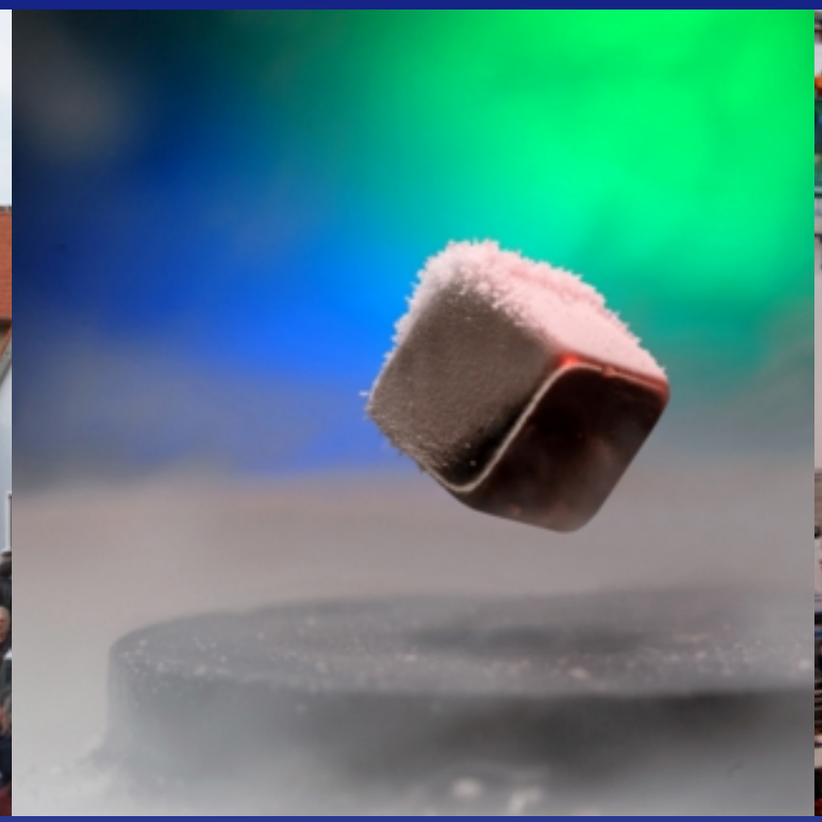
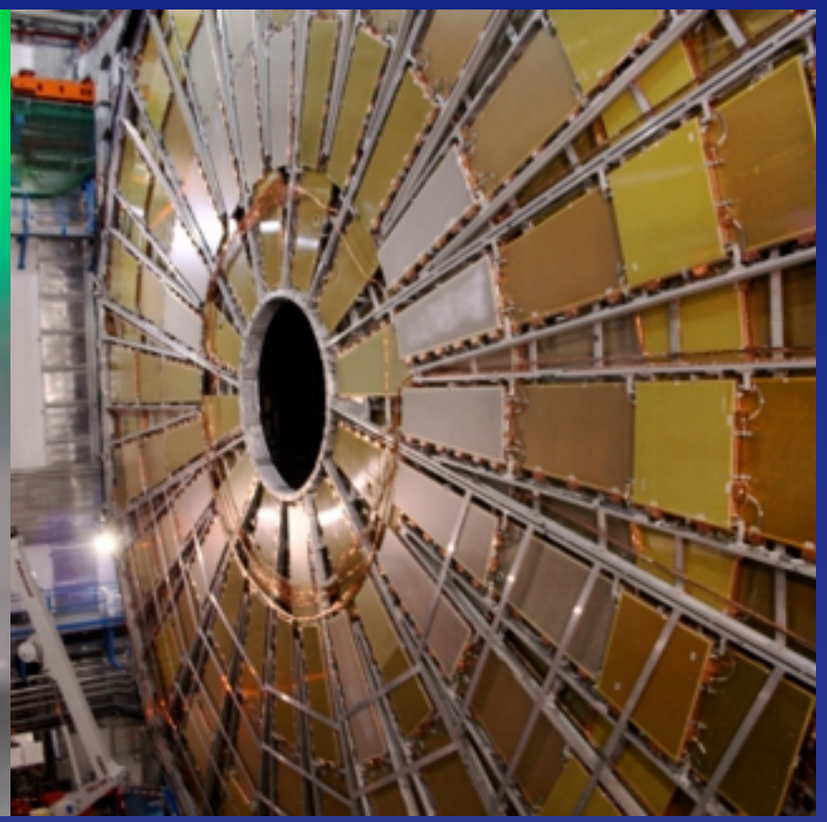
The Coming Revolutions in Particle Physics

Chris Quigg





Bayerische Akademie der Wissenschaften · 20. Oktober 2009

Large Hadron Collider · CERN

A Decade of Discovery Past

A new law of nature: electroweak theory

Neutrinos have mass: they morph

Top quark: very heavy, highly ephemeral

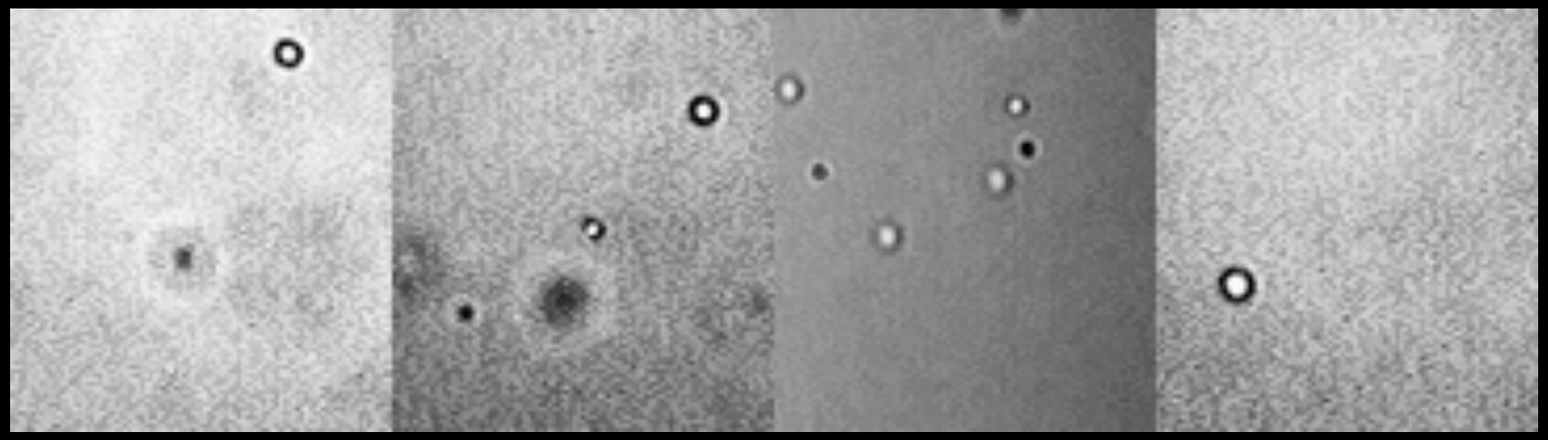
An imperfect mirror: matter/antimatter

Novel forms of matter and energy (dark)

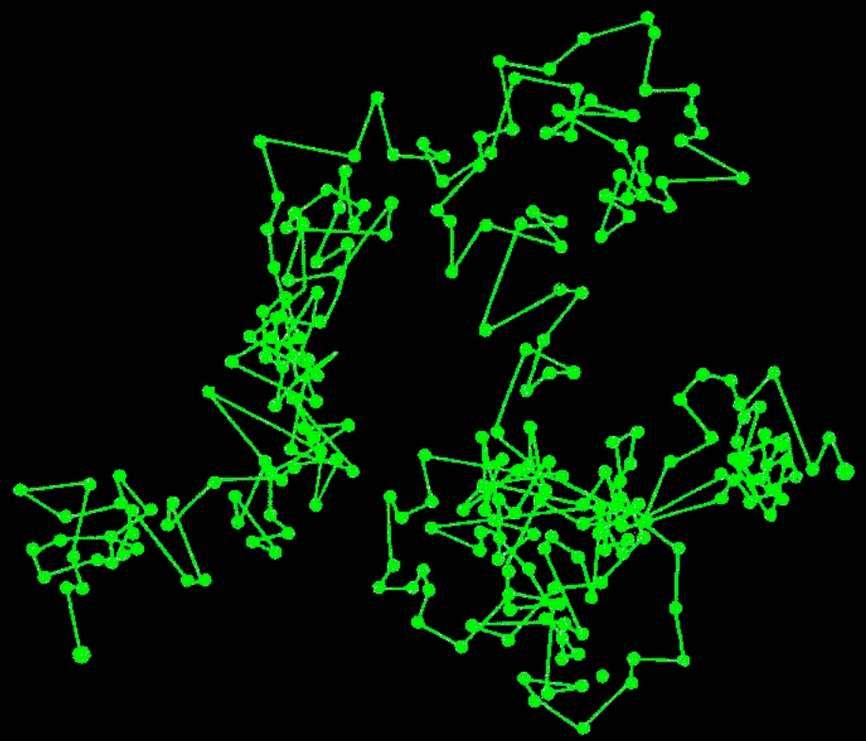
Atoms became real in the 20th century

To explain a complicated visible by a simple invisible

Jean Perrin



Eric Weeks, Emory U.



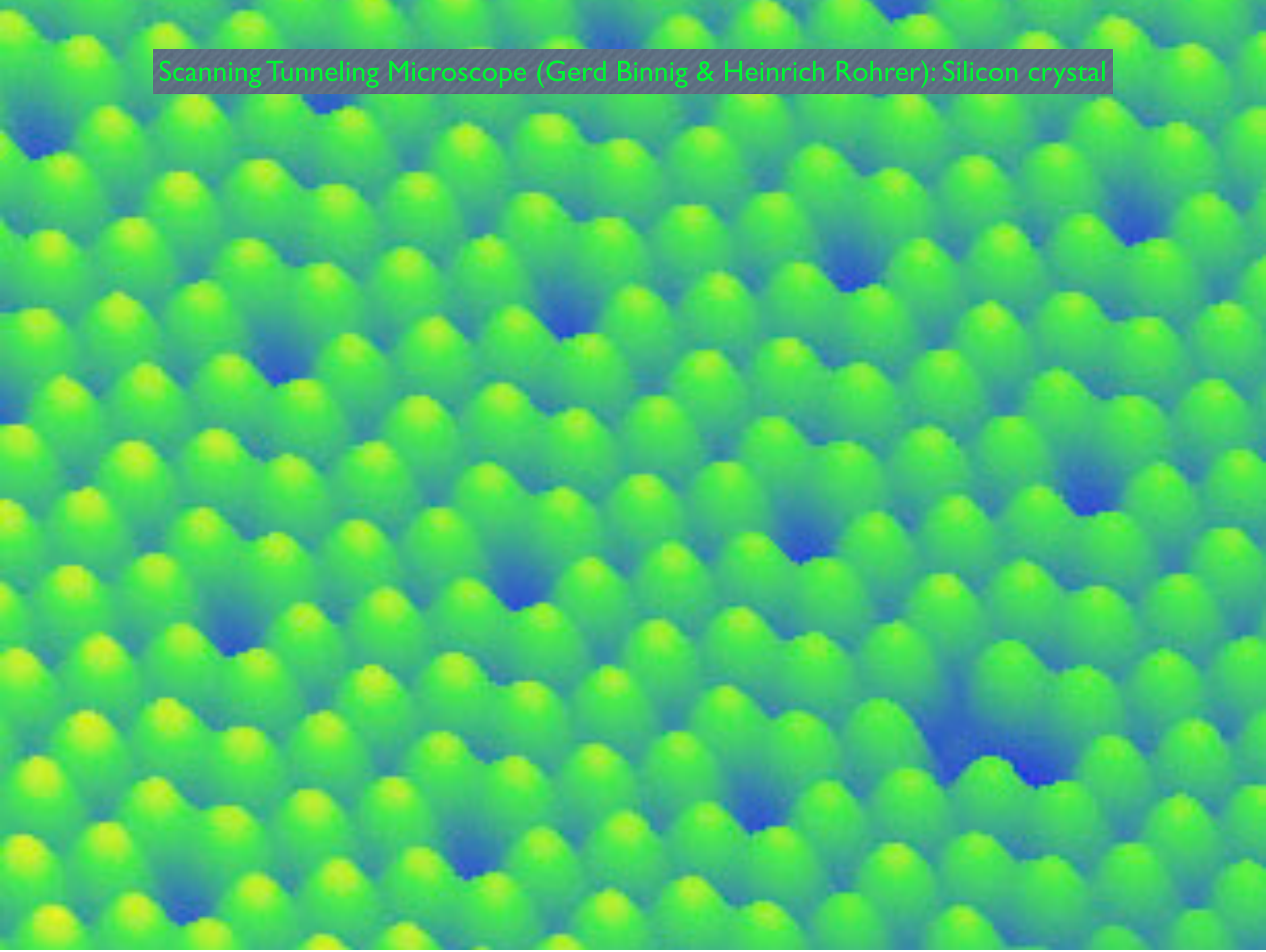
5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;*
von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownschen Molekularbewegung" identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau,
[1] daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwiese sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung
[2] der Wärme gegeben.

§ 1. Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.

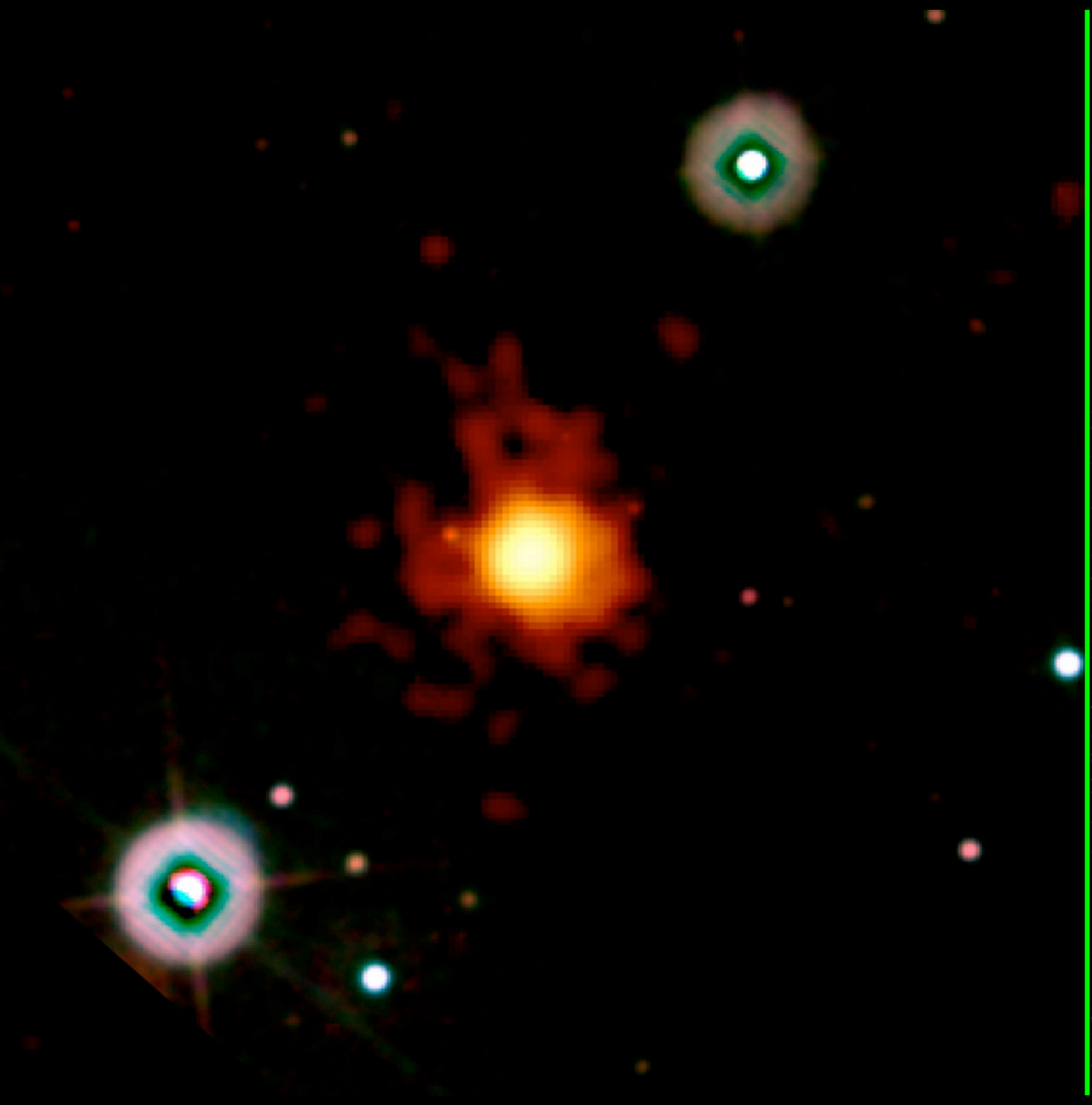
Im Teilvolumen V^* einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z-Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^* durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-


Scanning Tunneling Microscope (Gerd Binnig & Heinrich Rohrer): Silicon crystal

Great Lesson of XXth Century Science

The human scale of space & time is not privileged for understanding Nature . . . and may even be disadvantaged

GRB 090423: redshift 8.2;13.035 Gy



UV+X (SWIFT)

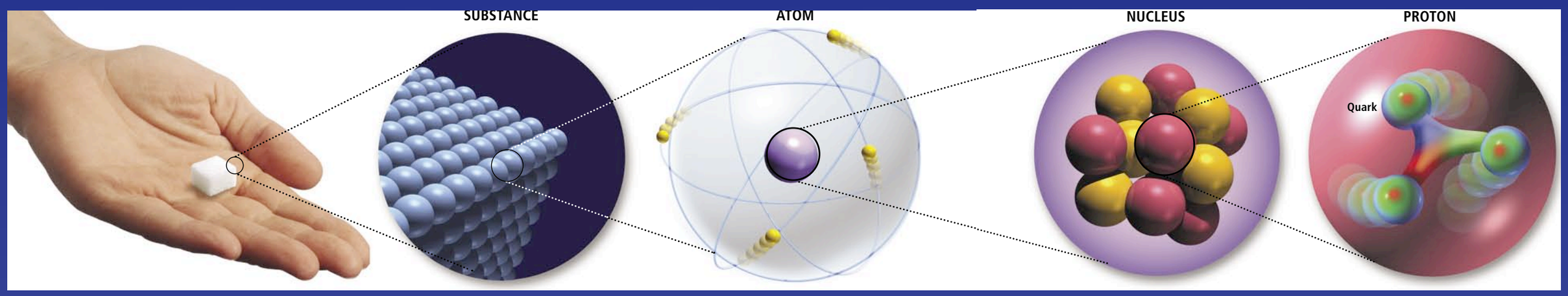
IR (Gemini North)

CDF
CQ
D0 (LMU)

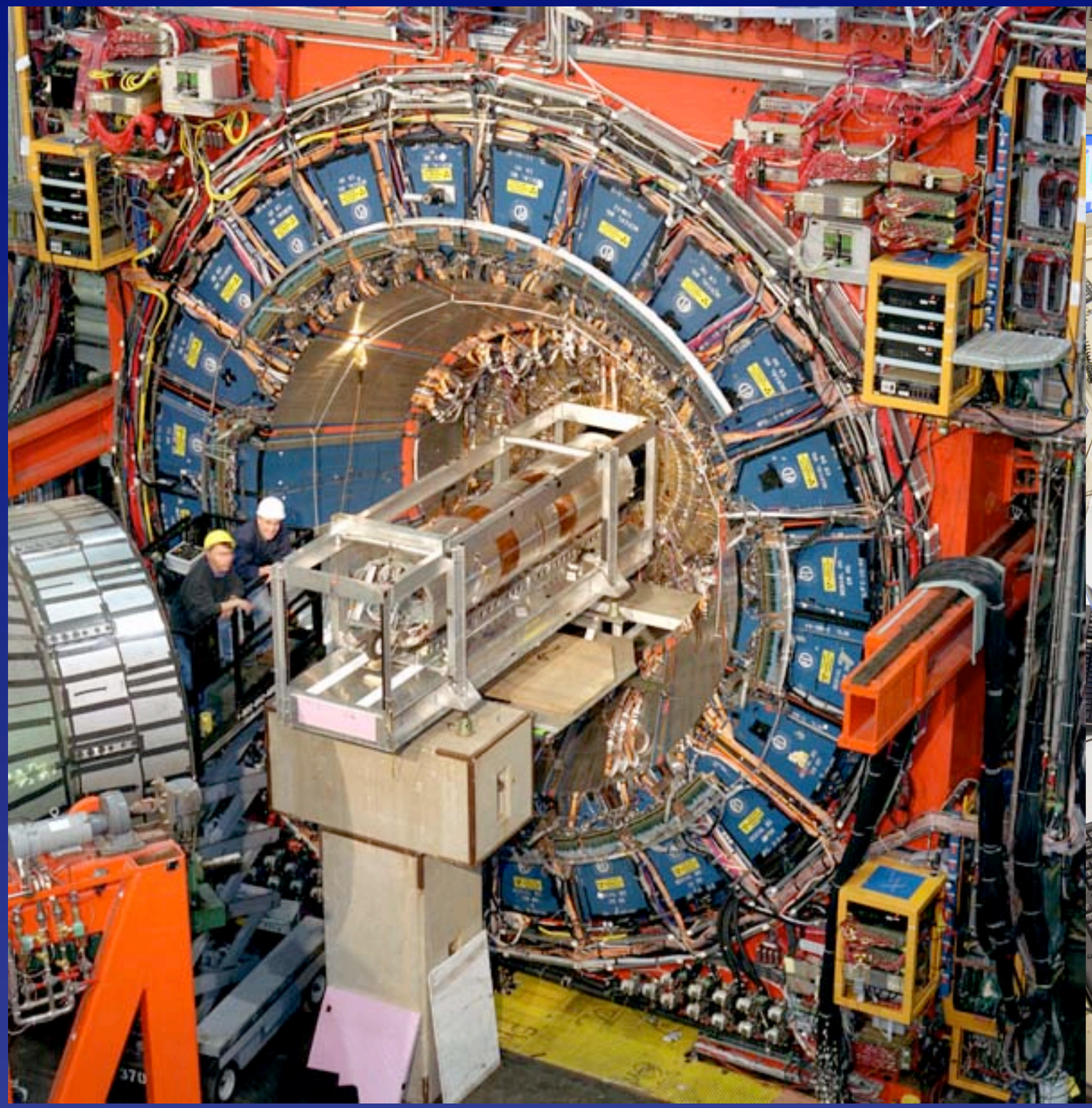
The world's most powerful microscope
… home to *nanonanophysicists!*

Tevatron collider at Fermilab
protons on antiprotons at 1+1 TeV
speed of light: $c \approx 10^9$ km/h (30 cm/nanosecond)
speed of proton: c – 495 km/h

Protons pass my window 45,000 times / second
>10 million collisions per second

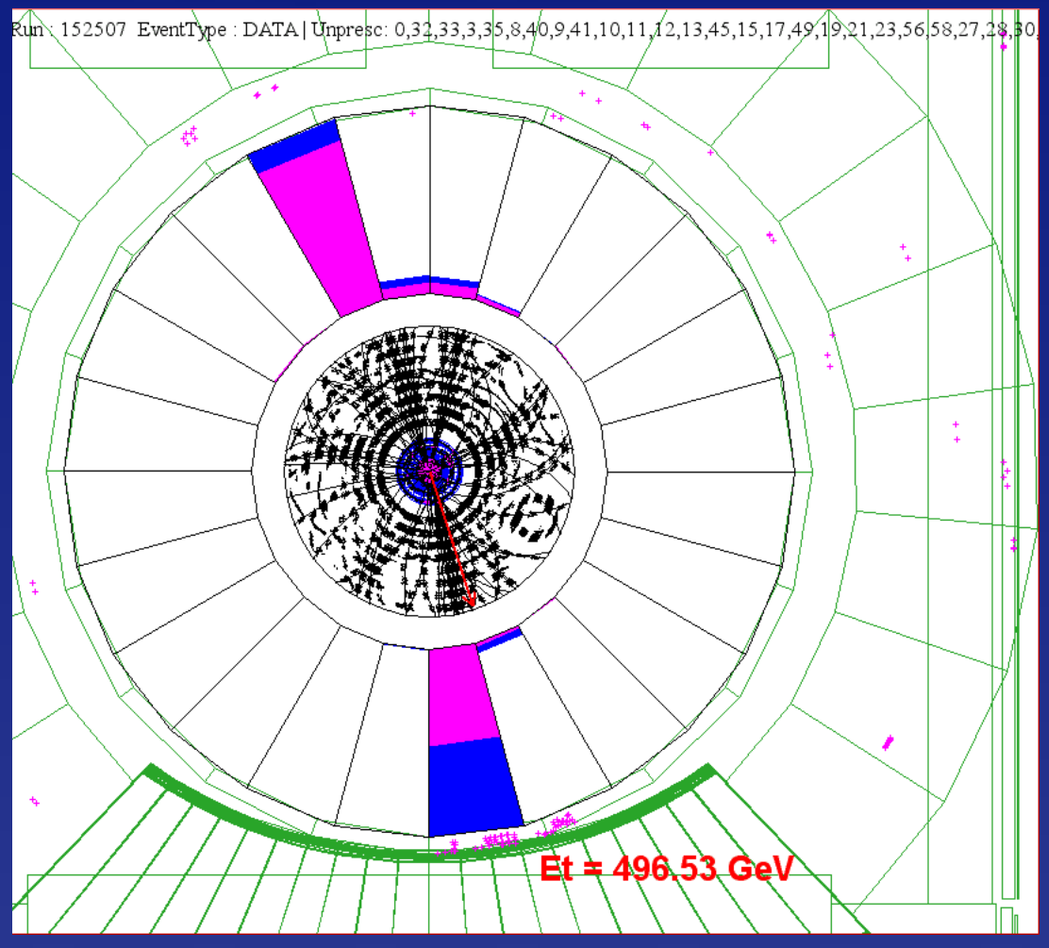


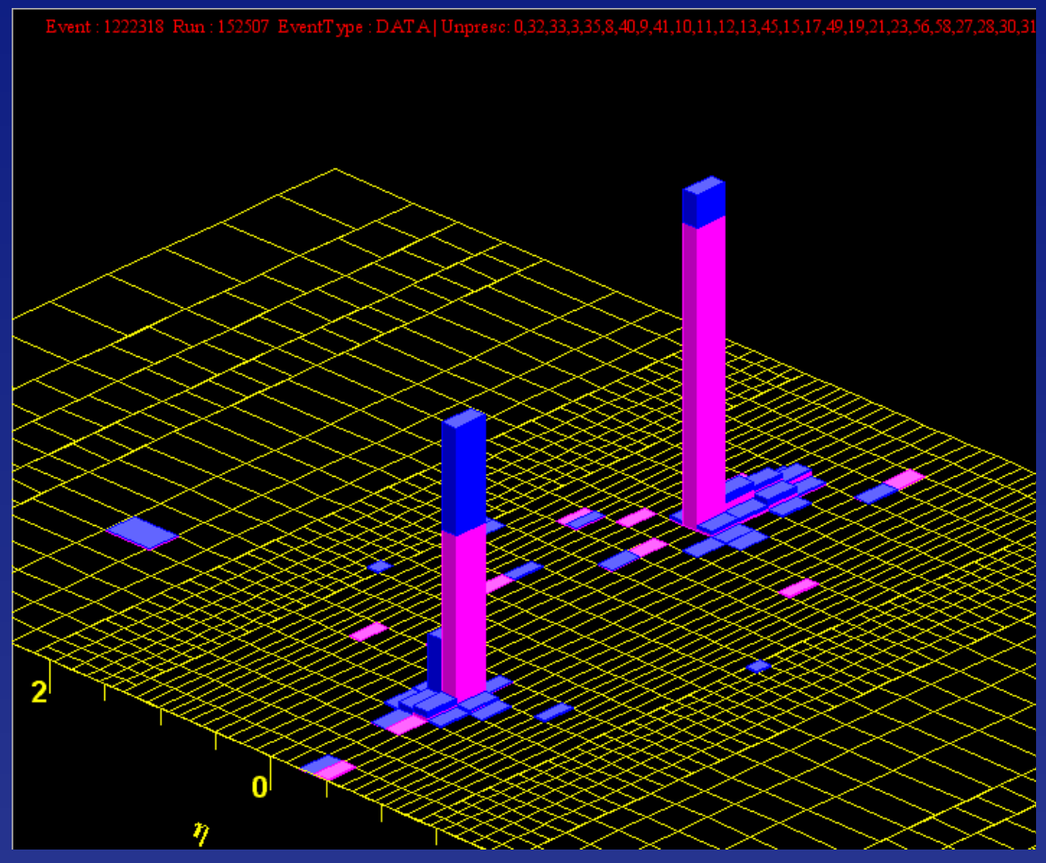
CDF Experiment



The World's Most Powerful Microscopes

nanonanophysics

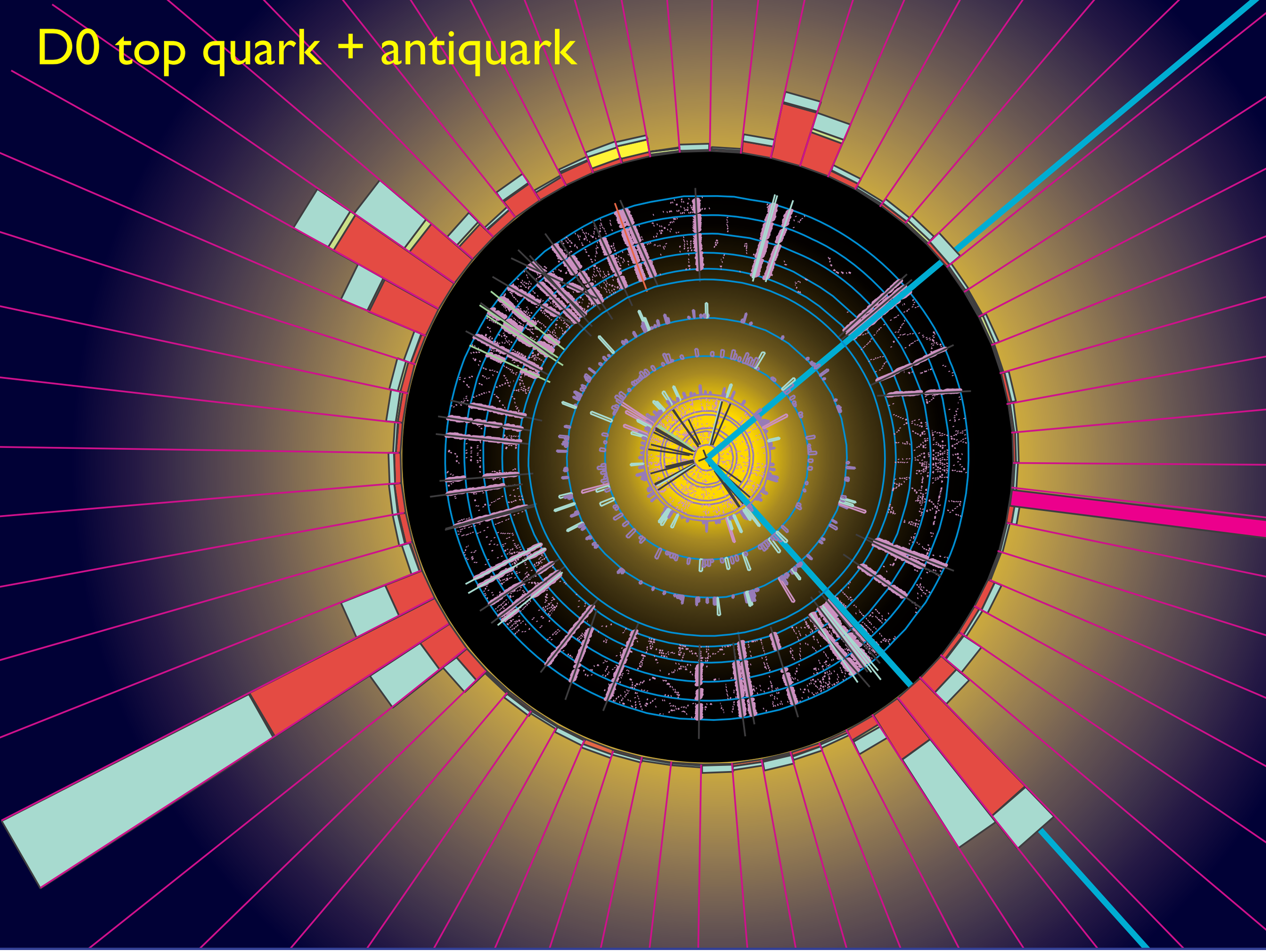




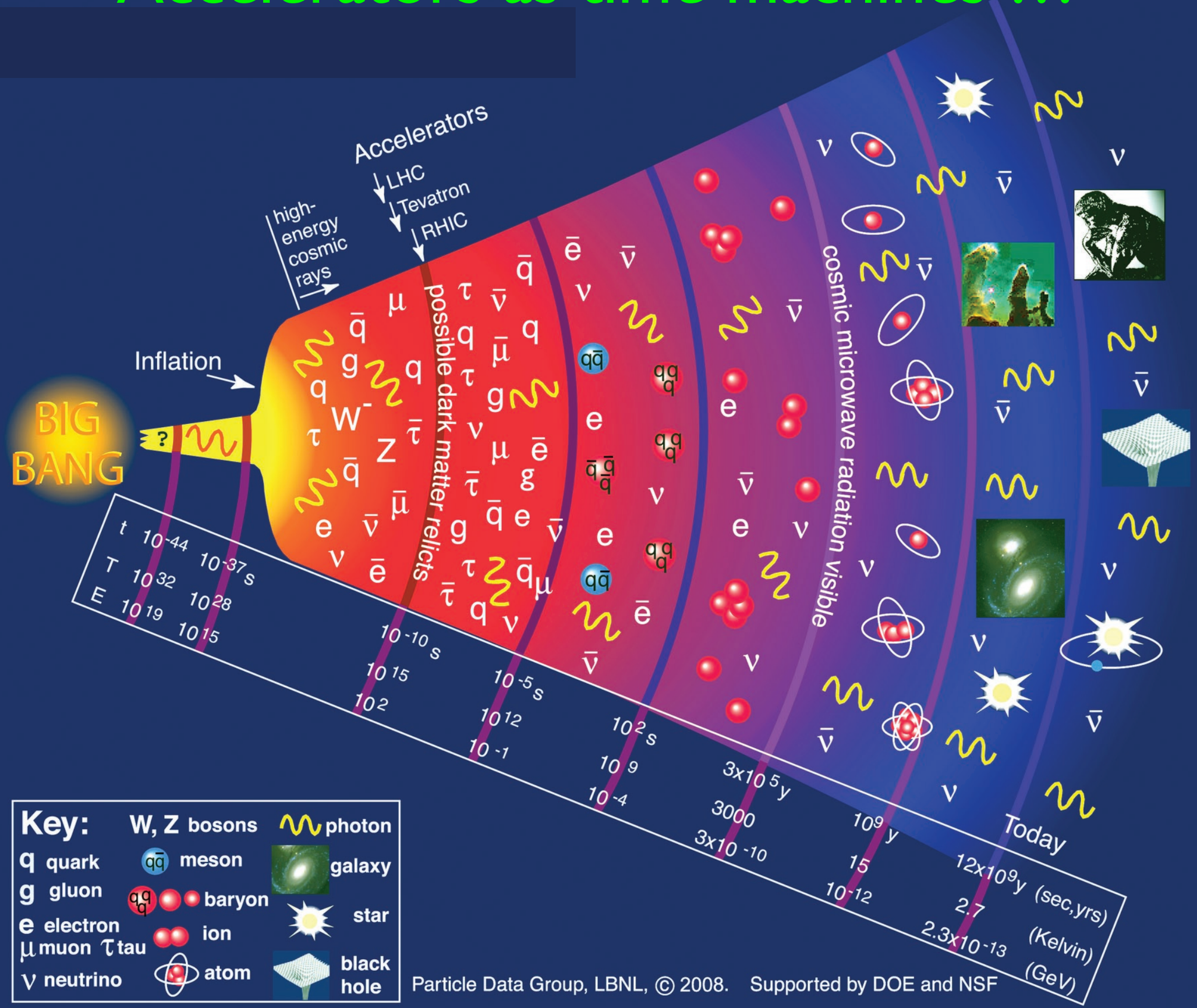
CDF two-jet event (70% of energy ⊥ beam direction)

quark + antiquark → jet + jet

D0 top quark + antiquark

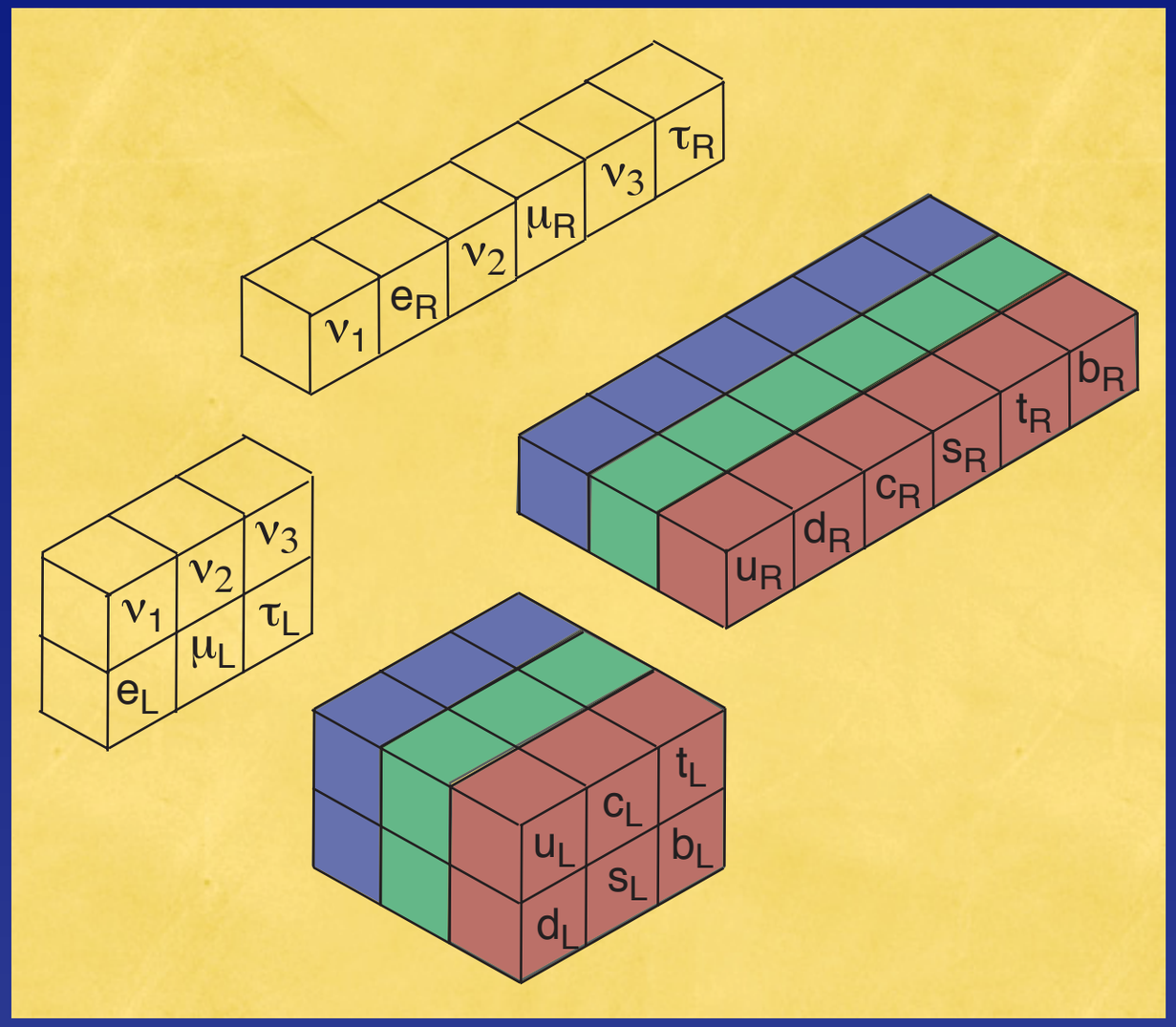


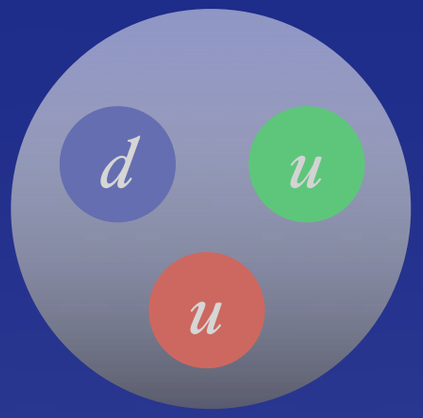
Accelerators as time machines …



Our Picture of Matter (the revolution just past)

Pointlike ($r \leq 10^{-18}$ m) quarks and leptons



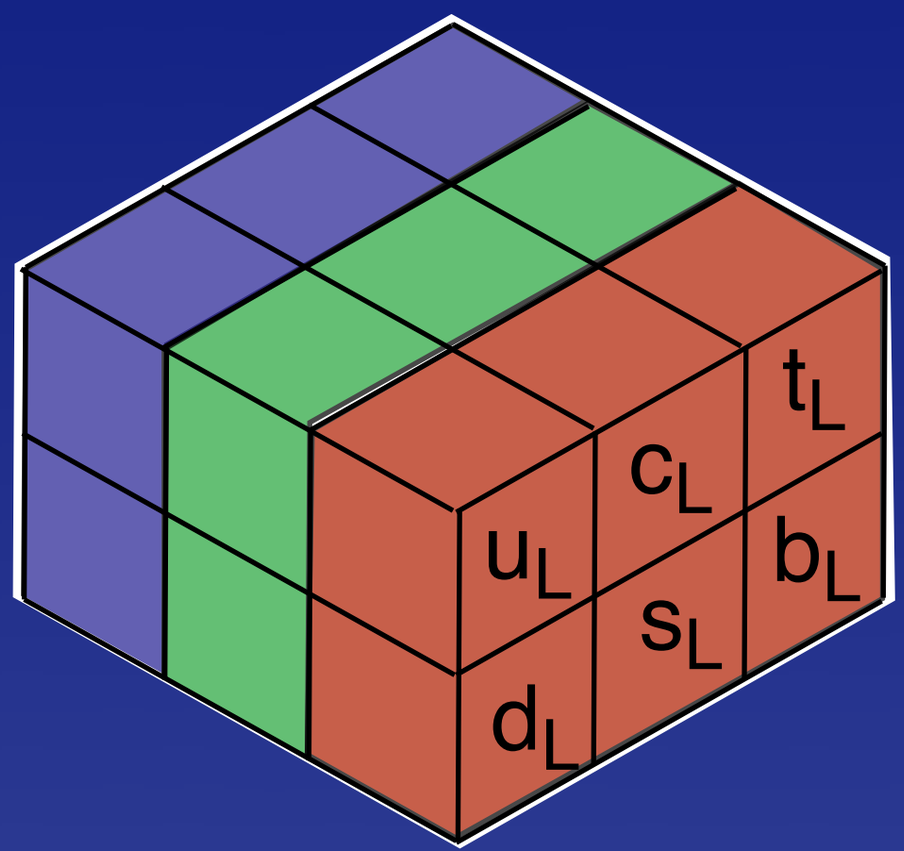


Gravitation, electromagnetism, radioactivity, strong interaction

Interactions follow from symmetries

Quantum chromodynamics (QCD):
symmetry among quarks
red, green, blue

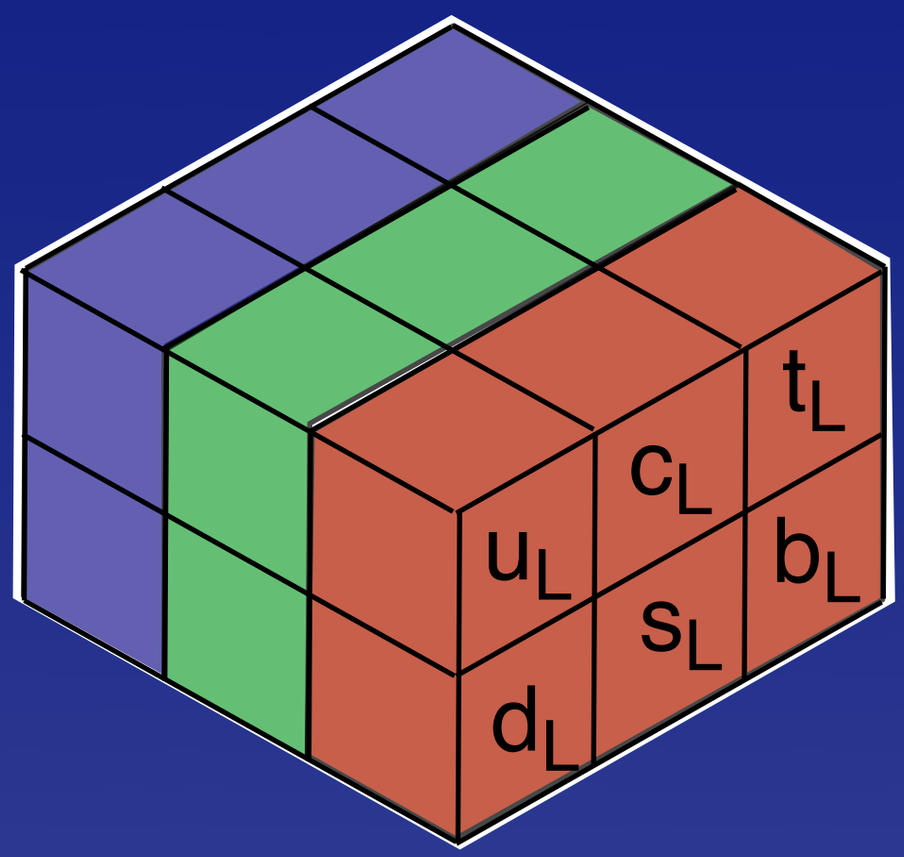
gluons

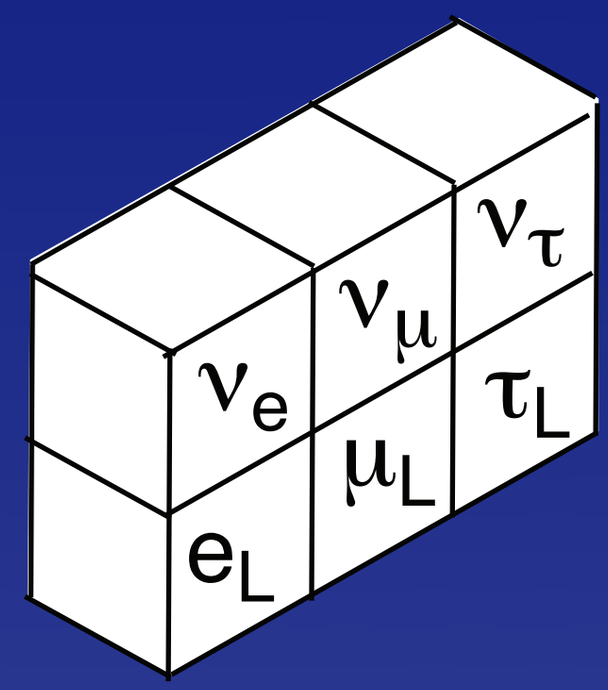


Interactions follow from symmetries

Electroweak theory:
family symmetry
$u \leftrightarrow d$; $\nu \leftrightarrow e$; … (hidden)

weak bosons (W^+, W^-, Z^0) + *photon*

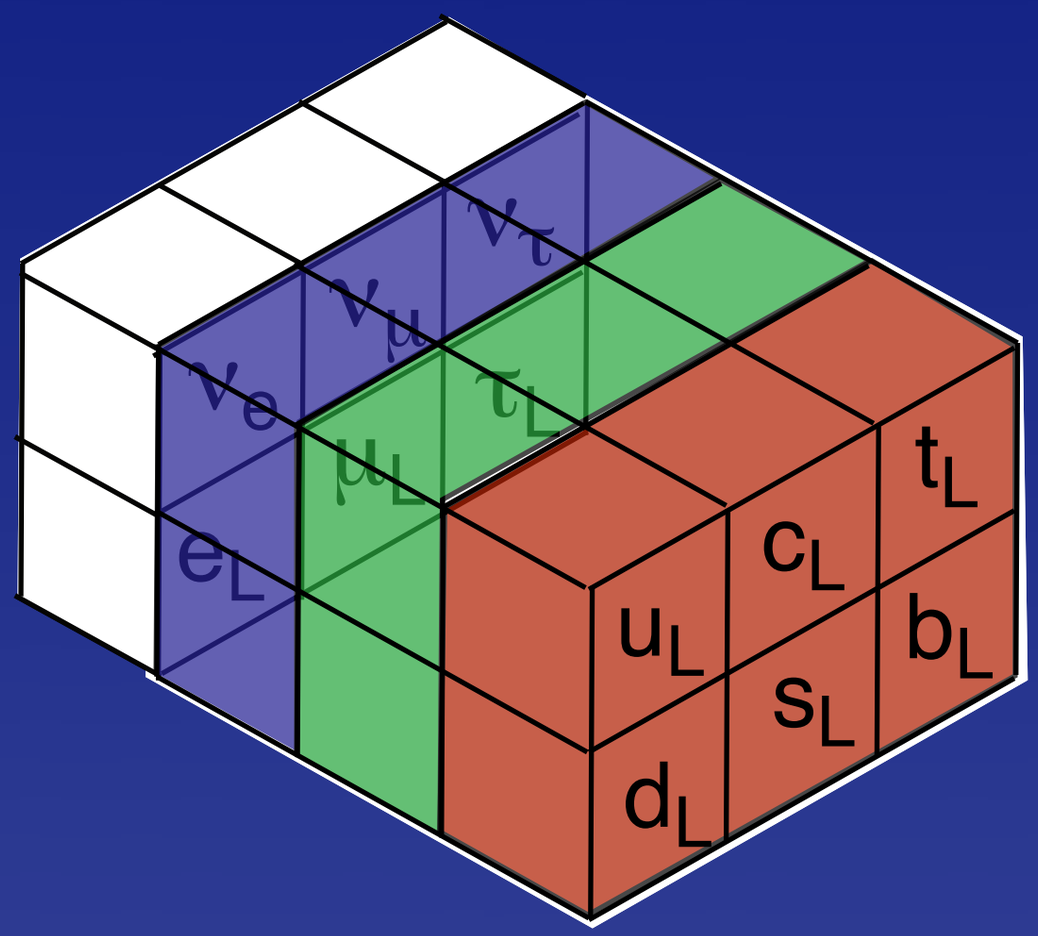




Interactions follow from symmetries

A symmetry among quarks and leptons …

… would have to be a hidden symmetry

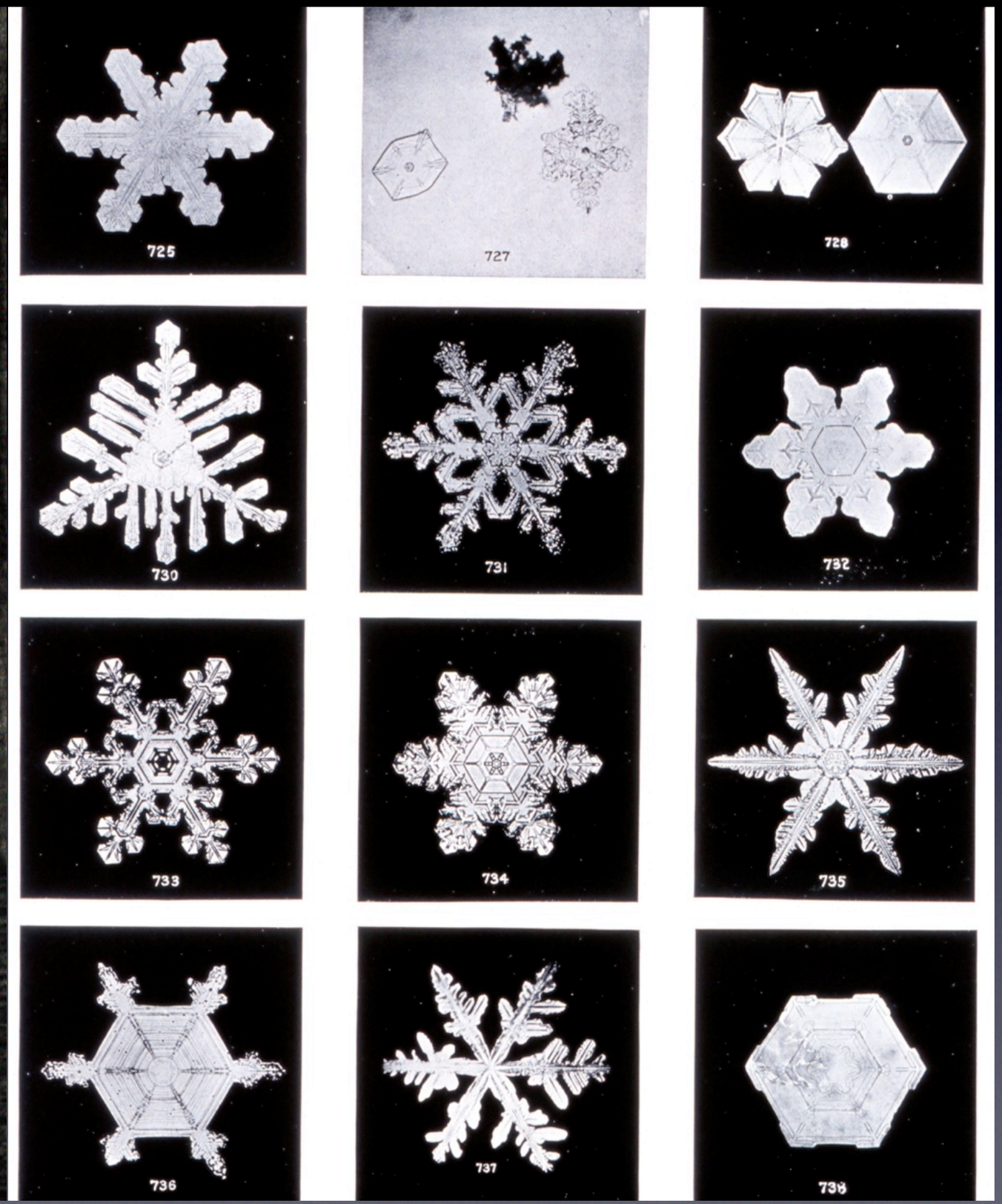


Weak interactions, electromagnetism seem so different …

Weak	Electromagnetic
range: 1% proton size	infinite range
W: 100 × proton mass	massless photon

How can they share a common origin (symmetry)?

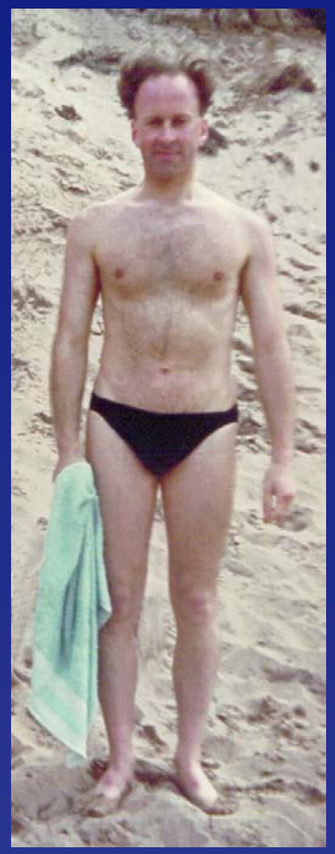
Symmetry of laws $\not\Rightarrow$ symmetry of outcomes



Studies among the Snow Crystals ... by Wilson Bentley, via NOAA Photo Library

Meißner Effect
hidden EM symmetry

Superconductivity suggests
a field that permeates all of space
could hide electroweak symmetry



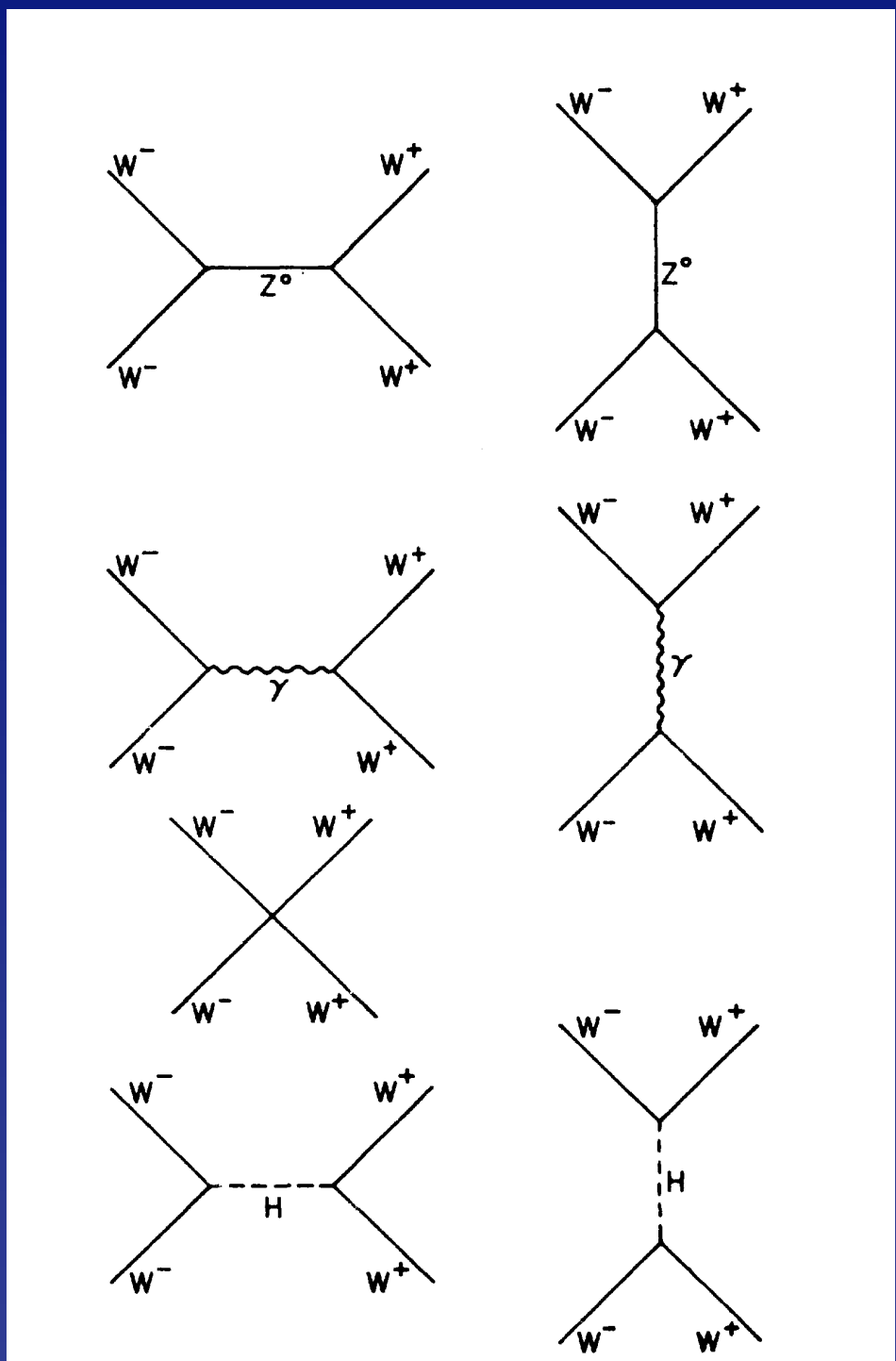
Peter Higgs
+ R. Brout, F. Englert, G. Guralnik, R. Hagen, T. Kibble

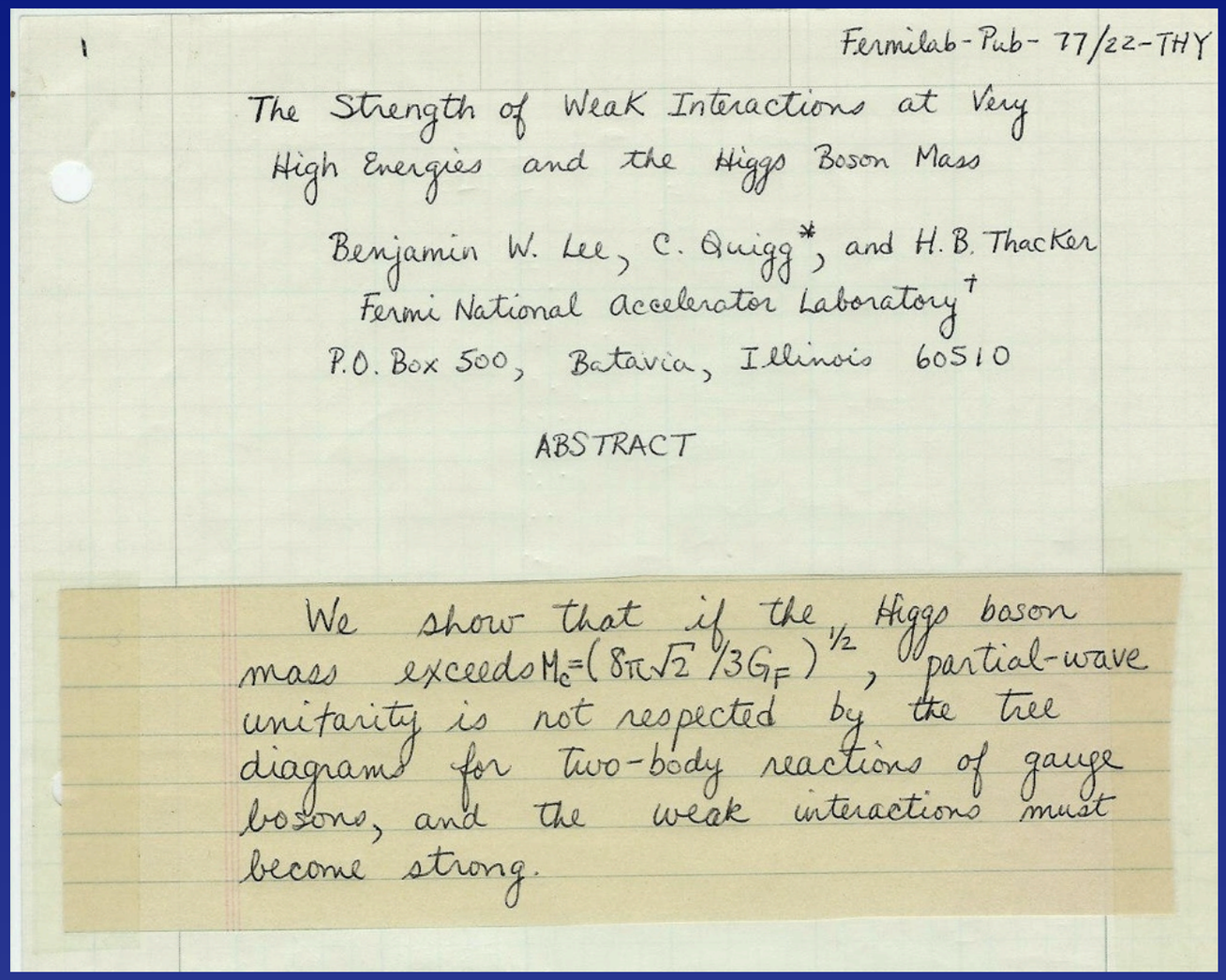
Higgs boson: massive particle with spin zero
hides electroweak symmetry
gives mass to *W* and *Z*
gives mass to electron, quarks, etc.

Theory does not predict the mass

Not yet observed!

Gedankenexperiment





Fermilab-Pub-77/22-THY

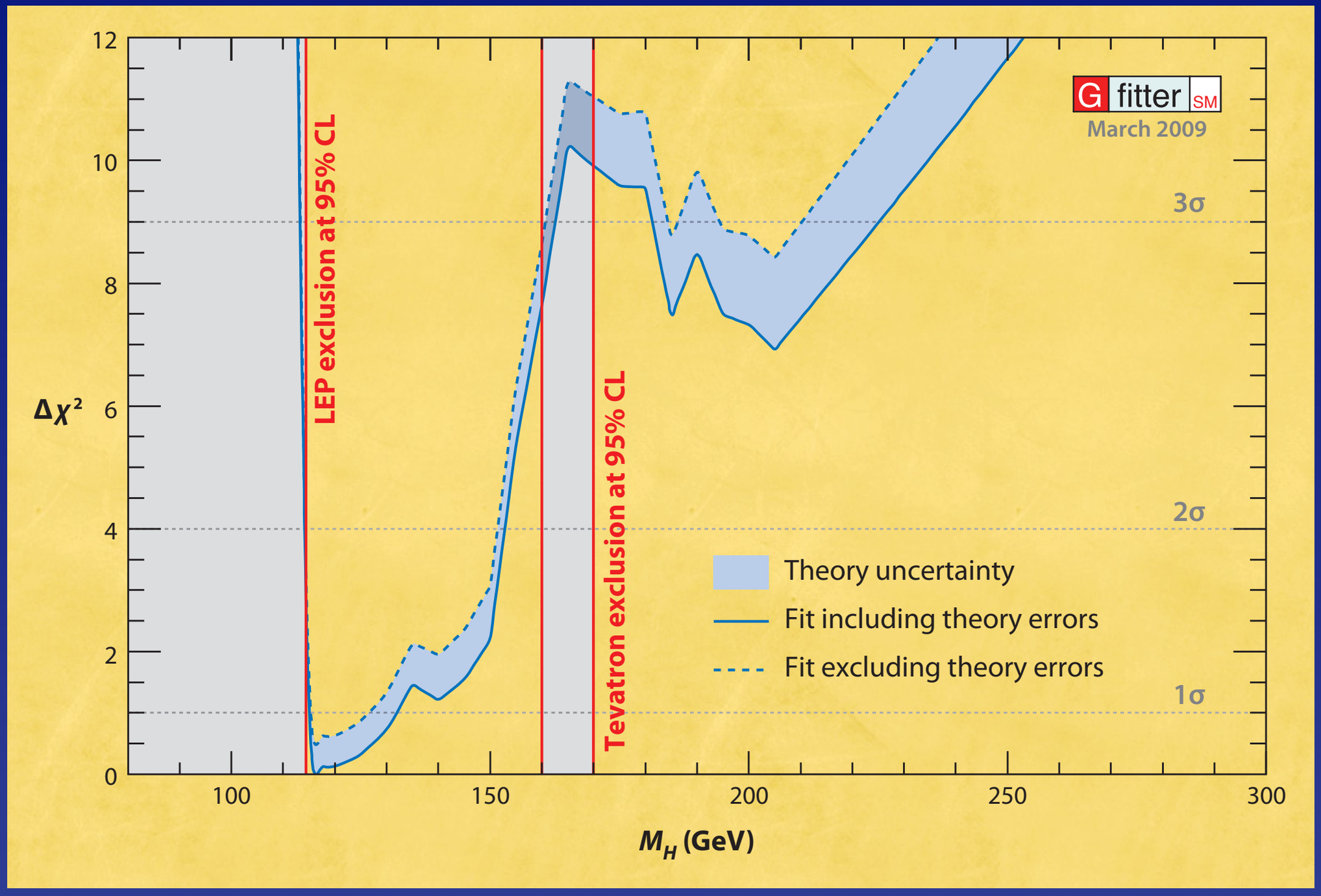
The Strength of Weak Interactions at Very High Energies and the Higgs Boson Mass

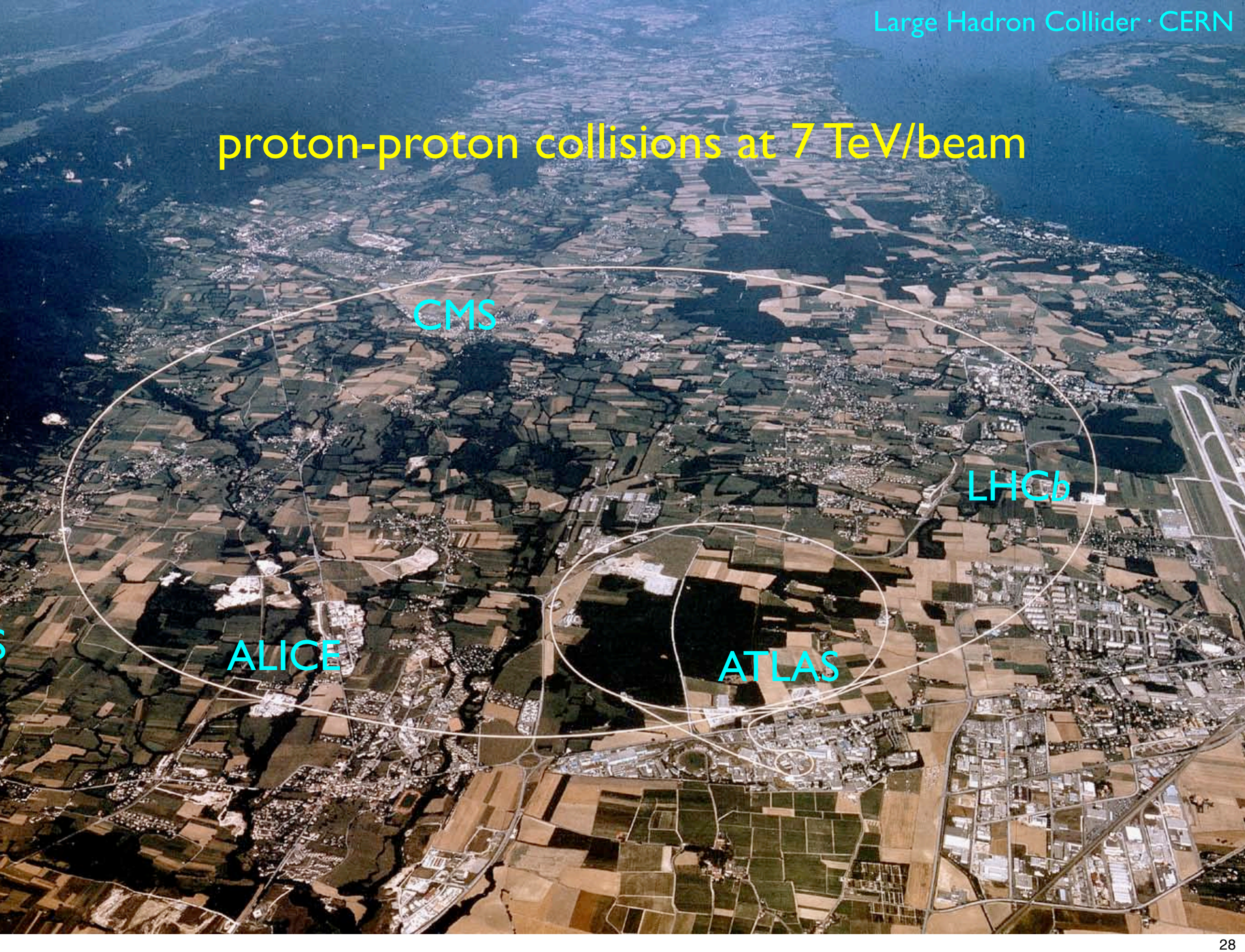
Benjamin W. Lee, C. Quigg*, and H. B. Thacker
Fermi National Accelerator Laboratory†
P.O. Box 500, Batavia, Illinois 60510

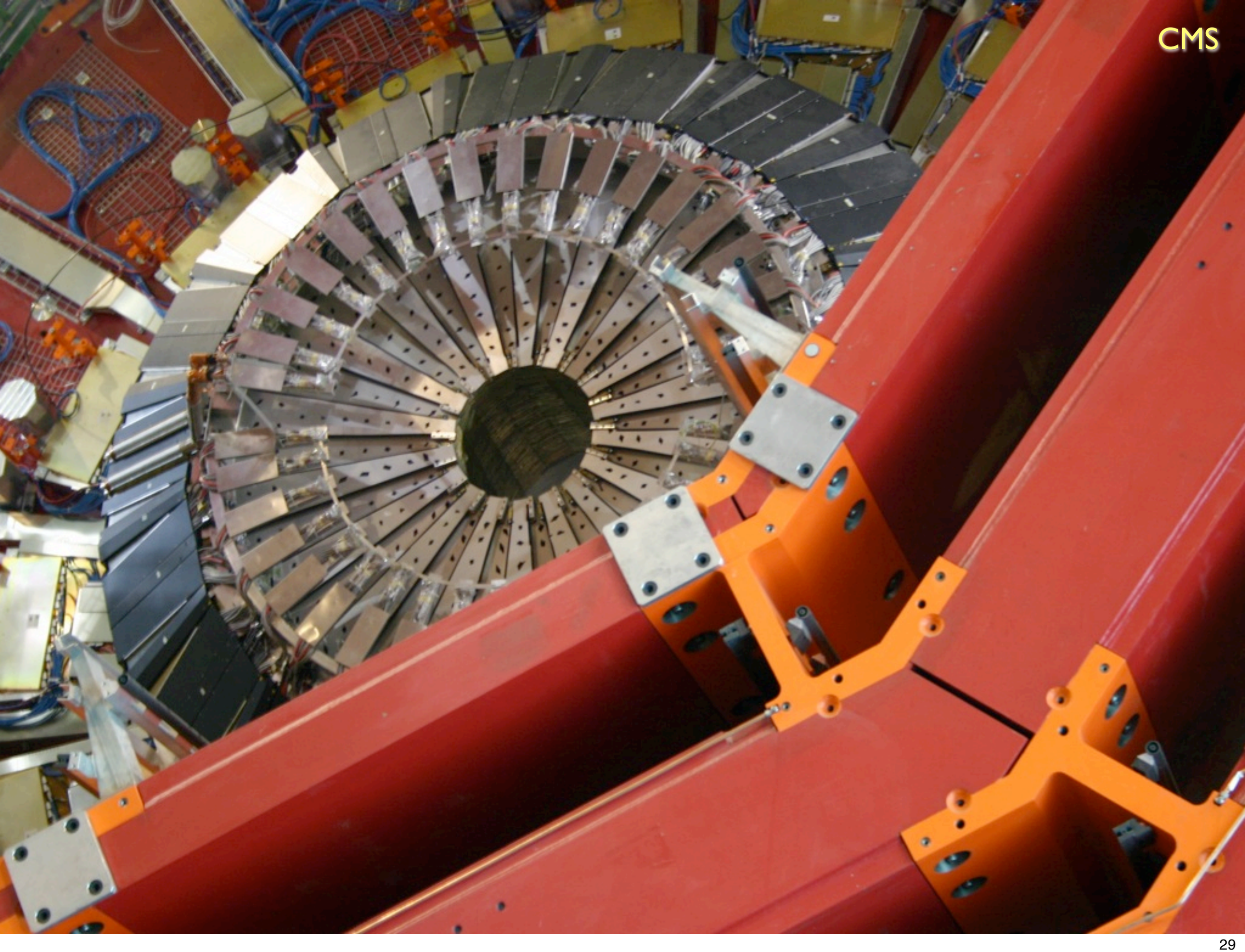
ABSTRACT

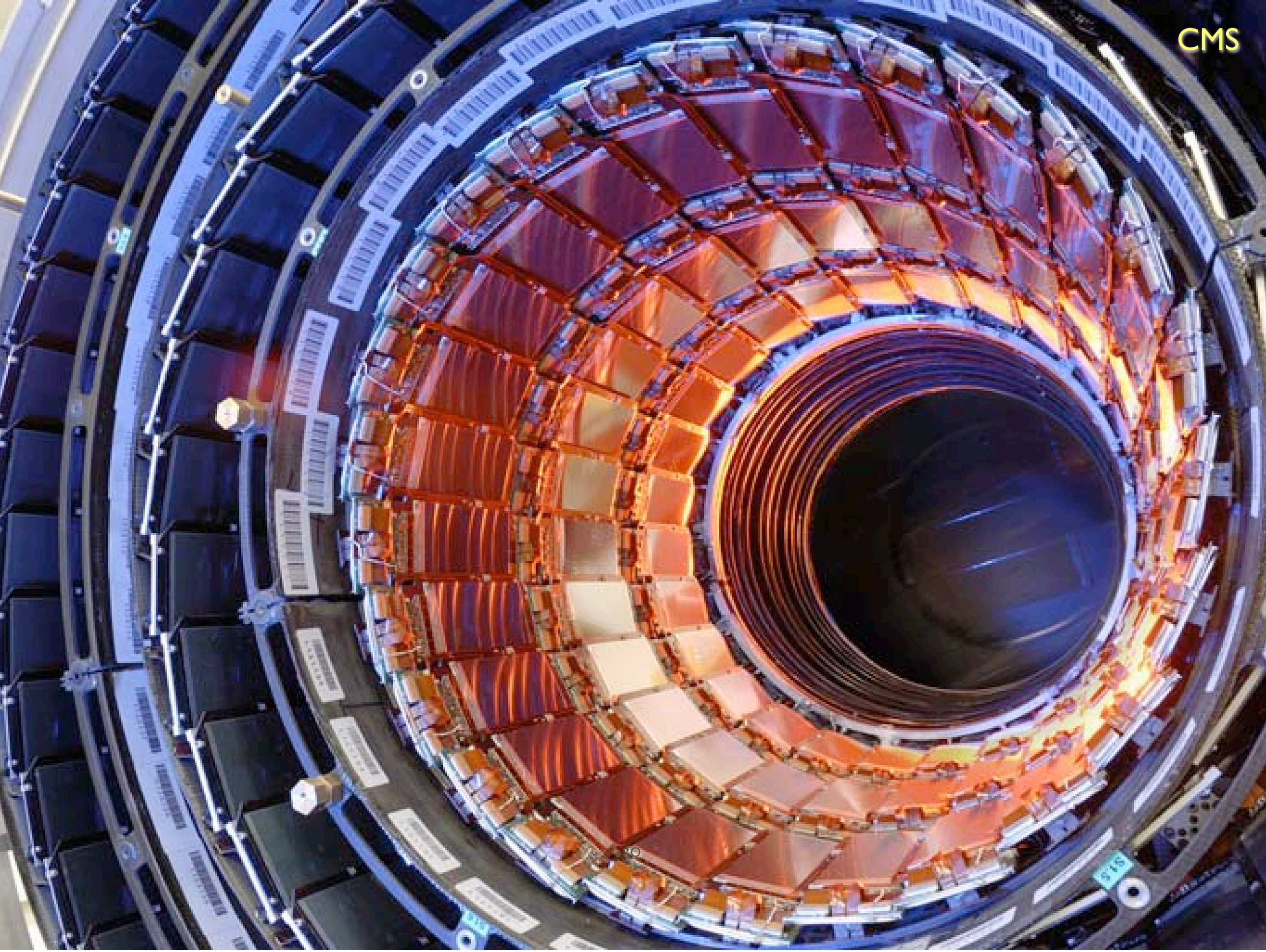
We show that if the Higgs boson mass exceeds $M_c = (8\pi\sqrt{2}/3G_F)^{1/2}$, partial-wave unitarity is not respected by the tree diagrams for two-body reactions of gauge bosons, and the weak interactions must become strong.

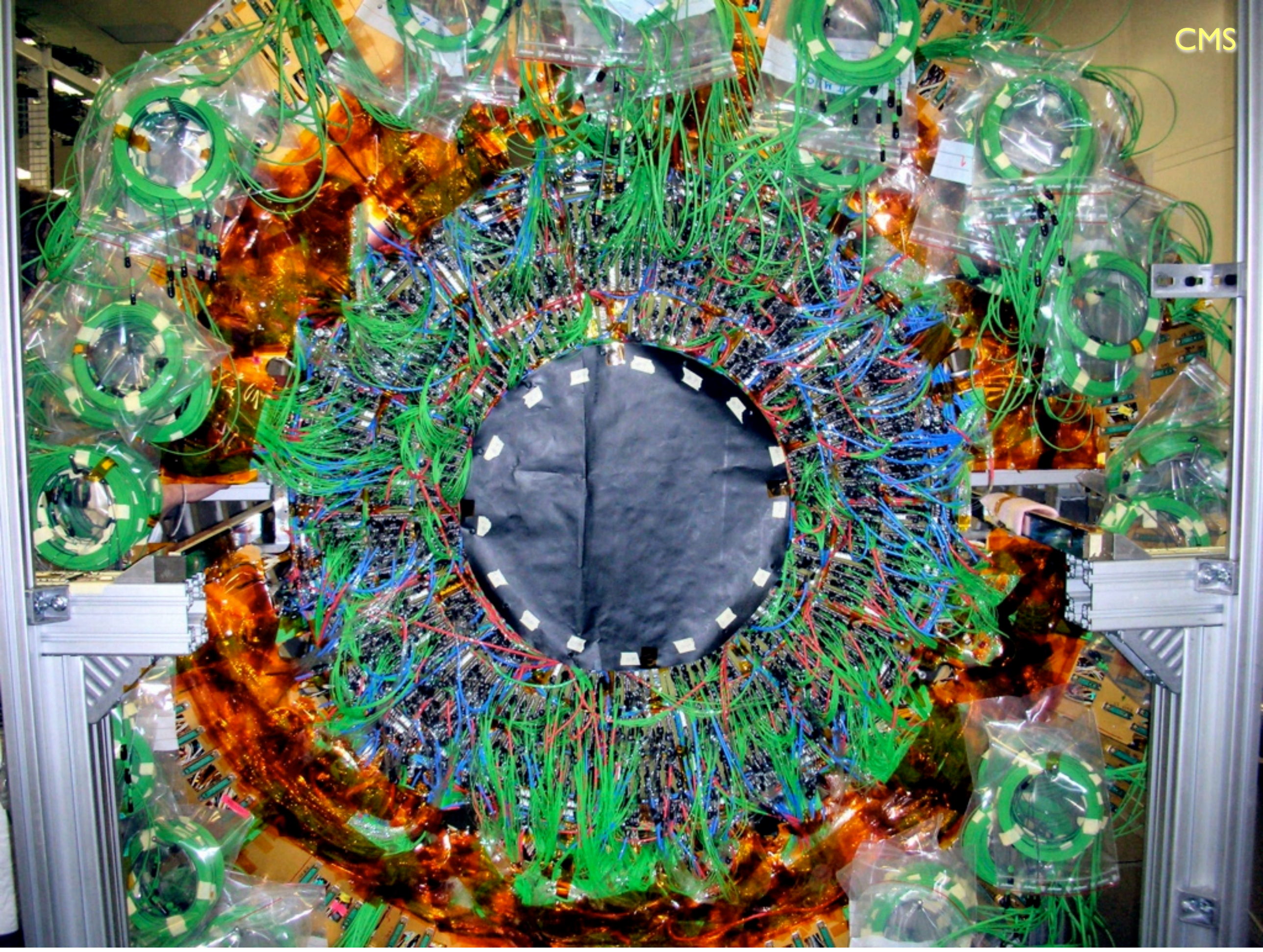
Where the (standard) Higgs boson might be

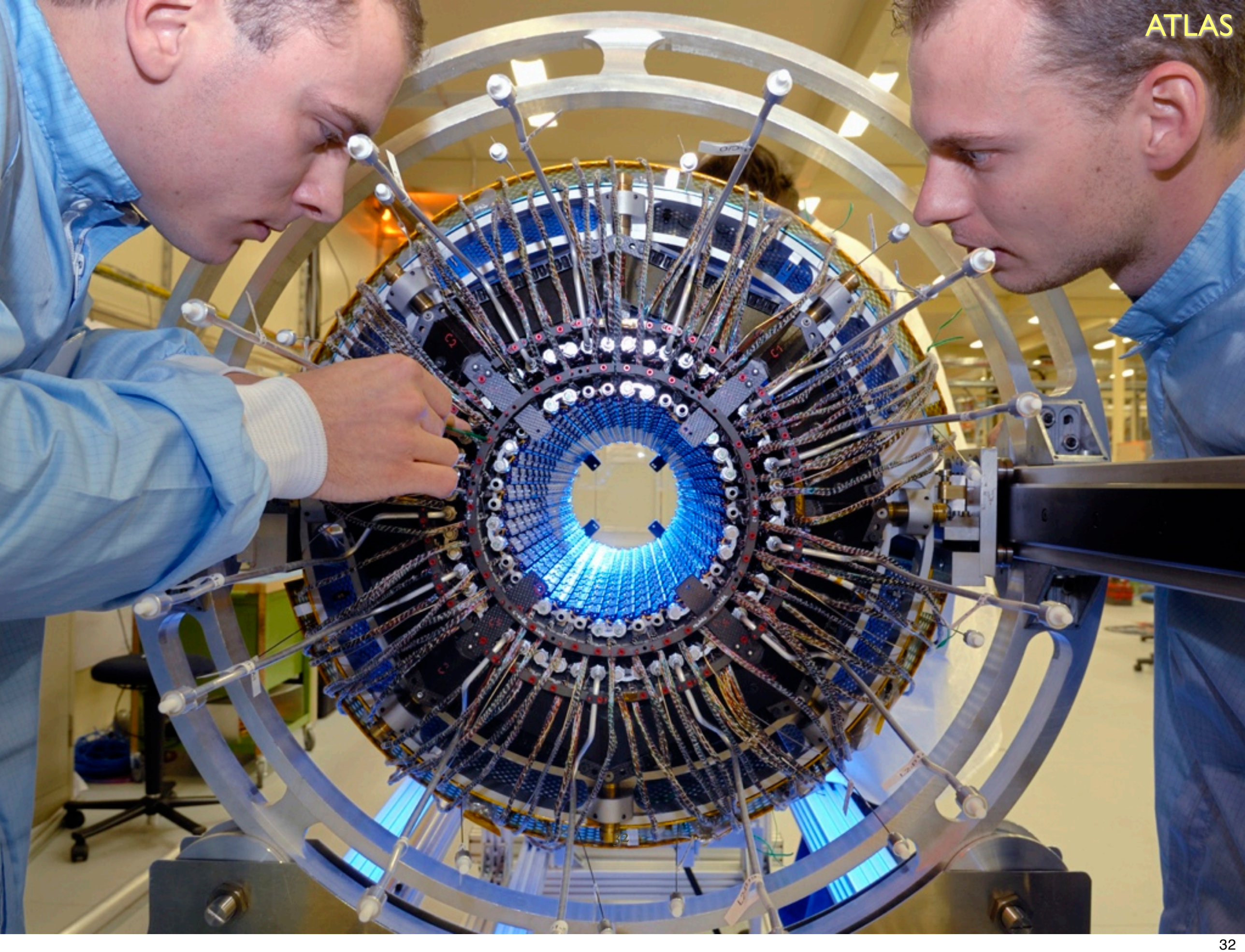


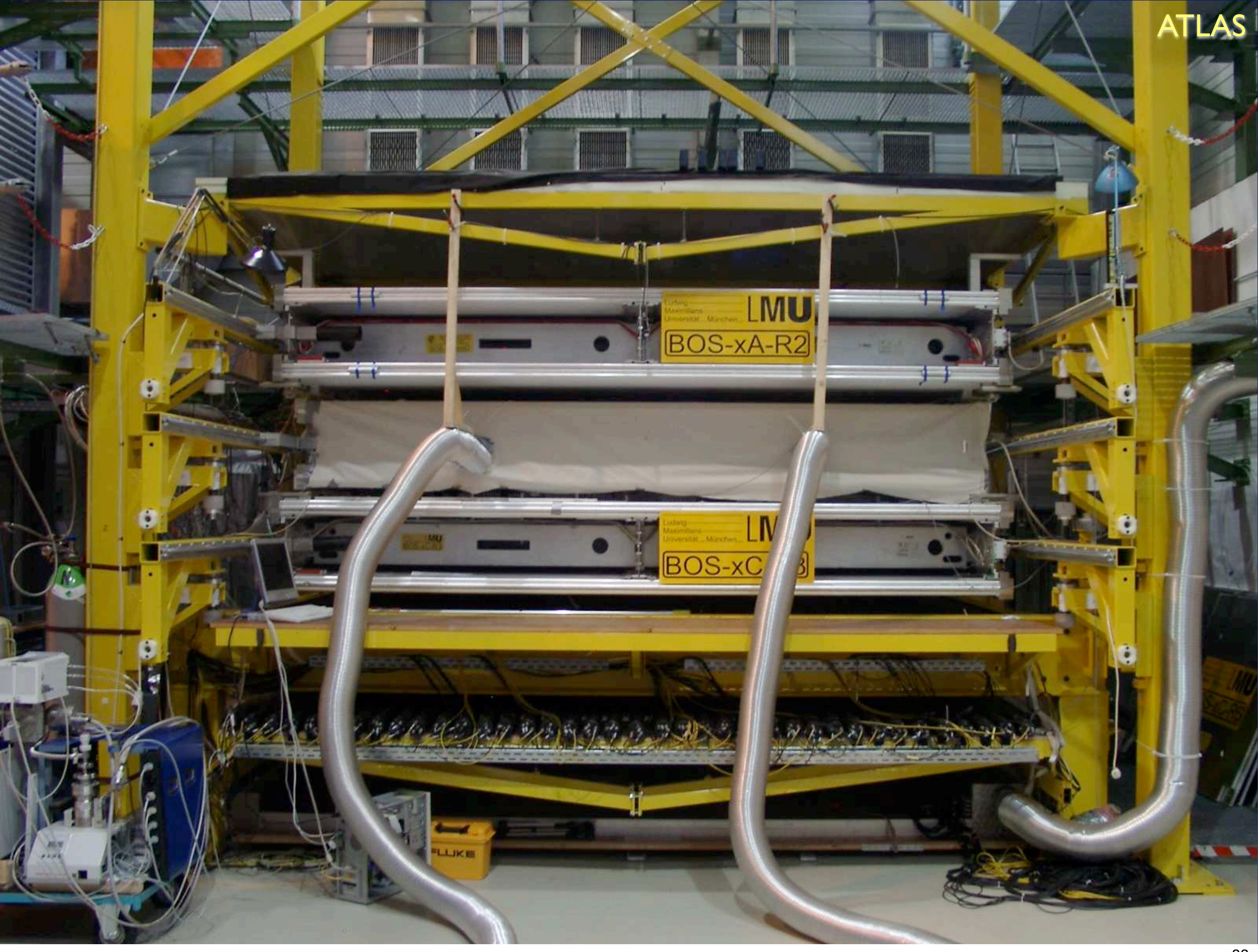

Large Hadron Collider · CERN
proton-proton collisions at 7 TeV/beam
CMS
LHCb
ALICE
ATLAS

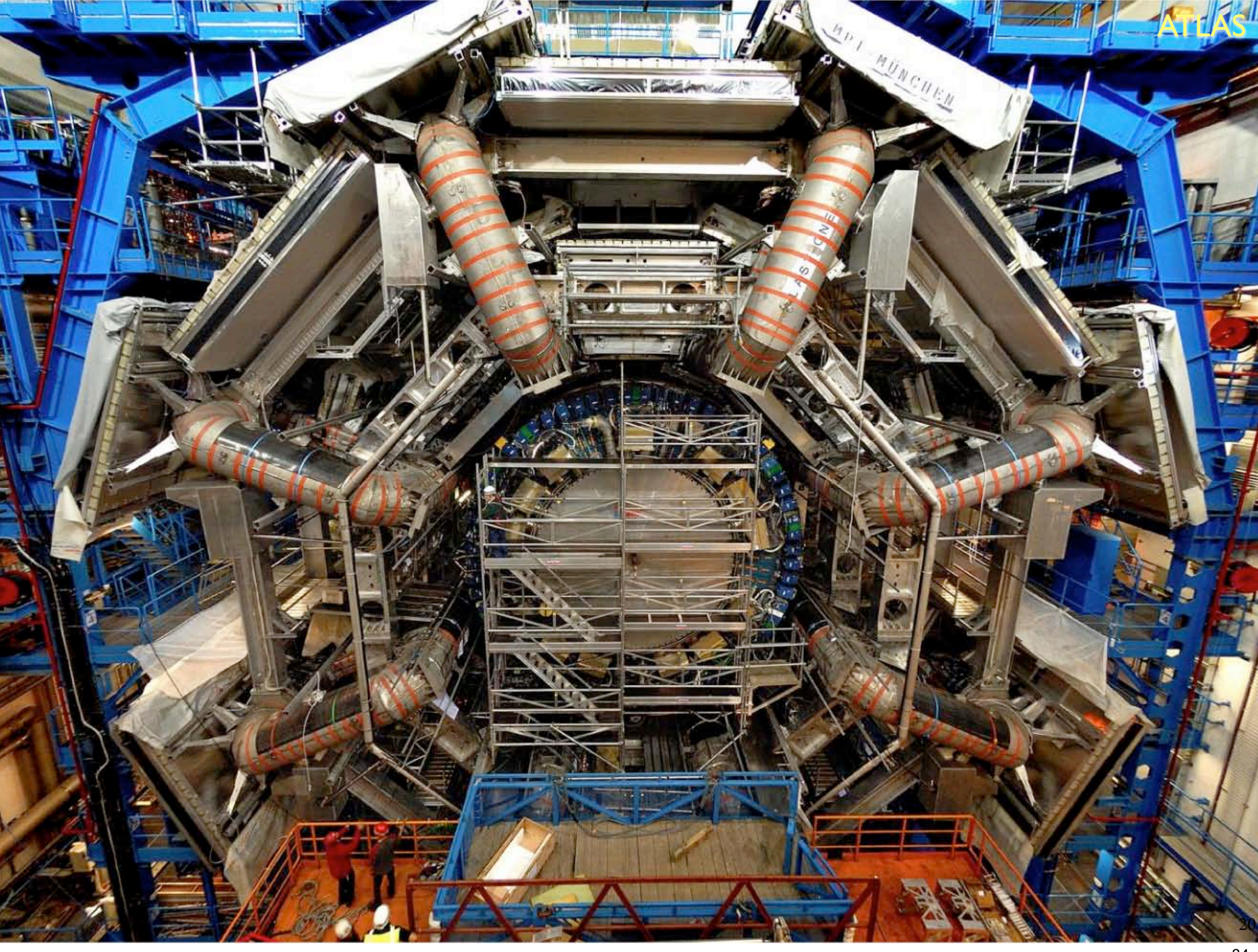

CMS

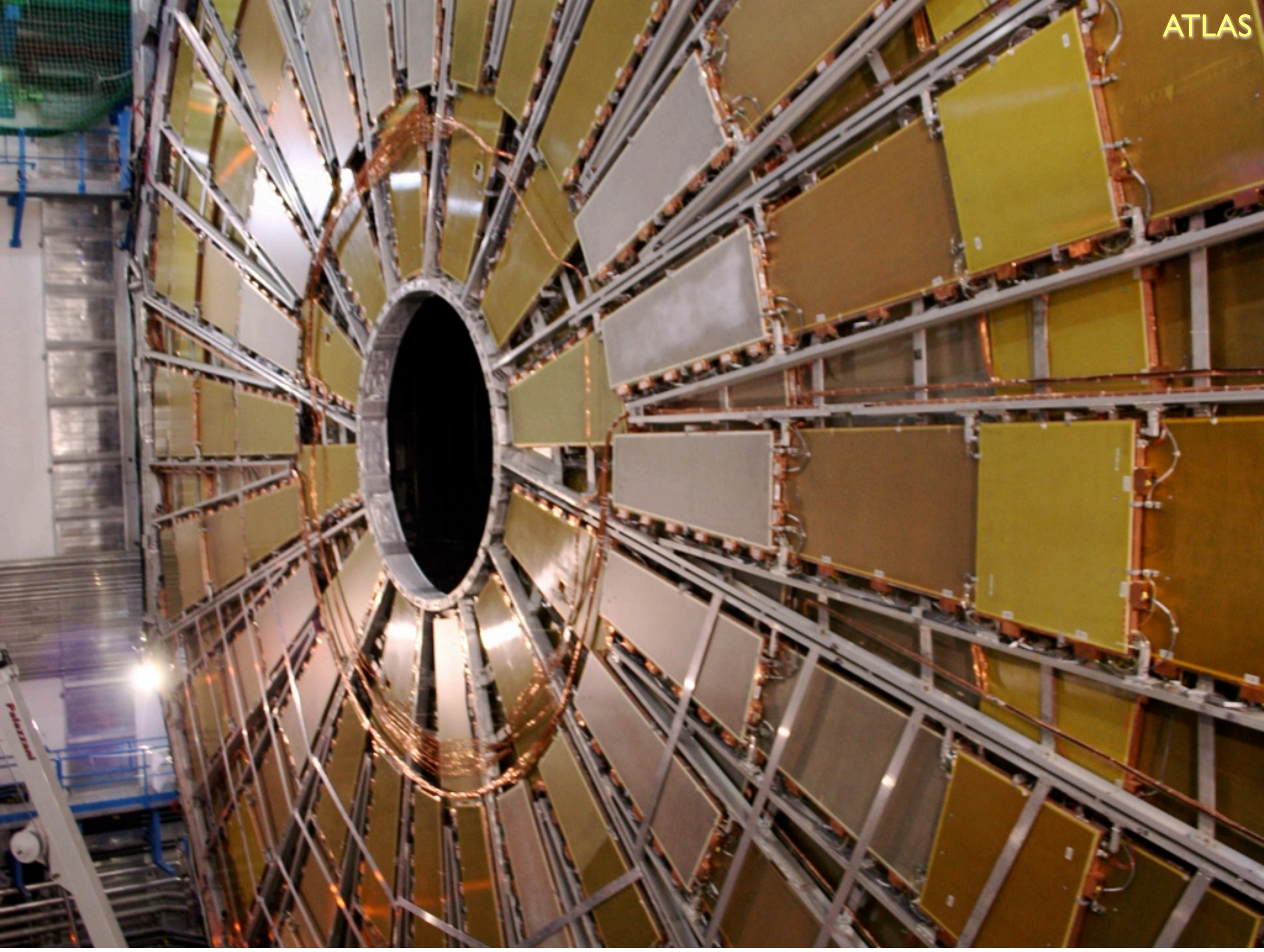

CMS


CMS


ATLAS


ATLAS
LMU
BOS-xA-R2
BOS-xC
FLUKE


ATLAS
MPI-MÜNCHEN


ATLAS

Fabiola Gianotti (ATLAS) : *If we do not find the Higgs boson, that means that the theory is just wrong!*

What hides the electroweak symmetry?

- New kind of force?
- New force from a new symmetry?
- Residual force from strong dynamics?
- Echo of extra spacetime dimensions?

Which path has nature taken?

Without a Higgs mechanism …

Electron and quarks would have no mass

QCD would confine quarks into protons, etc.

Proton mass little changed

Surprise: QCD would hide EW symmetry,

give tiny masses to W, Z

Massless electron: atoms lose integrity

No atoms means no chemistry, no stable composite structures like liquids, solids, …

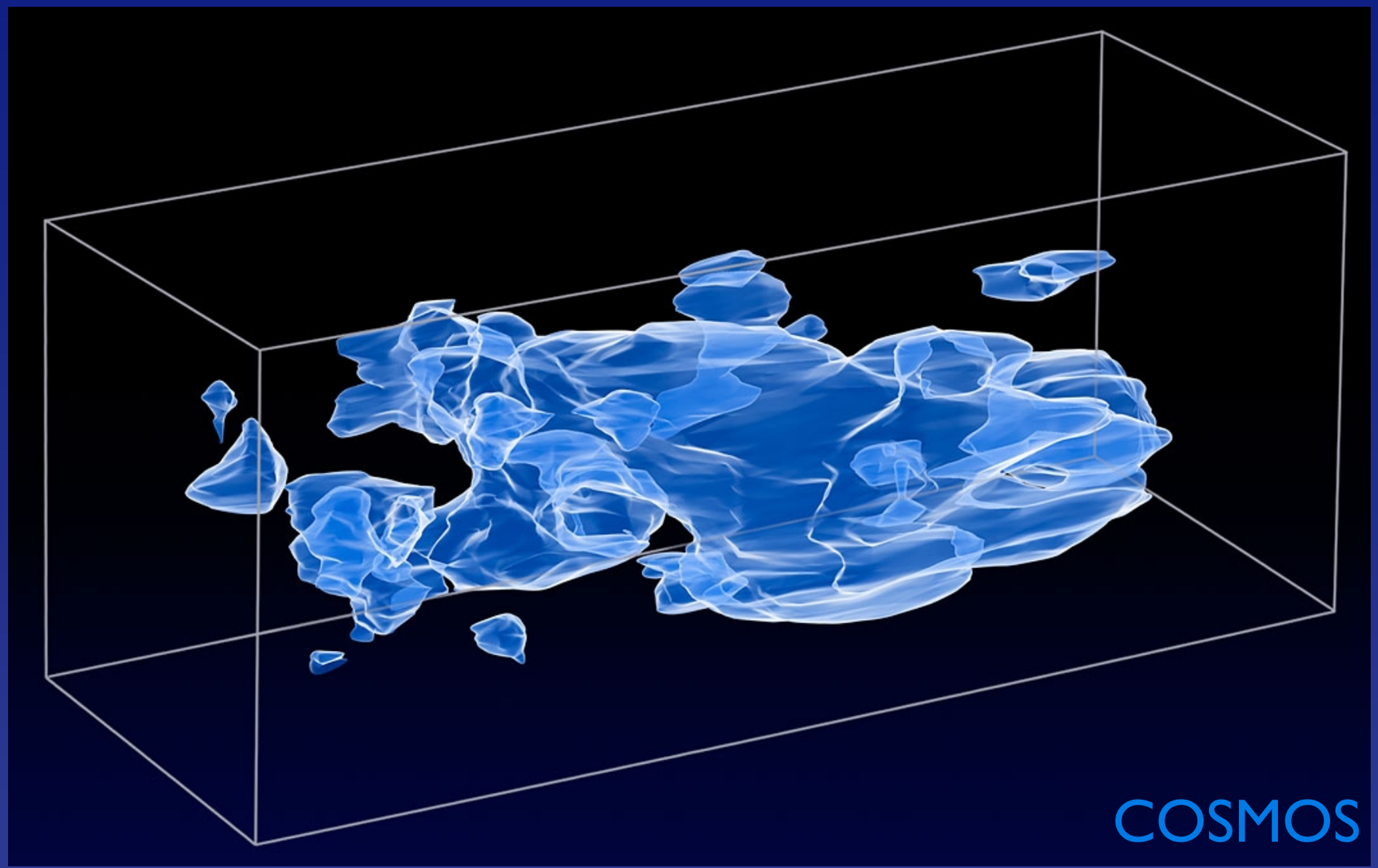
… character of the physical world would be profoundly changed

One "minor" problem

- Higgs field fills all of space with energy density 10^{28} g/liter
- But empty space weighs next to nothing: $< 10^{-26}$ g/liter
- New evidence that vacuum energy is present (accelerating universe)

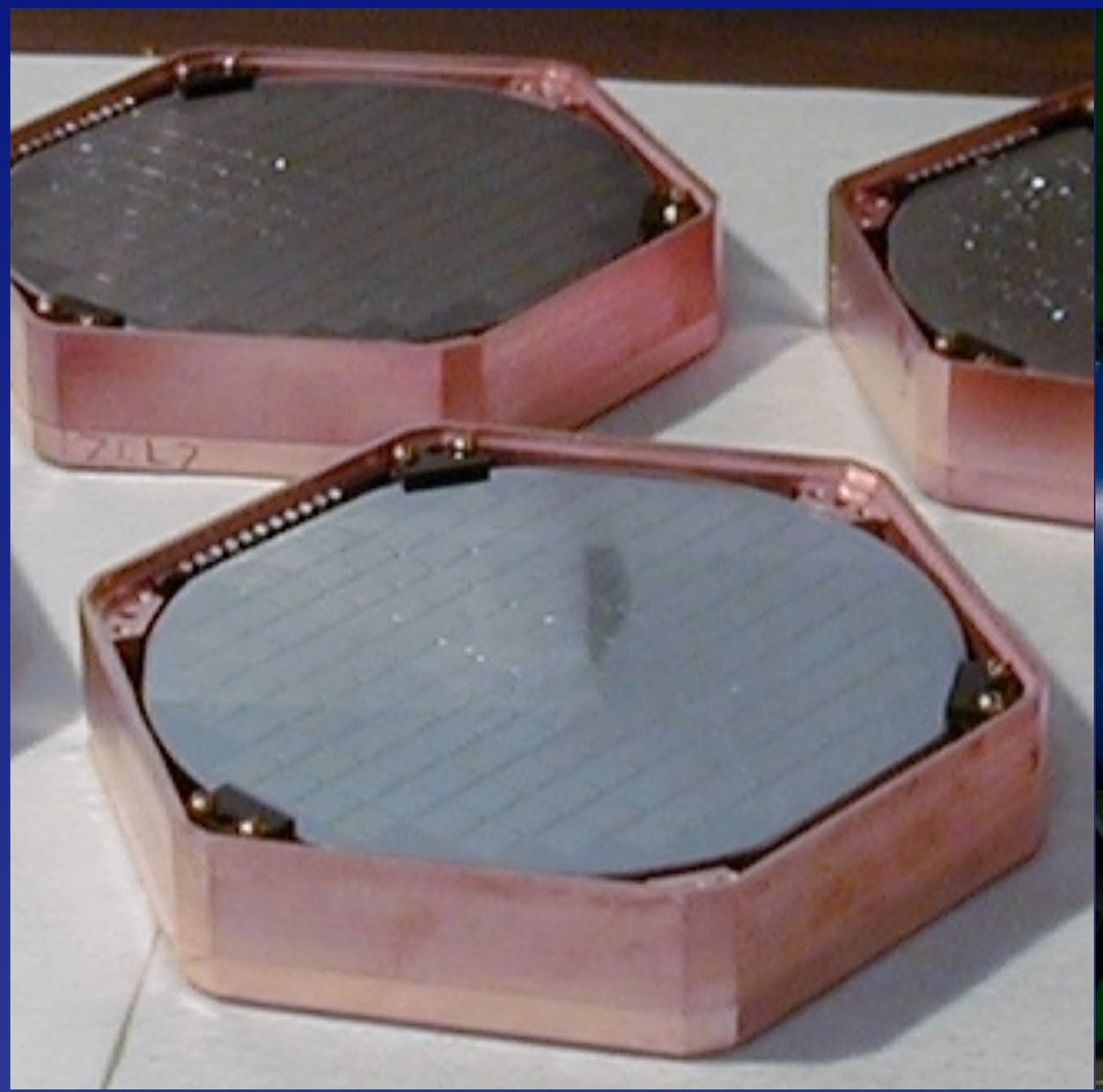
More New physics in the LHC range?

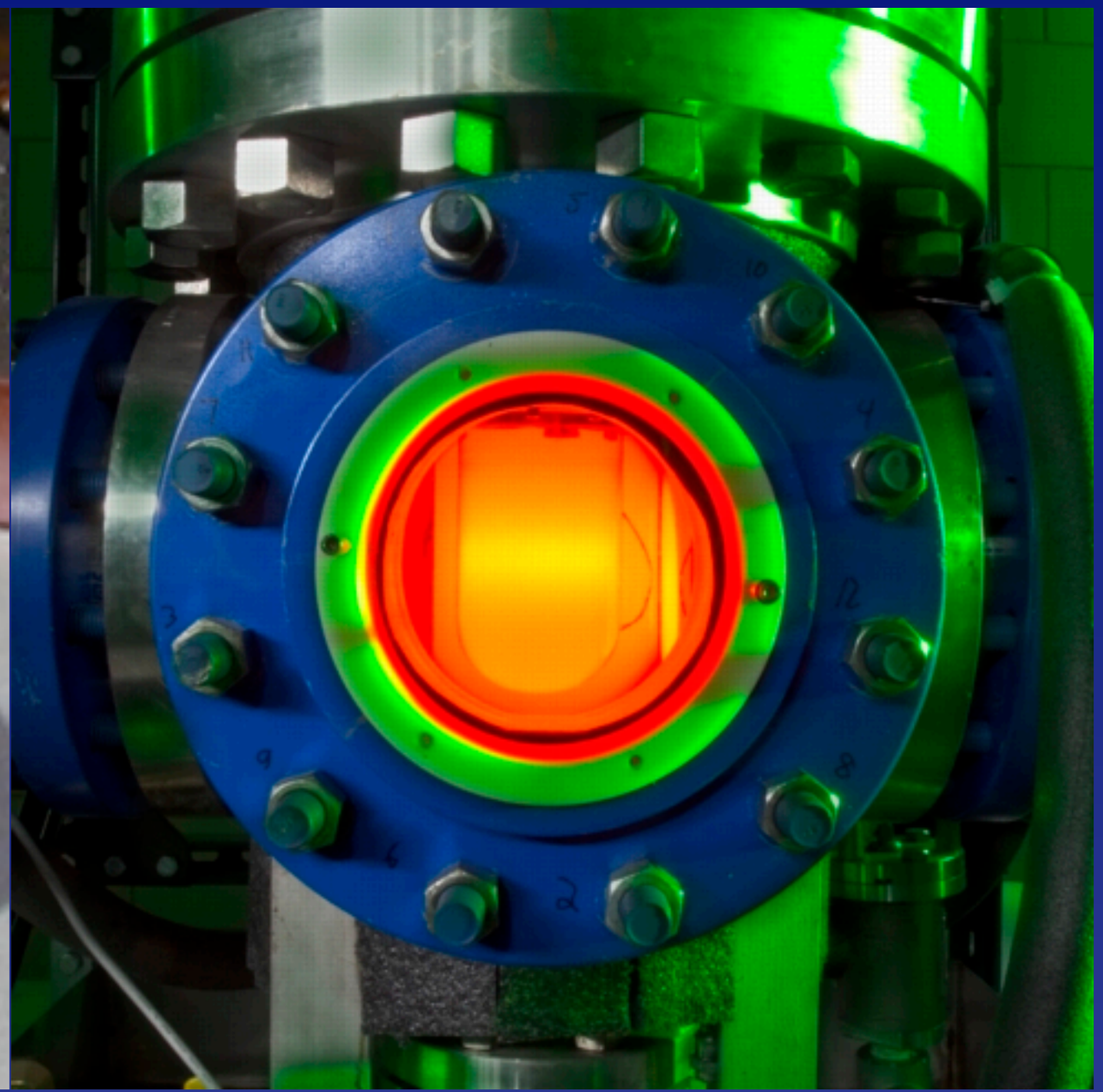
If dark matter interacts weakly …



… its likely mass is 0.1 to 1 TeV

Dark matter relics of the big bang?

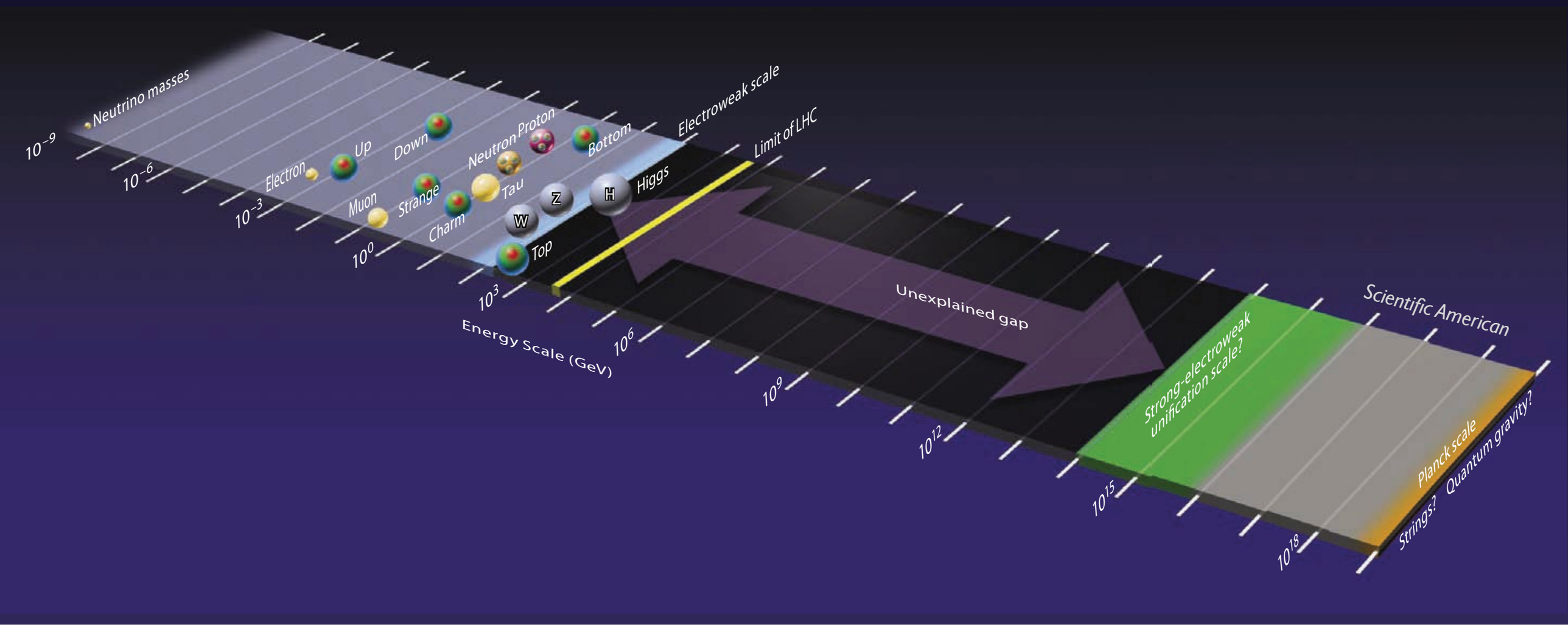




Another "small" challenge:

Does M_H < 1 TeV make sense?

The peril of quantum corrections



How to separate electroweak, higher scales?

Extend electroweak theory on the 1-TeV scale …

composite Higgs boson

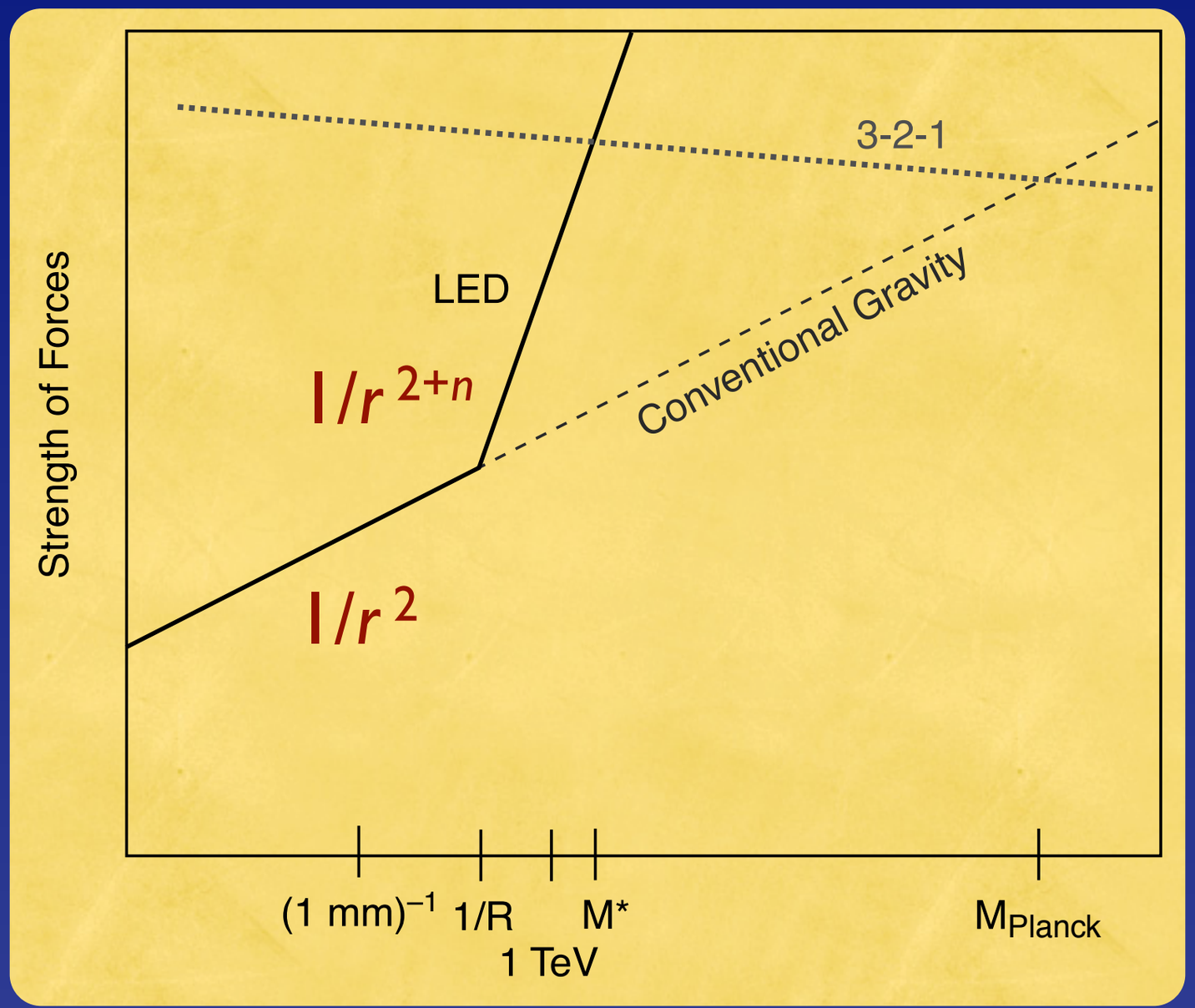
technicolor / topcolor

supersymmetry

…

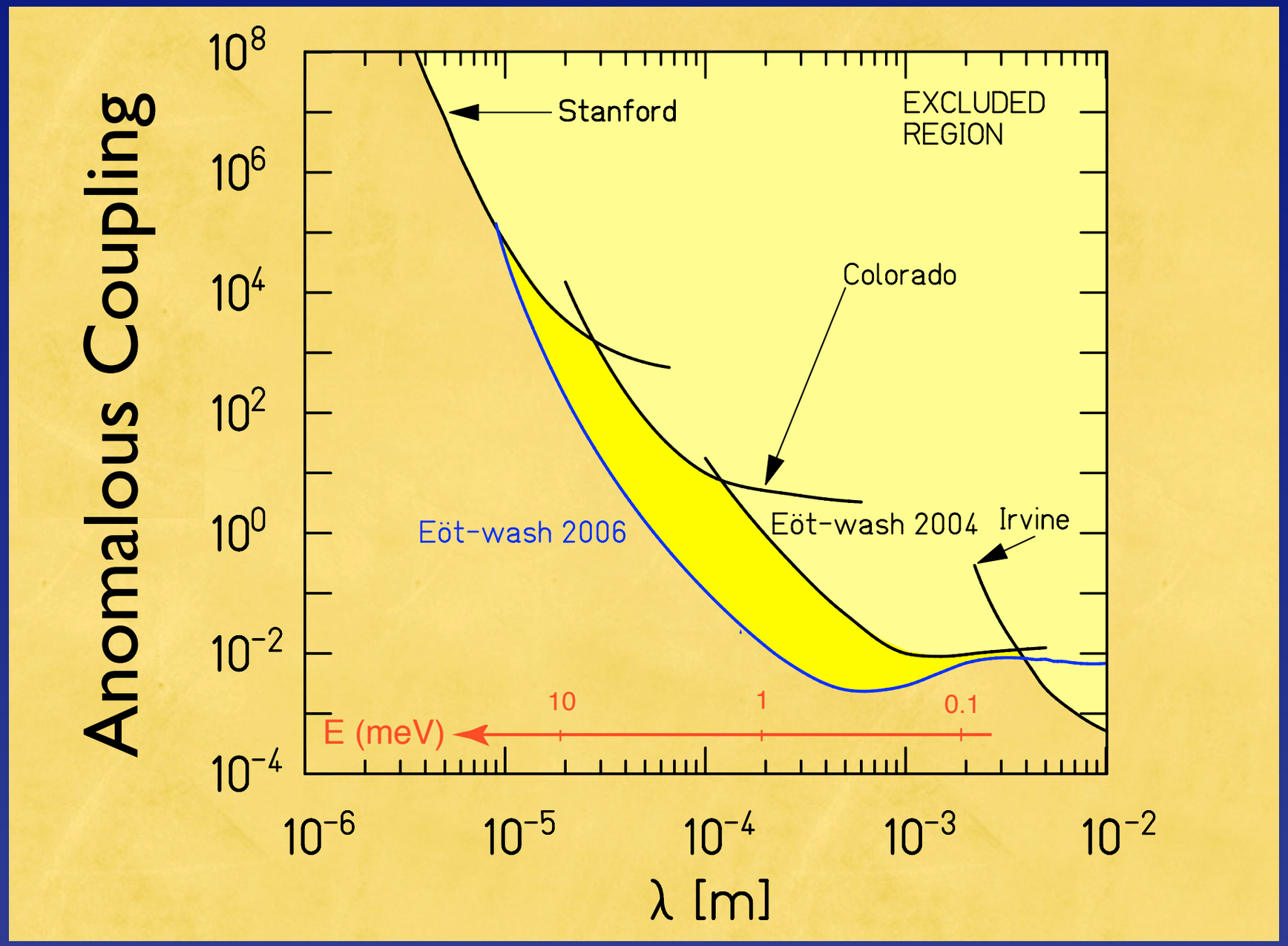
Ask instead why gravity is so weak

Suppose at scale *R* … gravity propagates in 4+*n* dimensions



M_{Planck} would be a mirage!

Gravity follows Newtonian force law down to $\lesssim$ 1 mm



Revolution: the meaning of identity

- What makes a top quark a top quark and an electron an electron?
- Slightly different behavior of matter and antimatter means what?
- Neutrino oscillations add information: key to matter excess in Universe?
- New kinds of matter show us pattern? dark matter, superpartners, …

Mendele'ev didn't know about noble gases

KATRIN aims at 0.2 eV

Revolution:
Unity of Quarks & Leptons

- What do quarks and leptons have in common?
- Why are atoms neutral?
- Extended quark–lepton families: proton decay!

Connections …

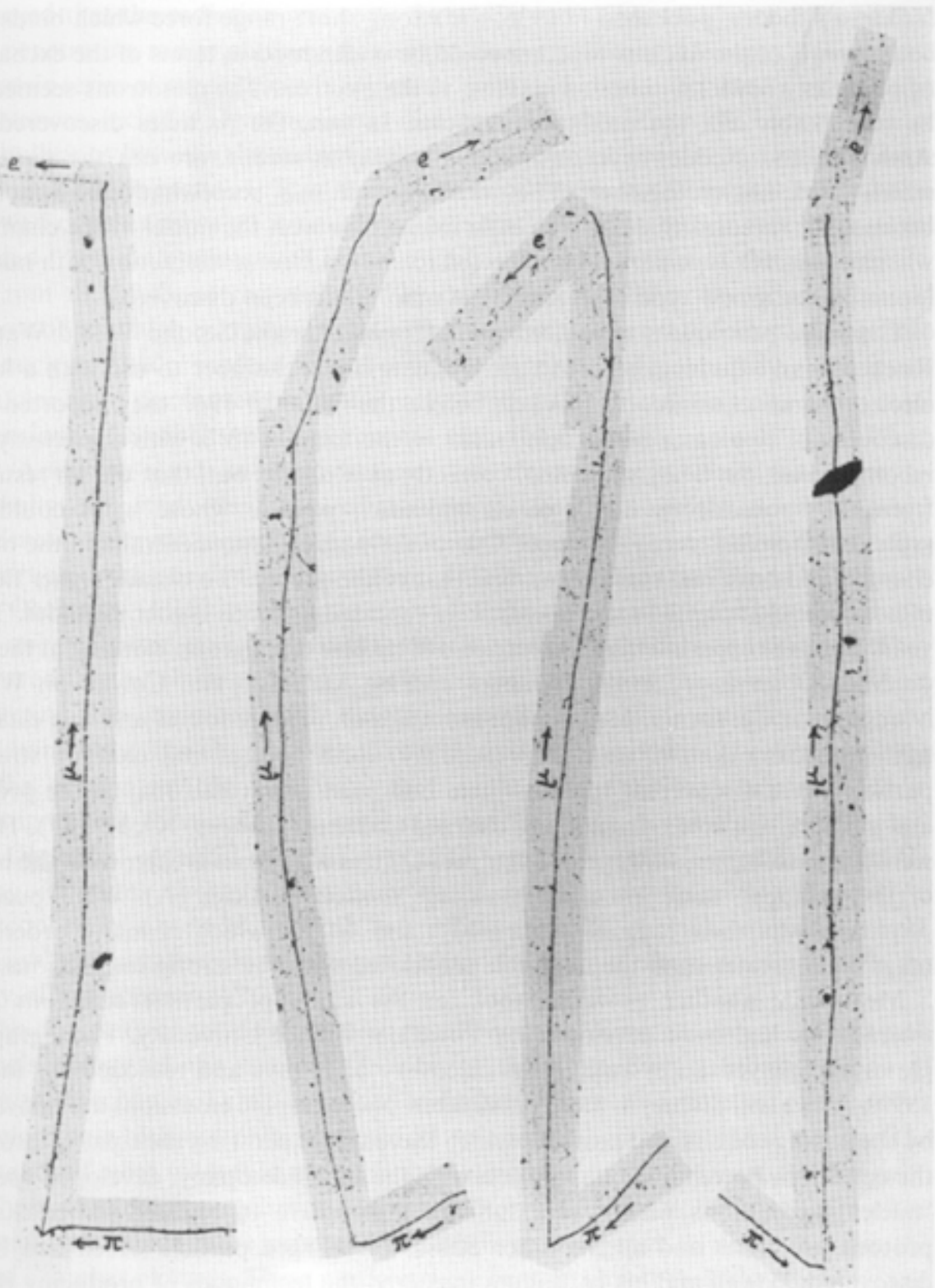


Figure 1.6. Four examples of the decay of a pion into a muon, followed by the subsequent decay of the muon into an electron. These processes were discovered by Powell and his collaborators using nuclear emulsions. (From C. F. Powell, P. H. Fowler and D. H. Perkins (1959). *The study of elementary particles by the photographic method*, page 245, Plate 8-5, Oxford: Pergamon Press.)

"It was as if, suddenly, we had broken into a walled orchard, where protected trees had flourished and all kinds of exotic fruits had ripened in great profusion."

— Cecil Powell
1950 Nobel Prize

Special Report

THE COMING REVOLUTIONS IN PARTICLE PHYSICS

The current Standard Model of particle physics begins to unravel when probed much beyond the range of current particle accelerators. So no matter what the Large Hadron Collider finds, it is going to take physics into new territory **By Chris Quigg**

KEY CONCEPTS

- The Large Hadron Collider (LHC) is certain to find *something* new and provocative as it presses into unexplored territory.
- The Standard Model of particle physics requires a particle known as the Higgs boson, or a stand-in to play its role, at energies probed by the LHC. The Higgs, in turn, poses deep questions of its own, whose answers should be found in the same energy range.
- These phenomena revolve around the question of symmetry. Symmetries underlie the interactions of the Standard Model but are not always reflected in the operation of the model. Understanding why not is a key question.

—The Editors

When physicists are forced to give a single-word answer to the question of why we are building the Large Hadron Collider (LHC), we usually reply "Higgs." The Higgs particle—the last remaining undiscovered piece of our current theory of matter—is the marquee attraction. But the full story is much more interesting. The new collider provides the greatest leap in capability of any instrument in the history of particle physics. We do not know what it will find, but the discoveries we make and the new puzzles we encounter are certain to change the face of particle physics and to echo through neighboring sciences.

In this new world, we expect to learn what distinguishes two of the forces of nature—electromagnetism and the weak interactions—with broad implications for our conception of the everyday world. We will gain a new understanding of simple and profound questions: Why are there atoms? Why chemistry? What makes stable structures possible?

The search for the Higgs particle is a pivotal step, but only the first step. Beyond it lie phenomena that may clarify why gravity is so much weaker than the other forces of nature and that could reveal what the unknown dark matter that fills the universe is. Even deeper lies the prospect of insights into the different forms of matter, the unity of outwardly distinct particle categories and the nature of spacetime. The questions in play all seem linked to one another and to the knot of problems that motivated the prediction of the Higgs particle to begin with. The LHC will help us refine these questions and will set us on the road to answering them.

The Matter at Hand

What physicists call the "Standard Model" of particle physics, to indicate that it is still a work in progress, can explain much about the known world. The main elements of the Standard Model fell into place during the heady days of the 1970s and 1980s, when waves of landmark experimental discoveries engaged emerging theoretical ideas in productive conversation. Many particle physicists look on the past 15 years as an era of consolidation in contrast to the ferment of earlier decades. Yet even as the Standard Model has gained ever more experimental support, a growing list of phenomena lies outside its purview, and new theoretical ideas have expanded our conception of what a richer and more comprehensive worldview might look like. Taken together, the continuing progress in experiment and theory point to a very lively decade ahead. Perhaps we will look back and see that revolution had been brewing all along.

Our current conception of matter comprises two main particle categories, quarks and leptons, together with three of the four known fundamental forces, electromagnetism and the strong and weak interactions [*see box on page 48*]. Gravity is, for the moment, left to the side. Quarks, which make up protons and neutrons, generate and feel all three forces. Leptons, the best known of which is the electron, are immune to the strong force. What distinguishes these two categories is a property akin to electric charge, called color. (This name is metaphorical; it has nothing to do with ordinary colors.) Quarks have color, and leptons do not.

The guiding principle of the Standard Model

TEILCHENPHYSIK

Weltbild *vor dem* Umbruch

Theoretische Untersuchungen und experimentelle Hinweise lassen erwarten, dass das Standardmodell der Elementarteilchen jenseits der Energien bisheriger Beschleuniger in Schwierigkeiten kommt. Was immer also der im September eingeweihte Large Hadron Collider findet – es wird die Physik in Neuland führen.

In Kürze

- Der Large Hadron Collider (LHC) stößt in experimentelles Neuland vor. Was immer er an Ergebnissen liefert, **wird die Physik verändern**.
- Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik muss in dem Energiebereich, der mit dem LHC zugänglich ist, ein Teilchen namens **Higgs-Boson** existieren. Dieses wiederum wirft weitere, tiefer gehende Fragen auf, deren Beantwortung der neue Beschleuniger ebenfalls ermöglichen sollte.
- Im Mittelpunkt stehen dabei die Symmetrien, die den Wechselwirkungen im Standardmodell zu Grunde liegen, sich aber nicht immer in der Realität widerspiegeln. Den Grund für die **Symmetriebrechung** zu finden, ist eines der Hauptziele, das die Forscher mit dem LHC verfolgen.

Von Chris Quigg

Sollen Physiker mit einem Wort begründen, warum der Large Hadron Collider gebaut wurde, sagen sie sehr wahrscheinlich: Higgs. Das Higgs-Teilchen ist der letzte unentdeckte Bestandteil unserer gegenwärtigen Theorie der Materie, die Attraktion auf dem Jahrmarkt der Teilchenphysik. Doch der neue Beschleuniger, der den größten Sprung aller Zeiten im Leistungsvermögen einer solchen Teilchenschleuder verkörpert, verspricht noch weitaus mehr. Was genau er uns bescheren wird, wissen wir zwar nicht. Aber mit Sicherheit sind Entdeckungen und neue Rätsel dabei, welche die Teilchenphysik umkrempeln und auch in den Nachbardisziplinen erhebliche Wellen schlagen werden.

In der neuen Welt, die wir damit betreten, werden wir vermutlich erfahren, was die Trennung zwischen zwei der vier fundamentalen Naturkräfte – schwache und elektromagnetische Wechselwirkung – verursacht. Daraus ergeben sich auch neue Antworten auf einfache, grundlegende Fragen wie: Warum gibt es Atome? Warum Chemie? Wieso existiert überhaupt stabile Materie?

Der Nachweis des Higgs-Teilchens ist dabei ein entscheidender Schritt – aber nur der erste. Jenseits davon liegen Phänomene, die uns vielleicht eine Erklärung dafür liefern, warum die Gravitation so viel schwächer ist als die anderen Naturkräfte und woraus die geheimnisvolle Dunkle Materie besteht, die das Universum erfüllt. Noch tiefer geht die Hoffnung, Einsichten in das Wesen der unterschiedlichen Arten von Materie, in das verbindende Element zwischen äußerlich grundverschiedenen Teilchenkategorien und in die Natur der Raumzeit zu erlangen. All die großen Fragen in der heutigen Physik und Kosmologie scheinen sowohl untereinander als auch mit der Theorie, die einst zur Vorhersage des Higgs-Teilchens führte, verknüpft zu sein. Der LHC wird uns helfen, diese Fragen zu verfeinern, und den Weg zu den Antworten aufzeigen.

Was die Physiker als »Standardmodell« der Teilchenphysik bezeichnen – um seinen vorläufigen Charakter anzudeuten –, liefert eine beeindruckende Deutung vieler Aspekte unserer Welt. Seine Hauptelemente kristallisierten sich in der aufregenden Zeit der 1970er und 1980er Jahre heraus, als eine Flut bahnbrechender experimenteller Befunde zu produktiven Diskussionen anregte, aus denen faszinierende neue Ideen erwuchsen. Vielen Teilchenphysikern erscheinen die vergangenen 15 Jahre nach dem kreativen Gären in den Jahrzehnten davor als Ära der Konsolidierung. Dabei gab es reichlich experimentelle Bestätigungen für das Standardmodell. Doch zugleich mehrten sich die Hinweise auf Phänomene jenseits seines Geltungsbereichs, und neue Theorien vermittelten eine Vorstellung davon, wie ein umfassenderes, vollständigeres Weltbild aussehen könnte.

Zusammengenommen lassen die Entwicklungen im experimentellen wie theoretischen Bereich erwarten, dass uns wieder ein ausgesprochen lebhaftes Jahrzehnt bevorsteht. Vielleicht werden wir erst im Rückblick erkennen, wie lange sich die Revolution schon angebahnt hat.

Nach heutiger Vorstellung besteht Materie hauptsächlich aus zwei Arten von Teilchen: Quarks und Leptonen. Sie werden von drei der vier fundamentalen Naturkräfte zusammengehalten, nämlich dem Elektromagnetismus so-

Thanks to …

Eric Weeks for the film of Brownian motion
www.physics.emory.edu/~weeks

Angela Gonzales for the pearl in a bottle

J. D. Jackson for the photo of Peter Higgs