در بزرگترین آزمایشگاه فیزیک ذرات دنیا چه می‌گذرد؟

عبیده جعفری

مدرسه تابستانی افق‌های نو در فیزیک

۲۸ مرداد ۱۴۰۲

HELMHOLTZ
SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN

Isfahan University of Technology

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا: بزرگترین آزمایشگاه فیزیک ذرات

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

پایان جنگ جهانی دوم
۱۹۴۵

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

پایان جنگ جهانی دوم
۱۹۴۵

صلح زیر چتر علم ...
۱۹۴۹

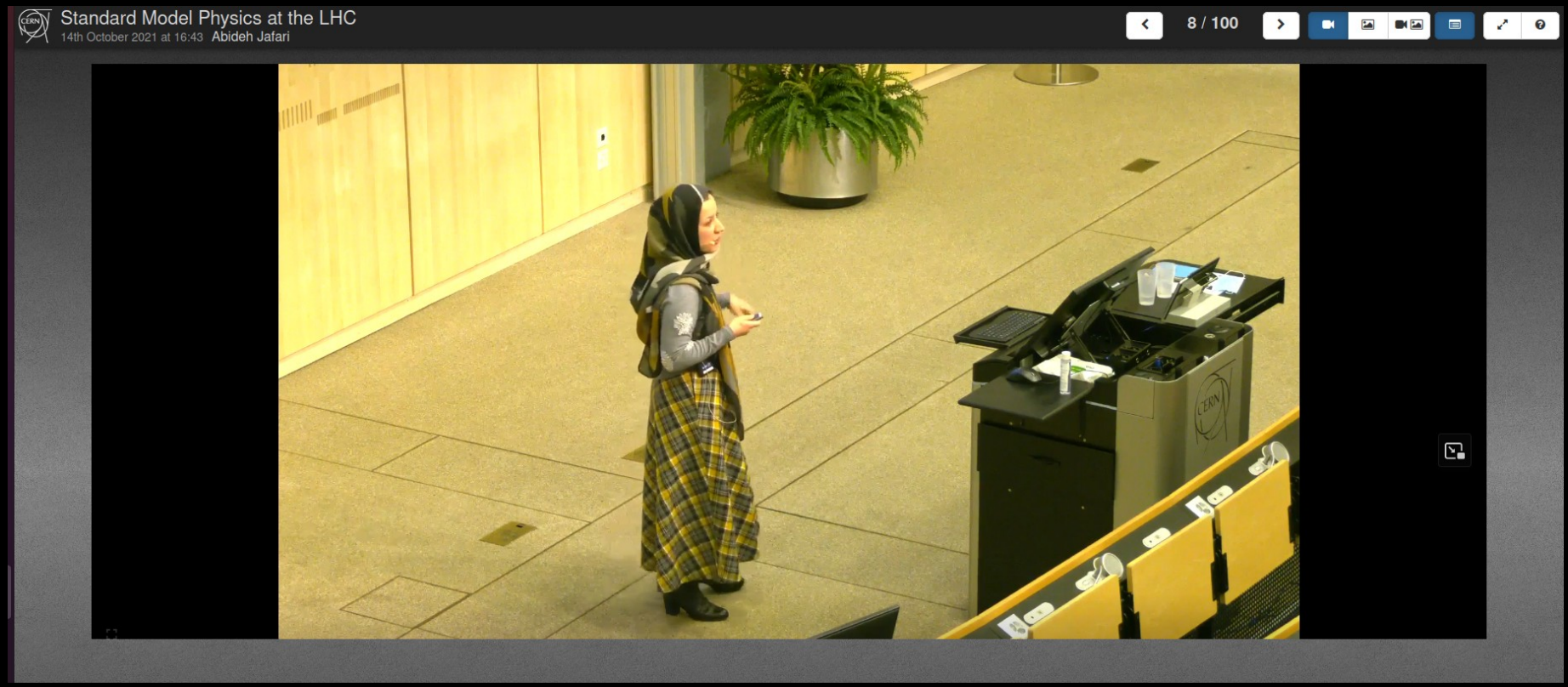
مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

۱۹۵۴

۱۹۷۱

سخنرانی هایزنبرگ در افتتاحیه یکی از
نخستین شتابگرهای سرن

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ



۲۰۲۱

سخنرانی جعفری در پنجاهمین سالگرد
افتتاح همان شتابگر سرن

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

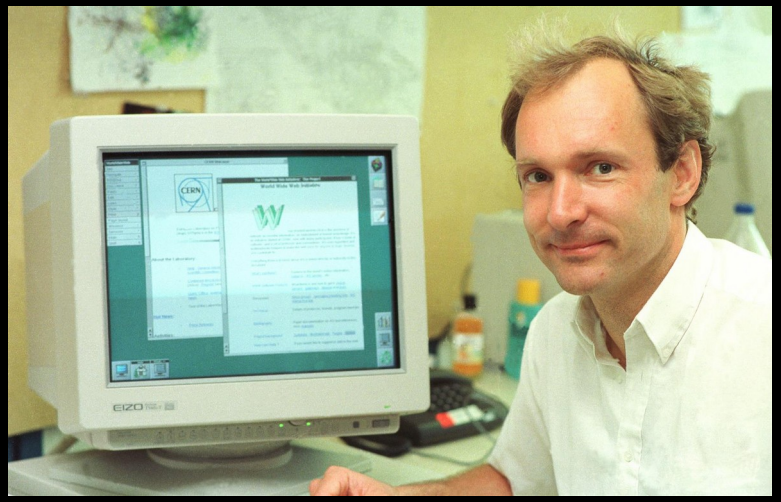
۱۹۸۴

جایزه نوبل برای کشف بوزونهای W و Z

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

۱۹۸۴

جایزه نوبل برای کشف بوزونهای W و Z



۱۹۸۹

پیدایش شبکه جهانی

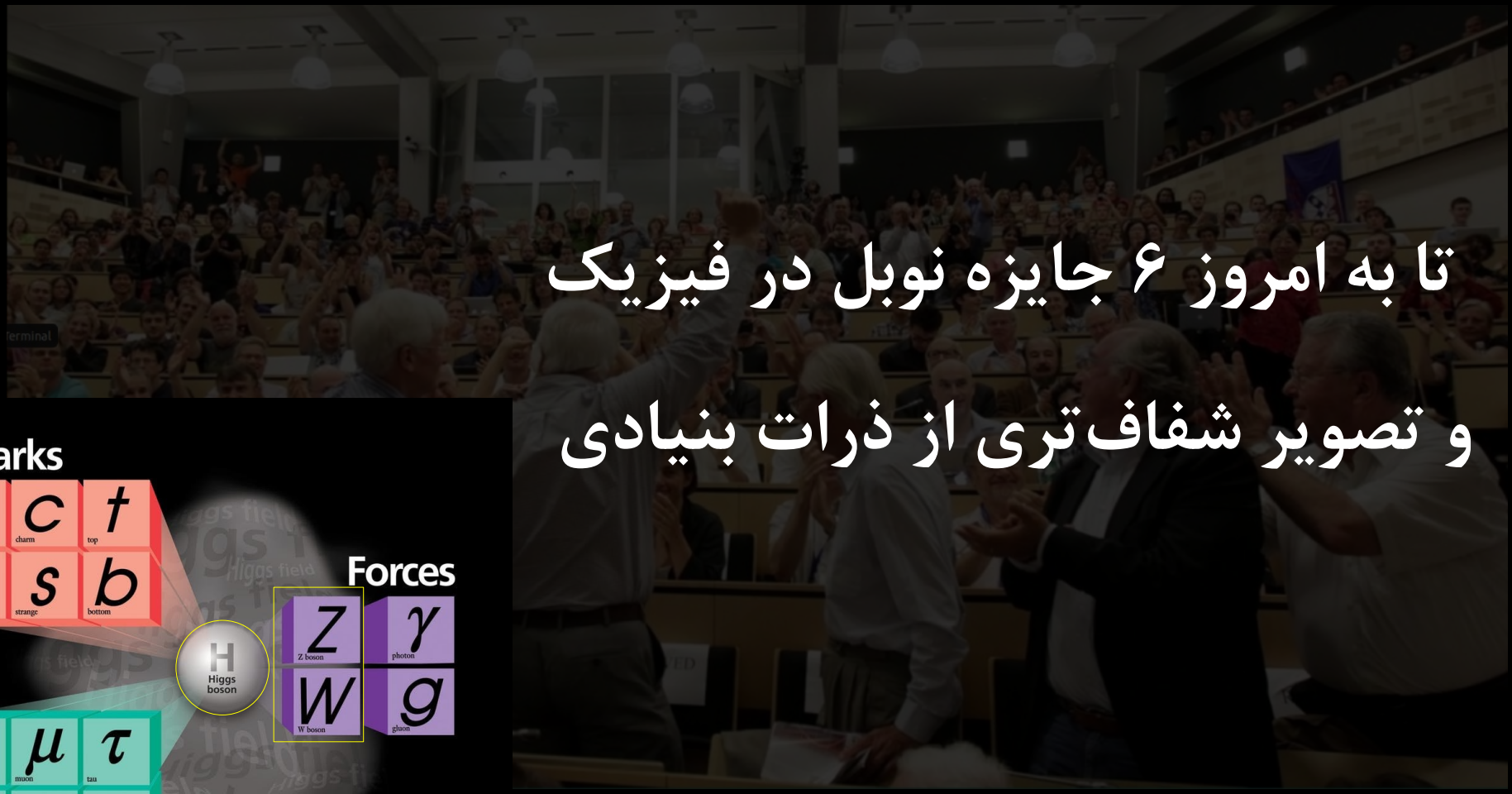
World Wide Web

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ

۲۰۱۳

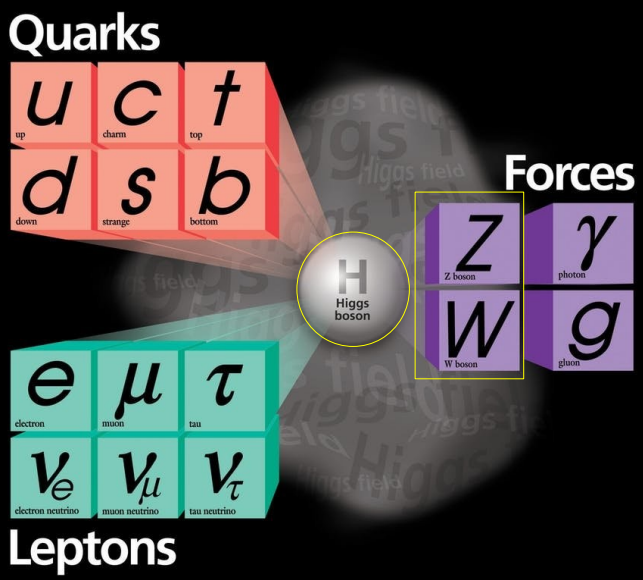
جایزه نوبل برای کشف بوزون هیگز

مرکز تحقیقات هسته‌ای اروپا در گذر تاریخ



تا به امروز ۶ جایزه نوبل در فیزیک

و تصویر شفاف‌تری از ذرات بنیادی



۲۰۱۳

جایزه نوبل برای کشف بوزون هی

برخورددهنده بزرگ هادرونی

پرچمدار مهمترین پژوهش‌های فیزیک ذرات

برخورددهنده بزرگ هادرونی

پرچمدار مهمترین پژوهش‌های فیزیک ذرات

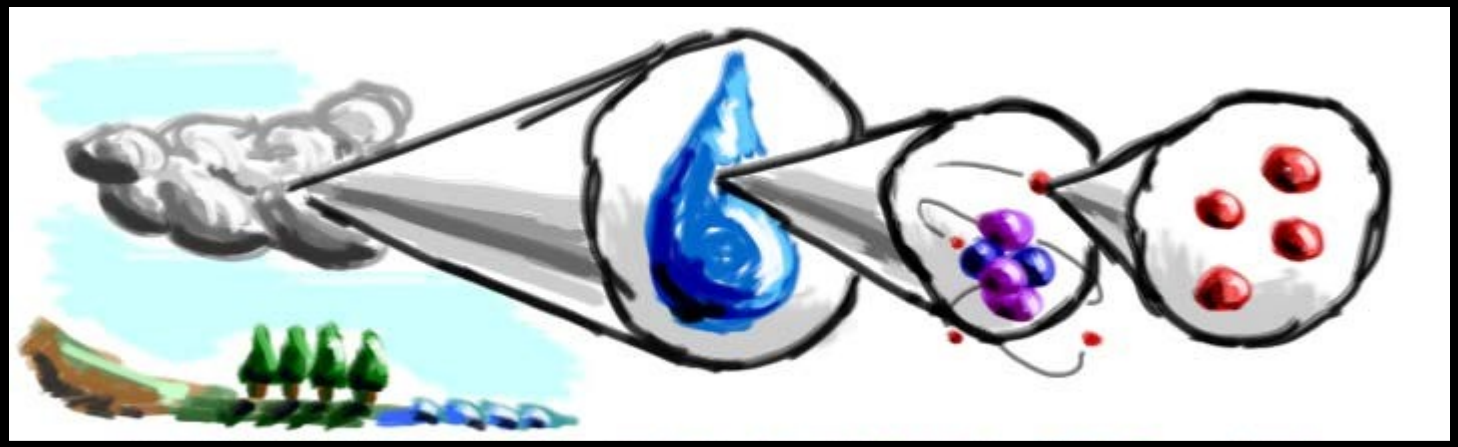
دارای ۴ آزمایش اصلی که دوتای آن چندمنظوره‌اند

سال ۲۰۰۱

پیوستن ایران به آزمایش
سی.ام.اس
از طریق آی.پی.ام

سال ۲۰۱۹ دانشگاه صنعتی اصفهان بعنوان **اولین** دانشگاه ایرانی به آزمایش CMS پیوست

سؤالات اساسی

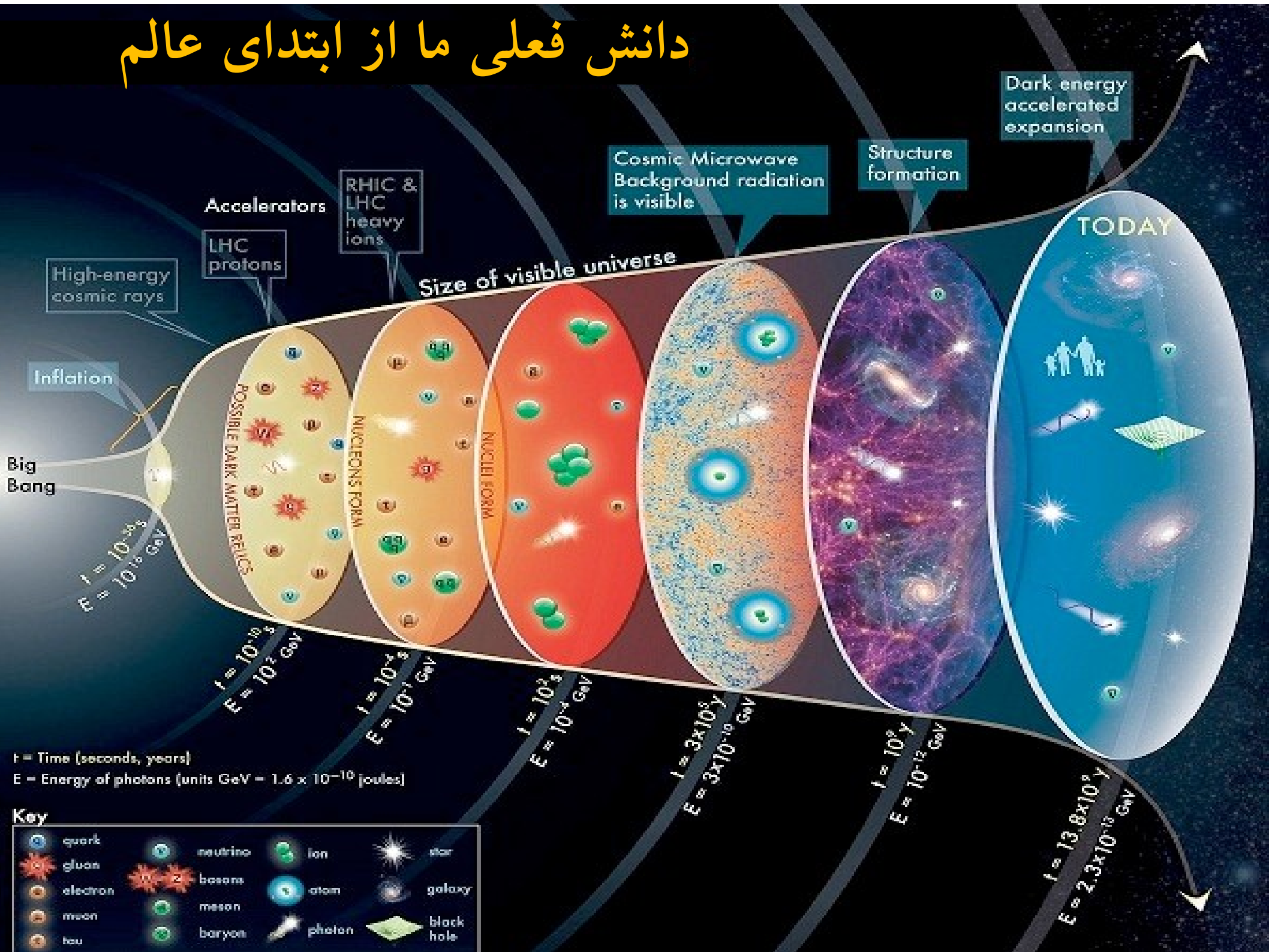


جهان از چه تشکیل شده است؟

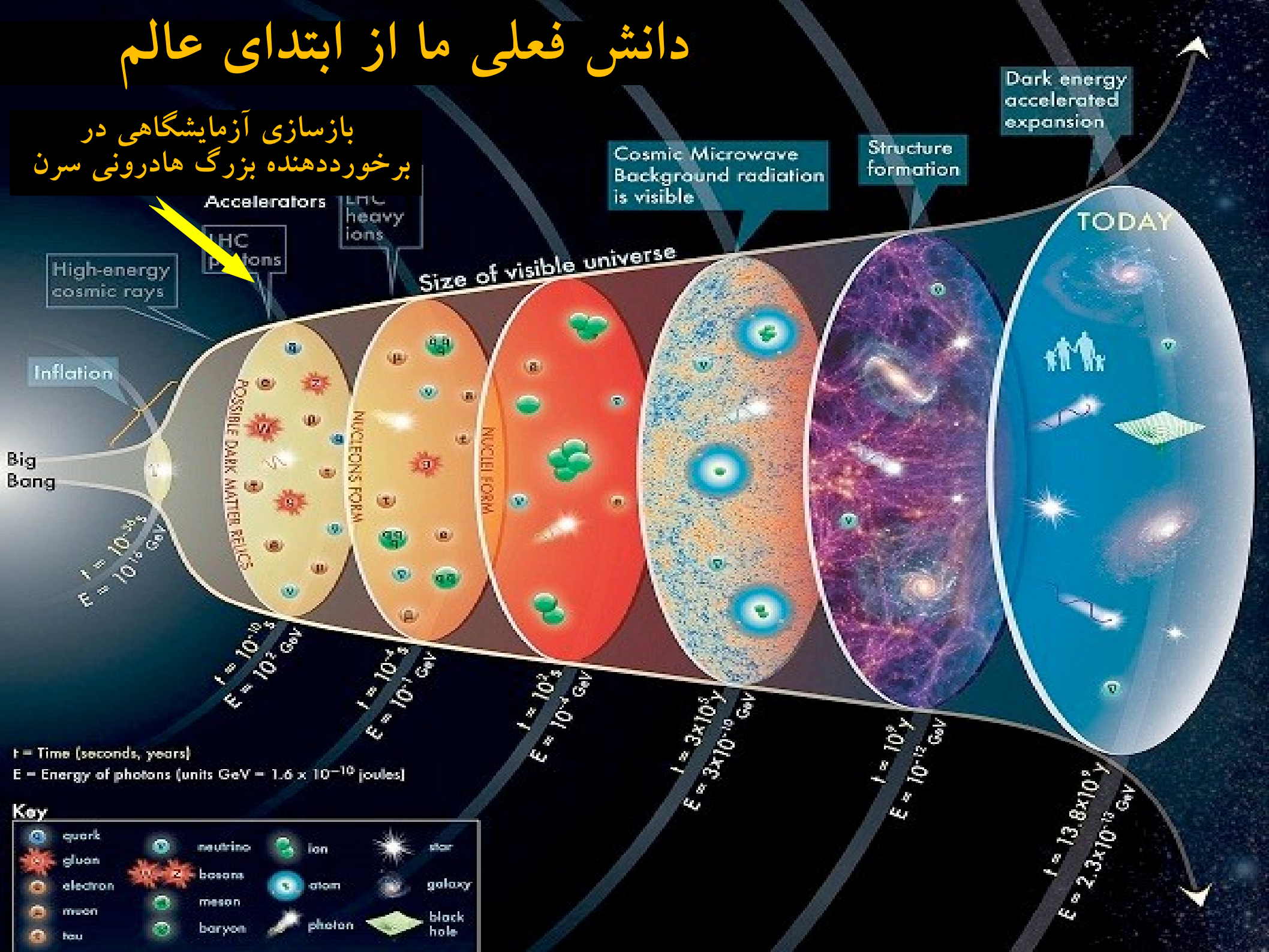
چه برهمکنشهایی بین اجزای آن وجود دارد؟

شرایط ابتدایی عالم پس از انفجار بزرگ
چگونه بوده است؟

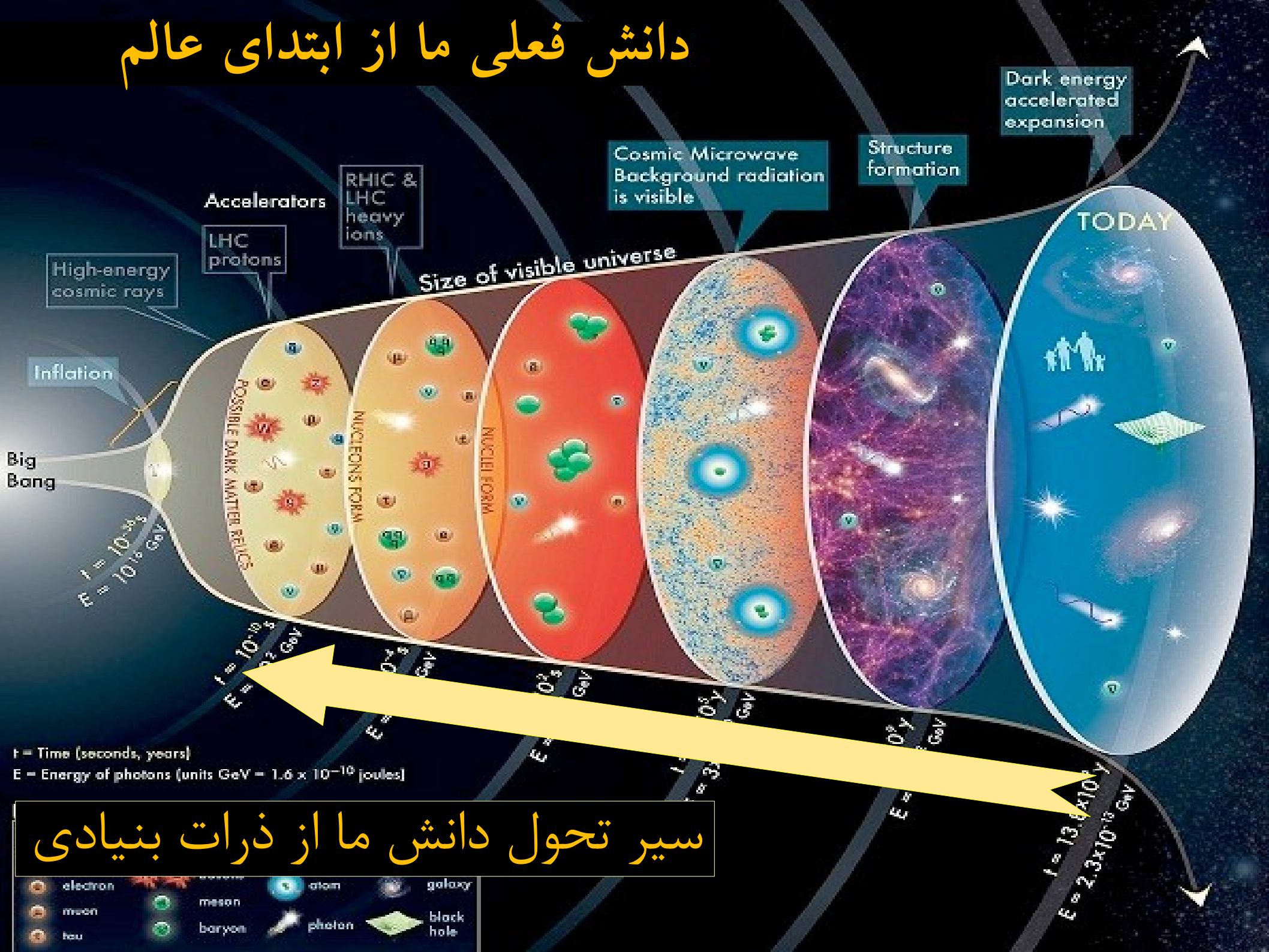
دانش فعلی ما از ابتدای عالم



دانش فعلی ما از ابتدای عالم



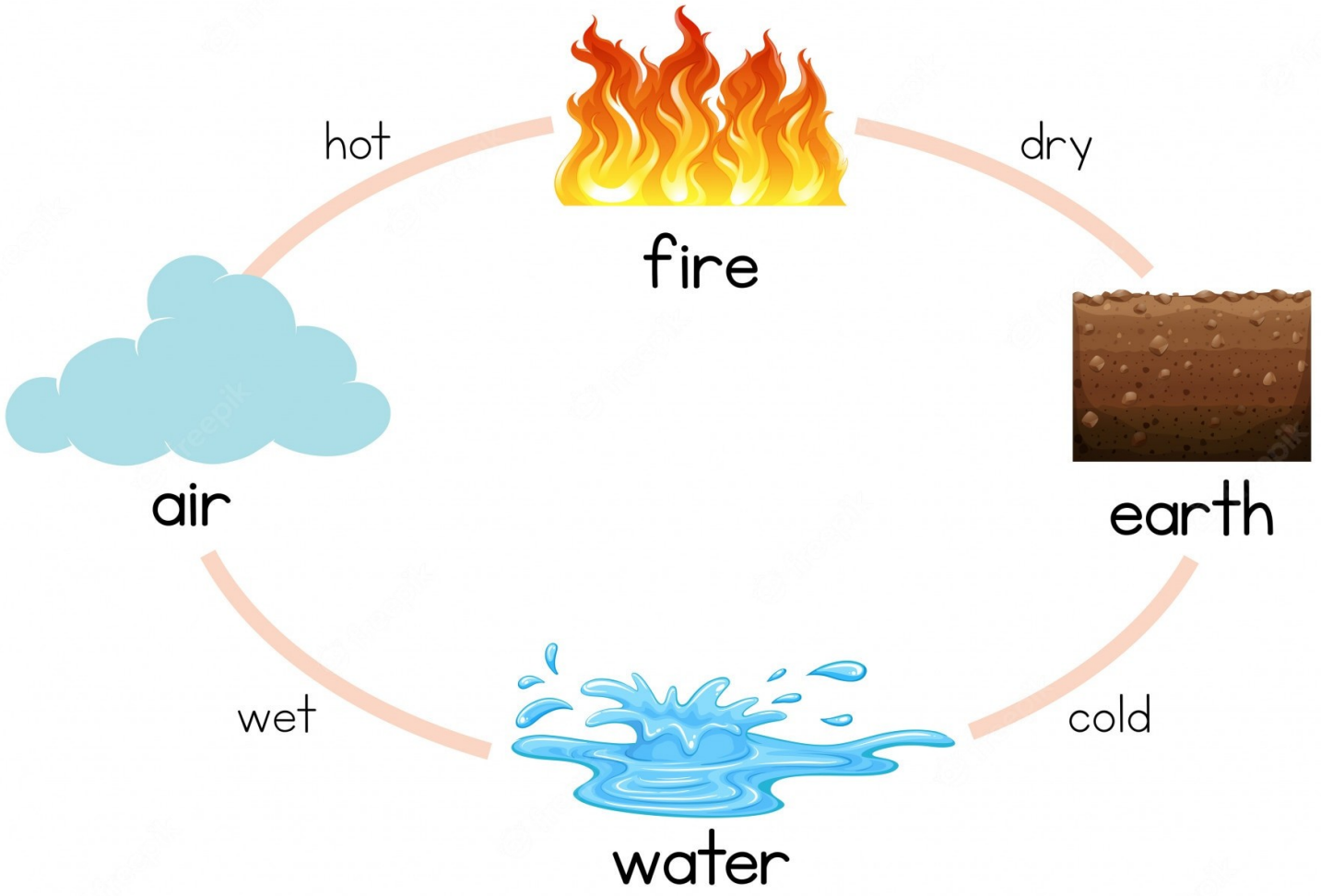
دانش فعلی ما از ابتدای عالم



سیر تحول دانش ما از ذرات بنیادی

در جستجوی یک تصویر واحد و کامل از طبیعت

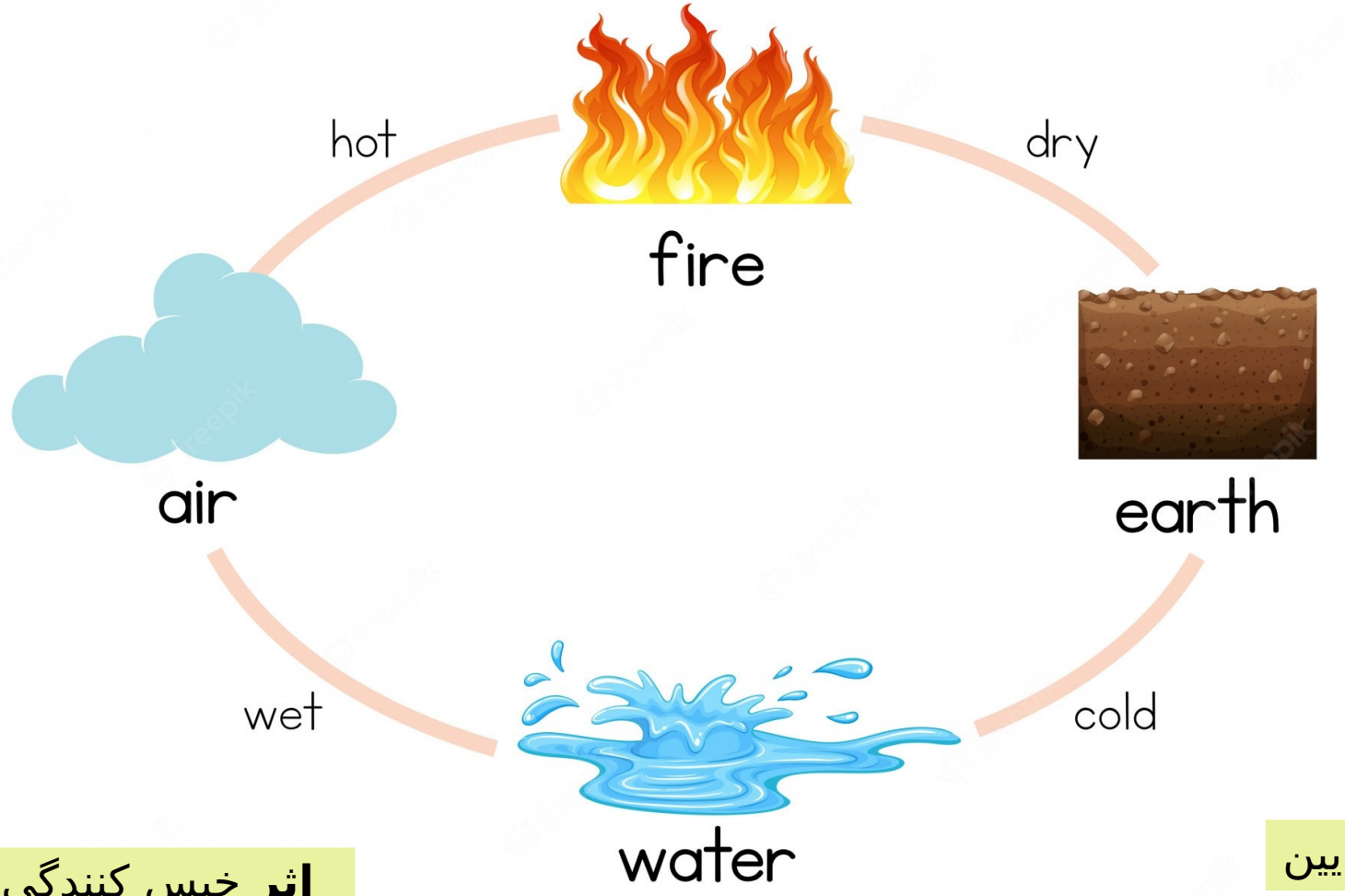
نگاه ارسطویی



در جستجوی یک تصویر واحد و کامل از طبیعت

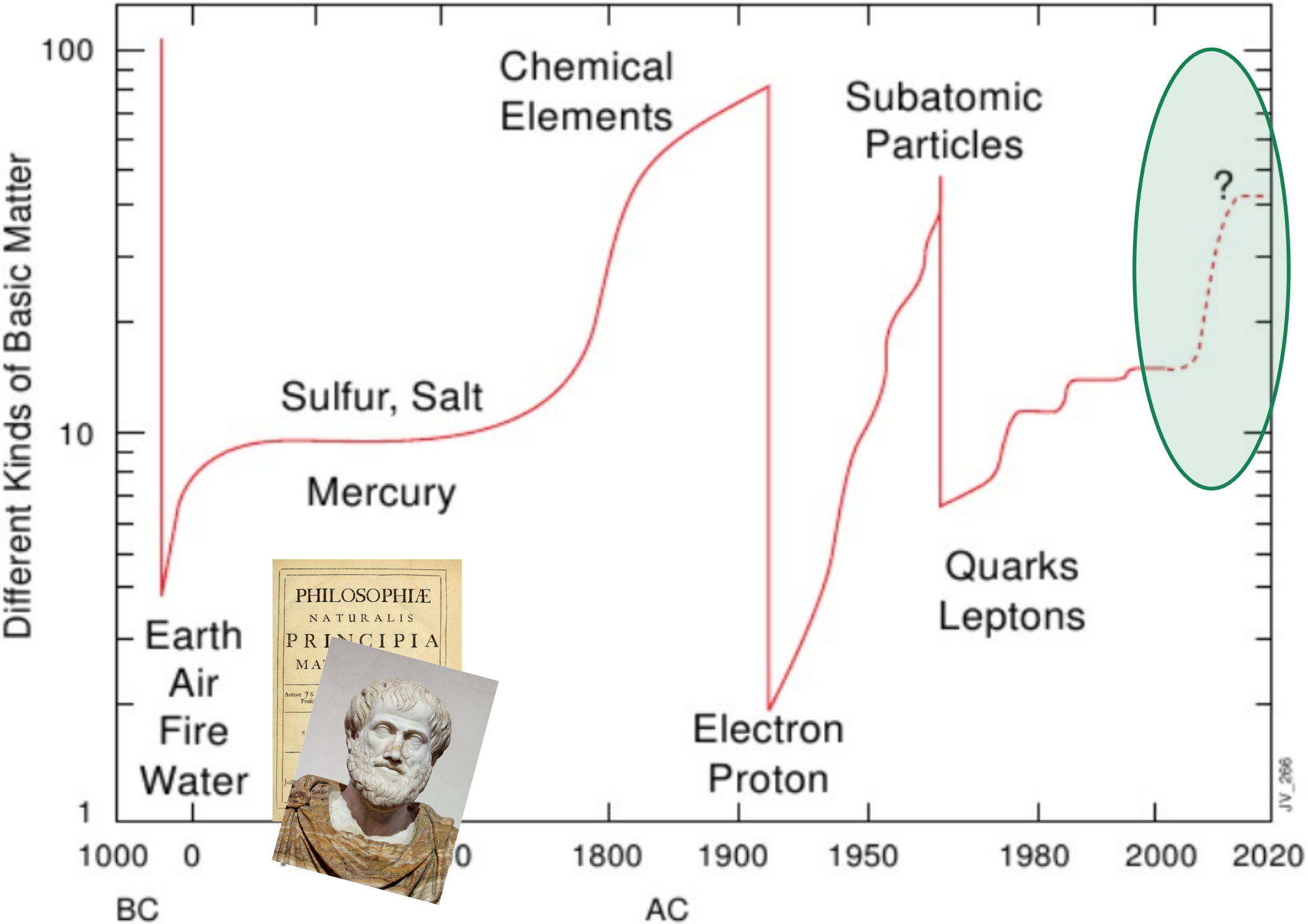
تعبیر نیروها

تمایل به بالا



تمایل به پایین

اثر خیس کنندگی


Different Kinds of Basic Matter
100
10
1
Chemical Elements
Subatomic Particles
?
Sulfur, Salt
Mercury
Earth
Air
Fire
Water
Quarks
Leptons
Electron
Proton
PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
1000
0
1800
1900
1950
1980
2000
2020
BC
AC
JV_266

در جستجوی یک تصویر واحد و کامل از طبیعت

تعبیر نیروها

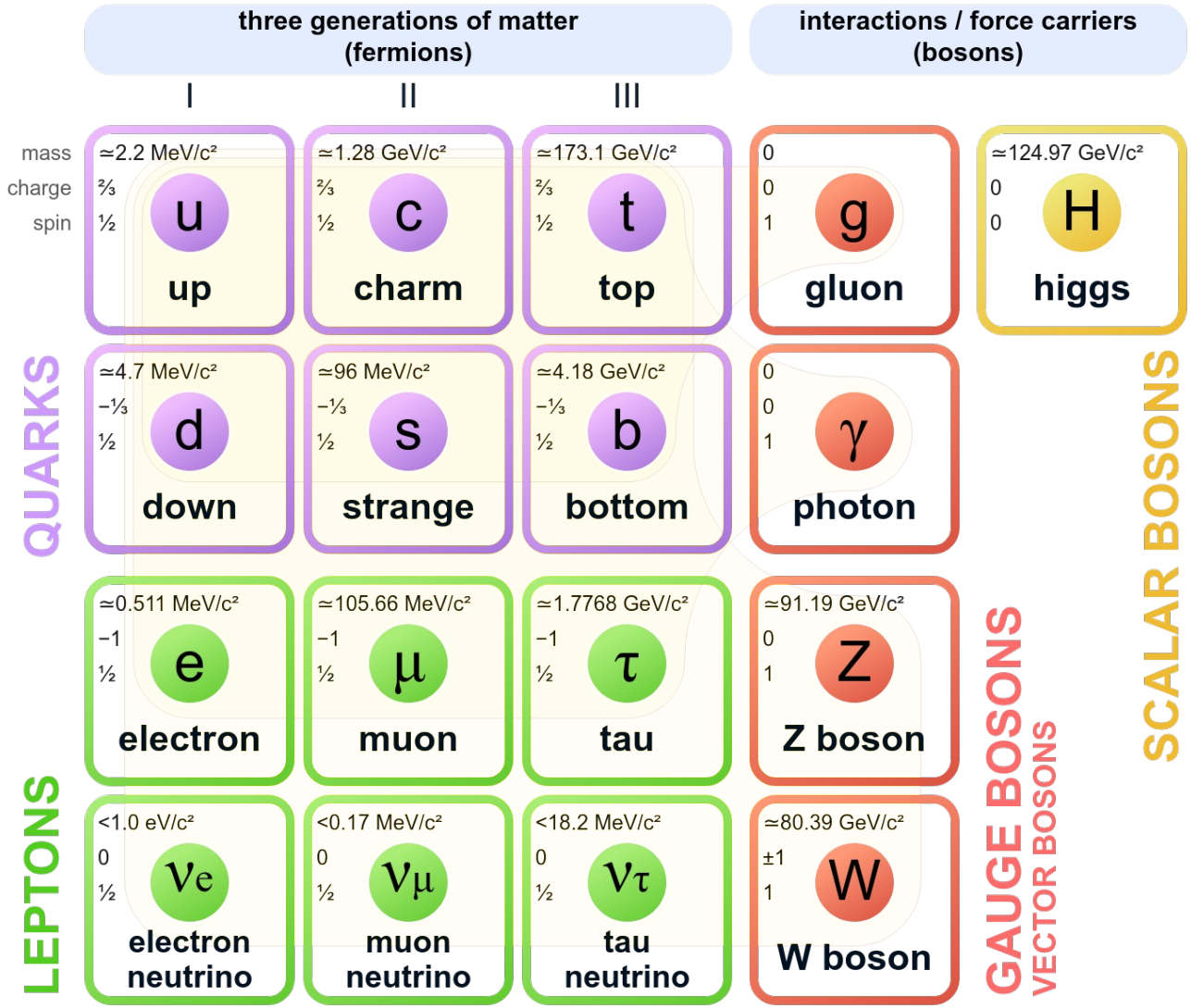
گرانش

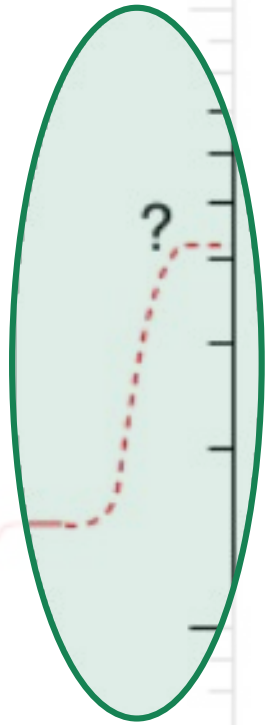
برهمکنش الکتروضعیف

برهمکنش قوی (رنگی)

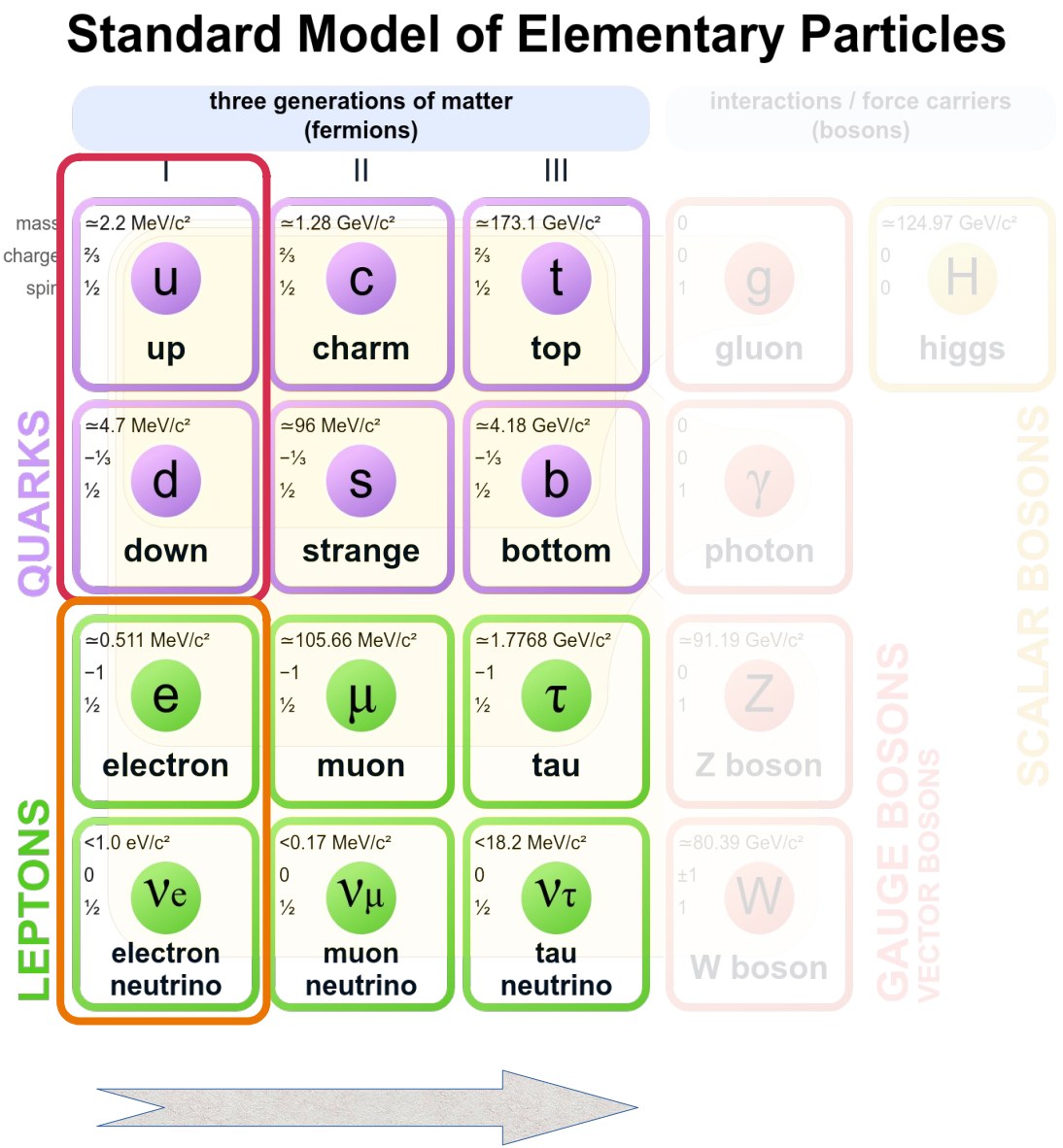
دانش امروز ما از ذرات بنیادی و نیروها

Standard Model of Elementary Particles





بخش مادی مدل استاندارد در یک نگاه

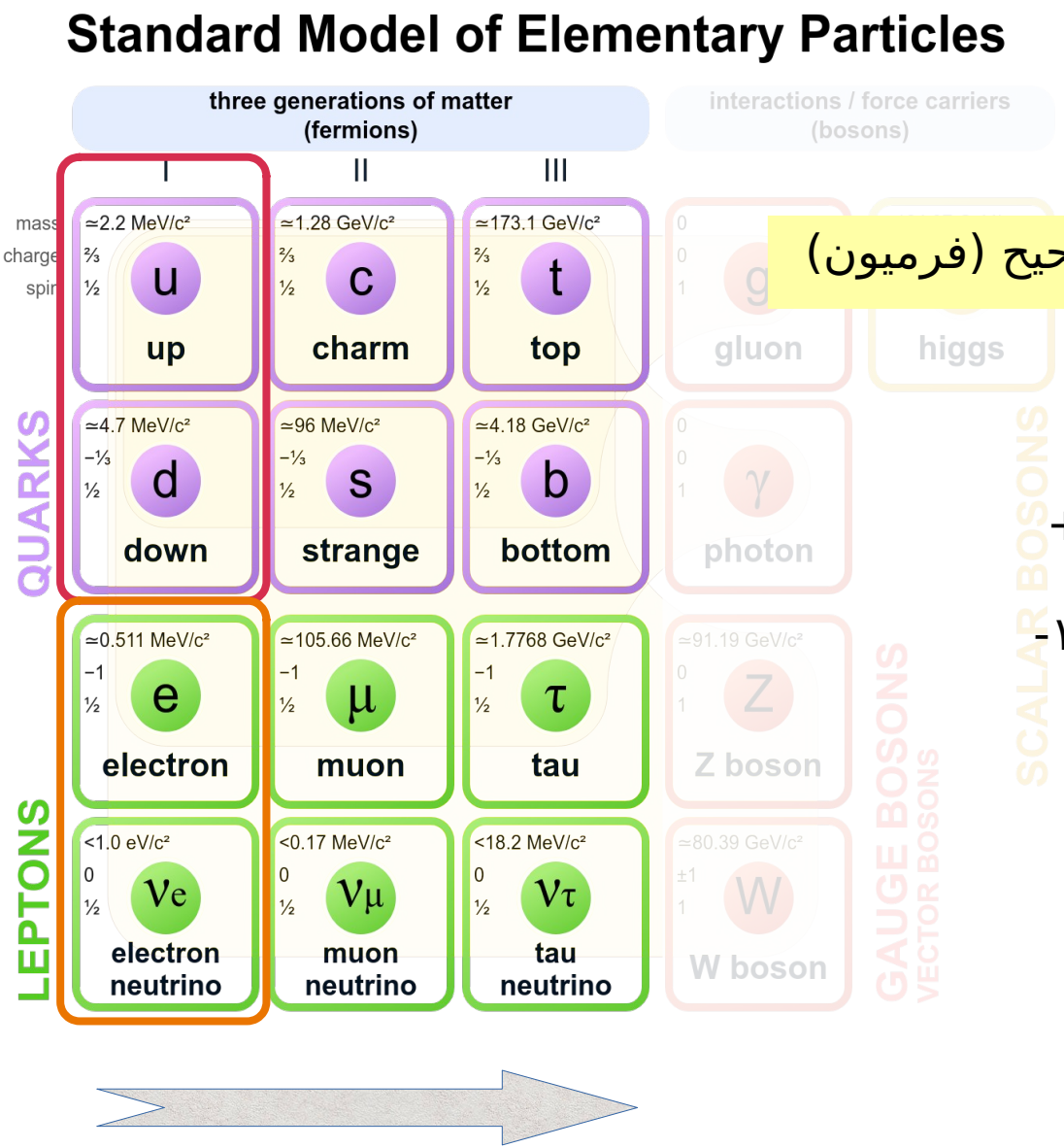


سه نسل کوارکی

سه نسل لپتونی

نسل بالاتر، جرم بیشتر

بخش مادی مدل استاندارد در یک نگاه



سه نسل کوارکی

سه نسل لپتونی

همگی سپین نیمه صحیح (فرمیون)

بار الکتریکی

کوارک های بالا: ۲/۳+

کوارک های پایین: ۱/۳-

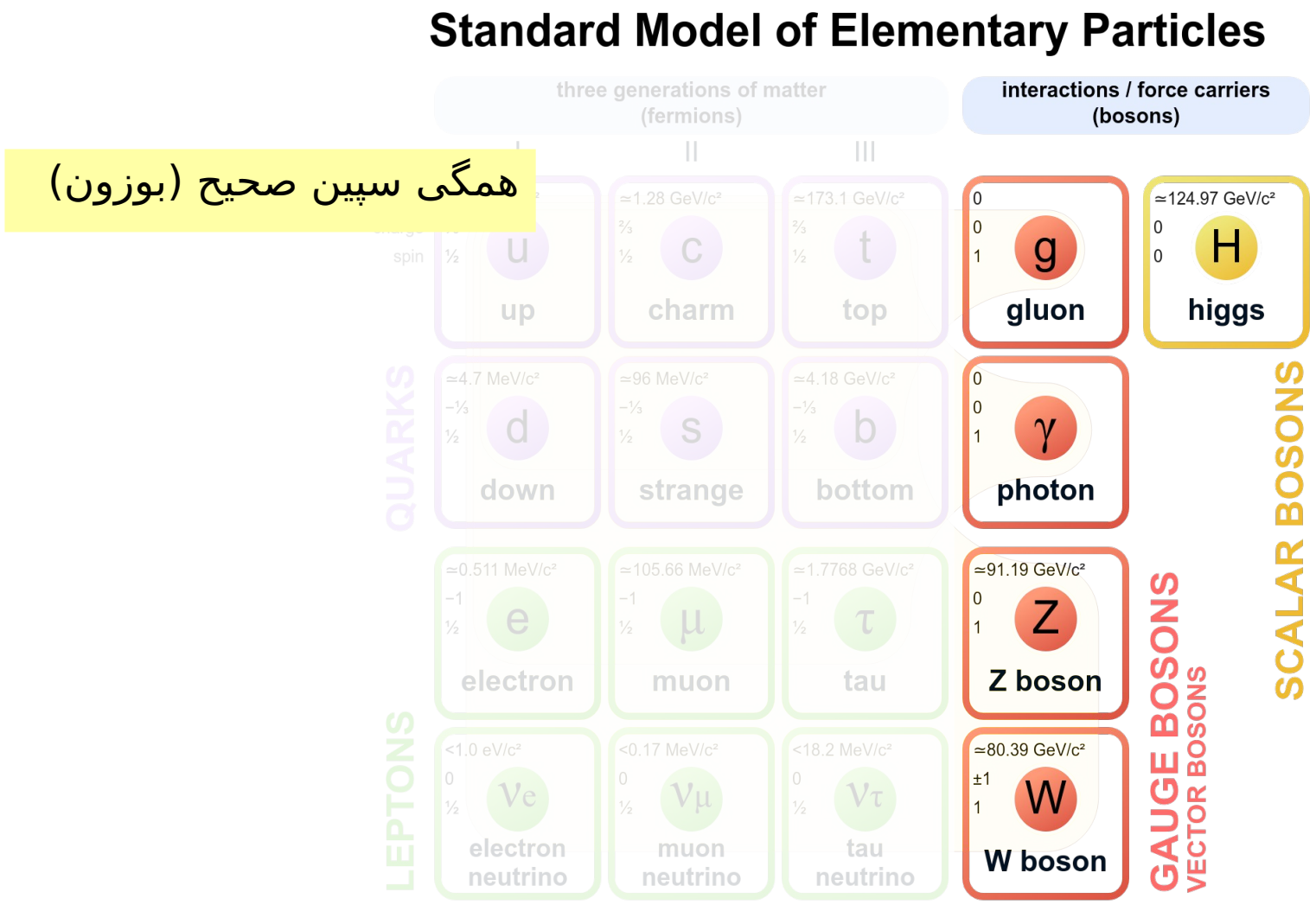
لپتون‌ها: ۱-

نوترینوها: صفر

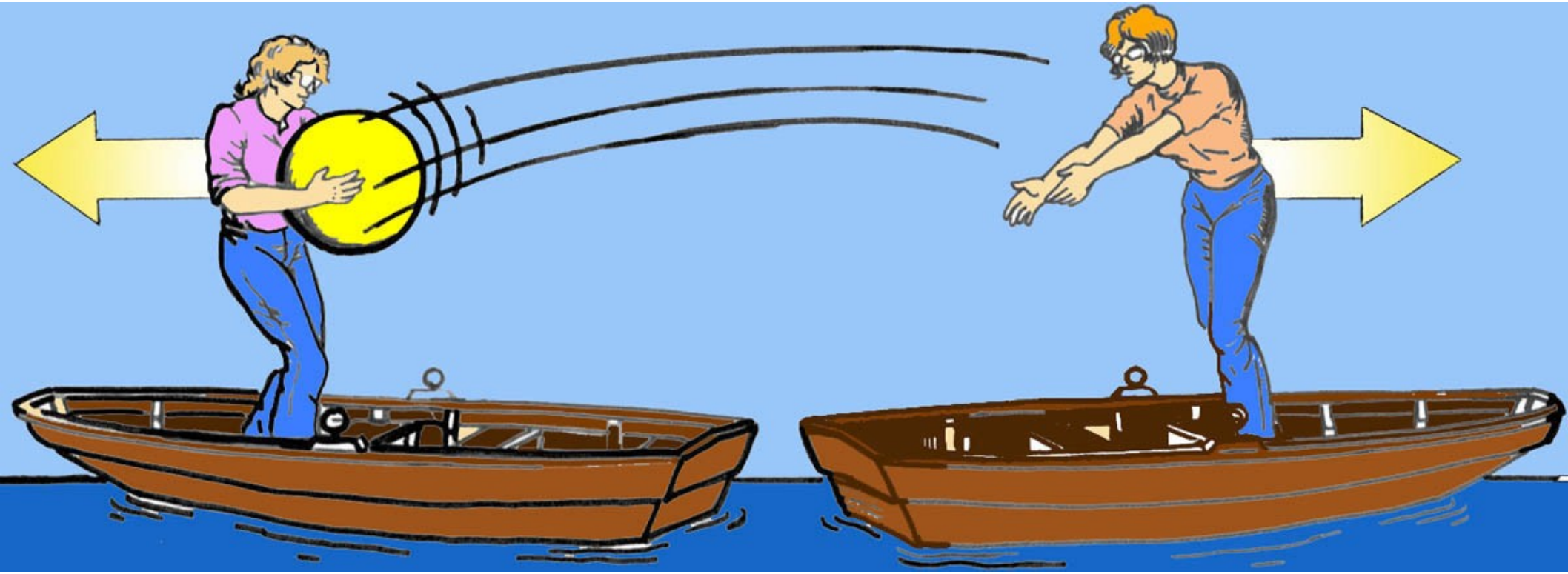
نسل بالاتر، جرم بیشتر

بخش حاملان نیرو

همگی سپین صحیح (بوزون)



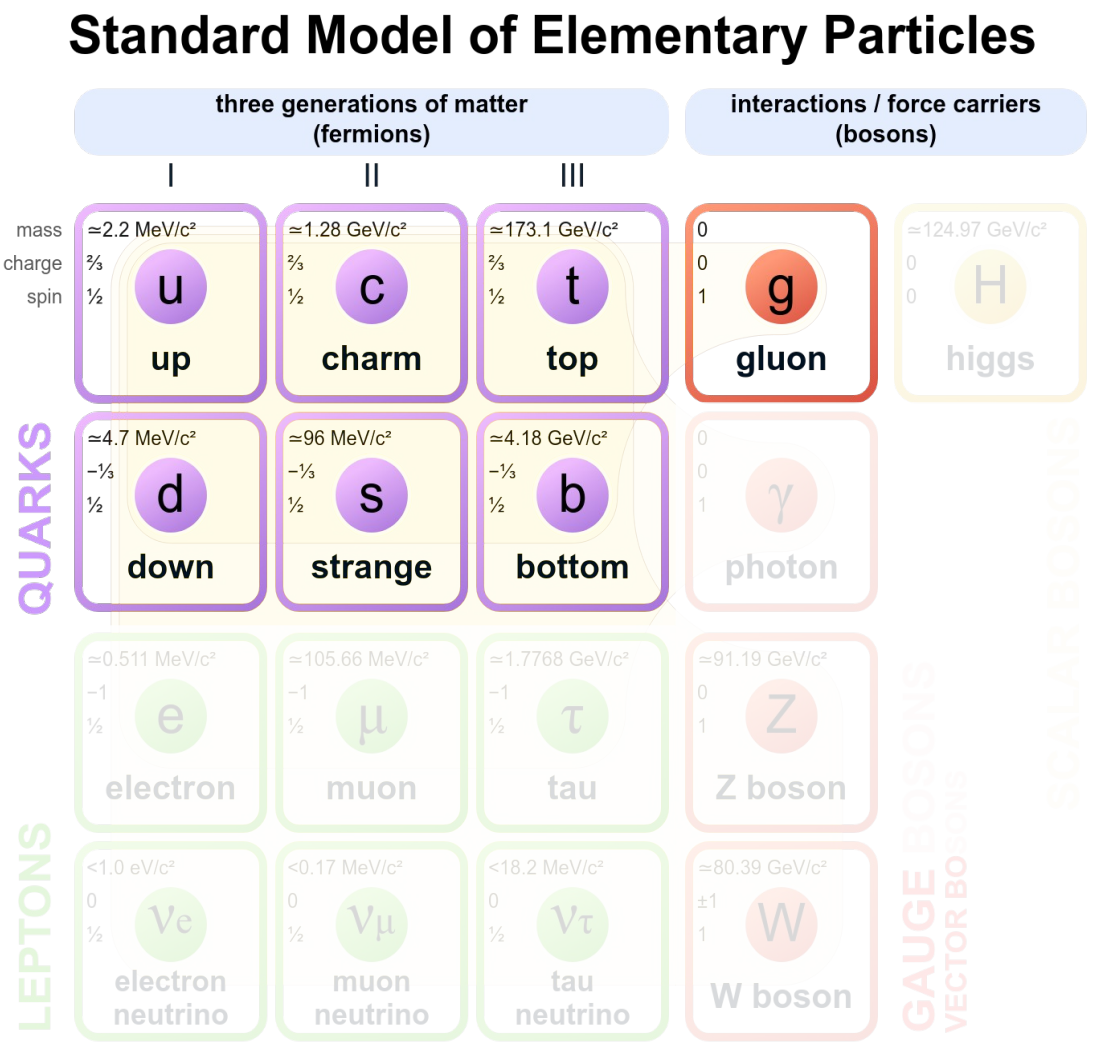
منظور از حامل نیرو چیست؟



تعبیر ذره‌ای انتقال نیرو

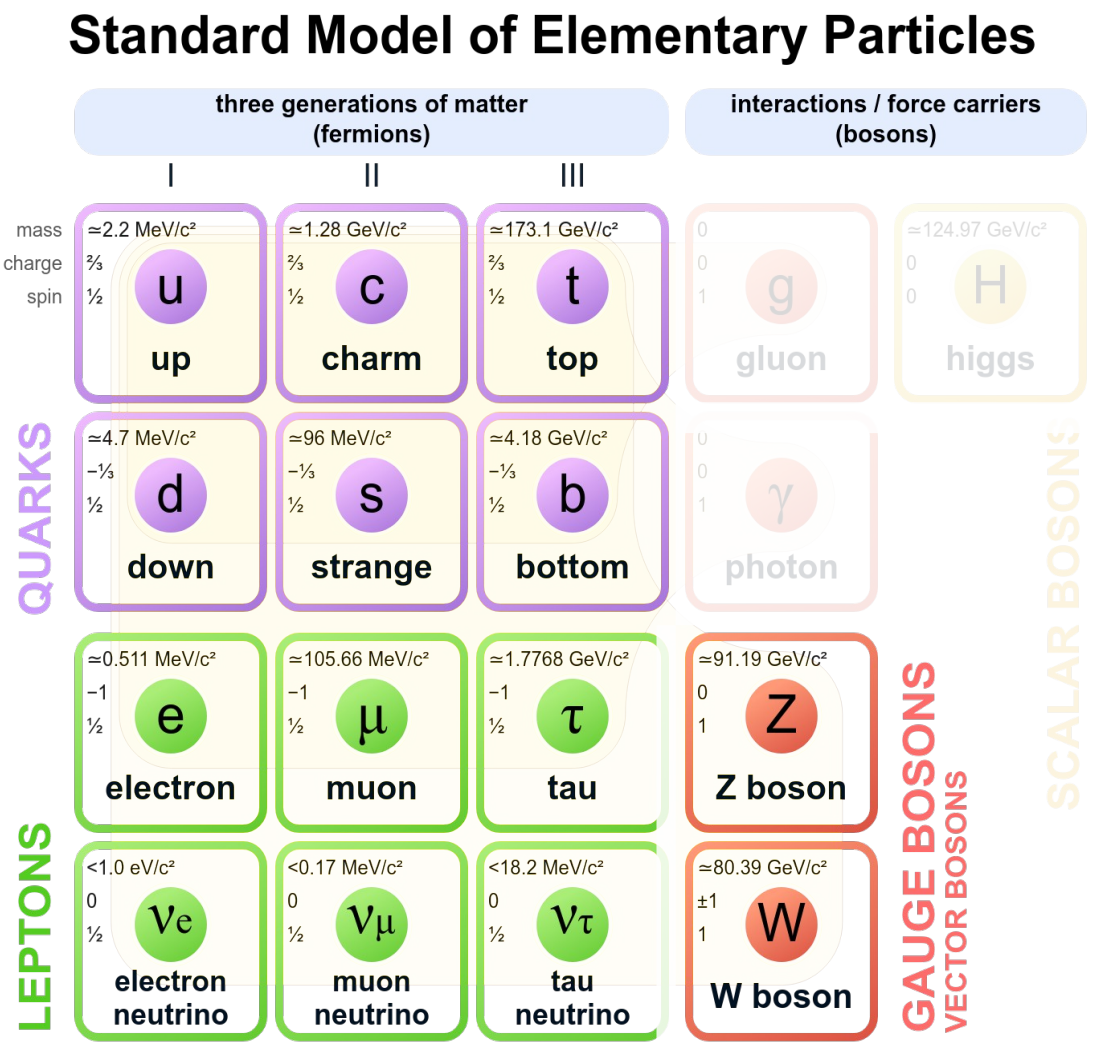
مدخل نظریه میدان‌های کوانتومی!!

بخش حاملان نیرو



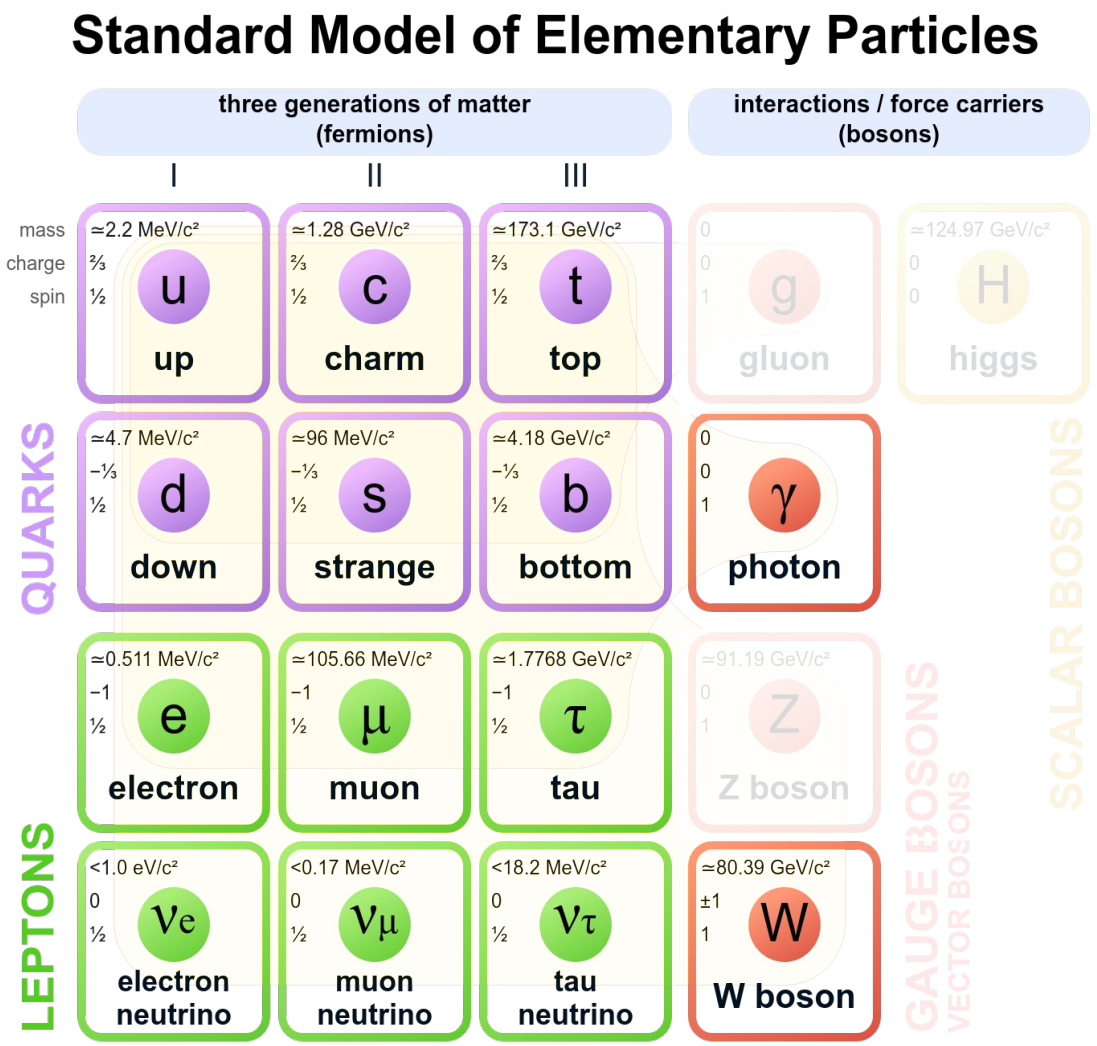
برهمکنش رنگی (قوی) میان کوارکها

بخش حاملان نیرو



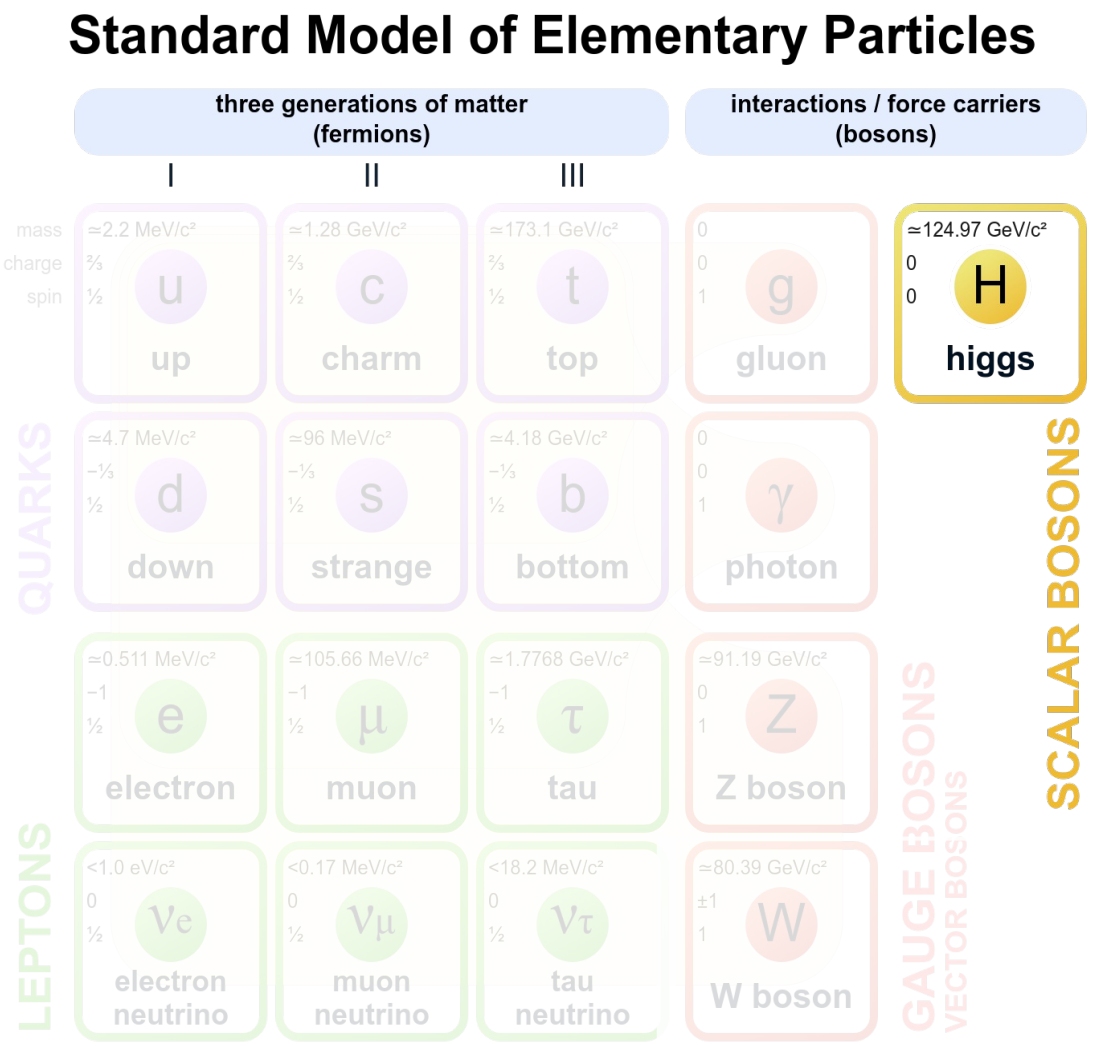
برهمکنش ضعیف میان ذرات با سپین نیمه صحیح

بخش حاملان نیرو



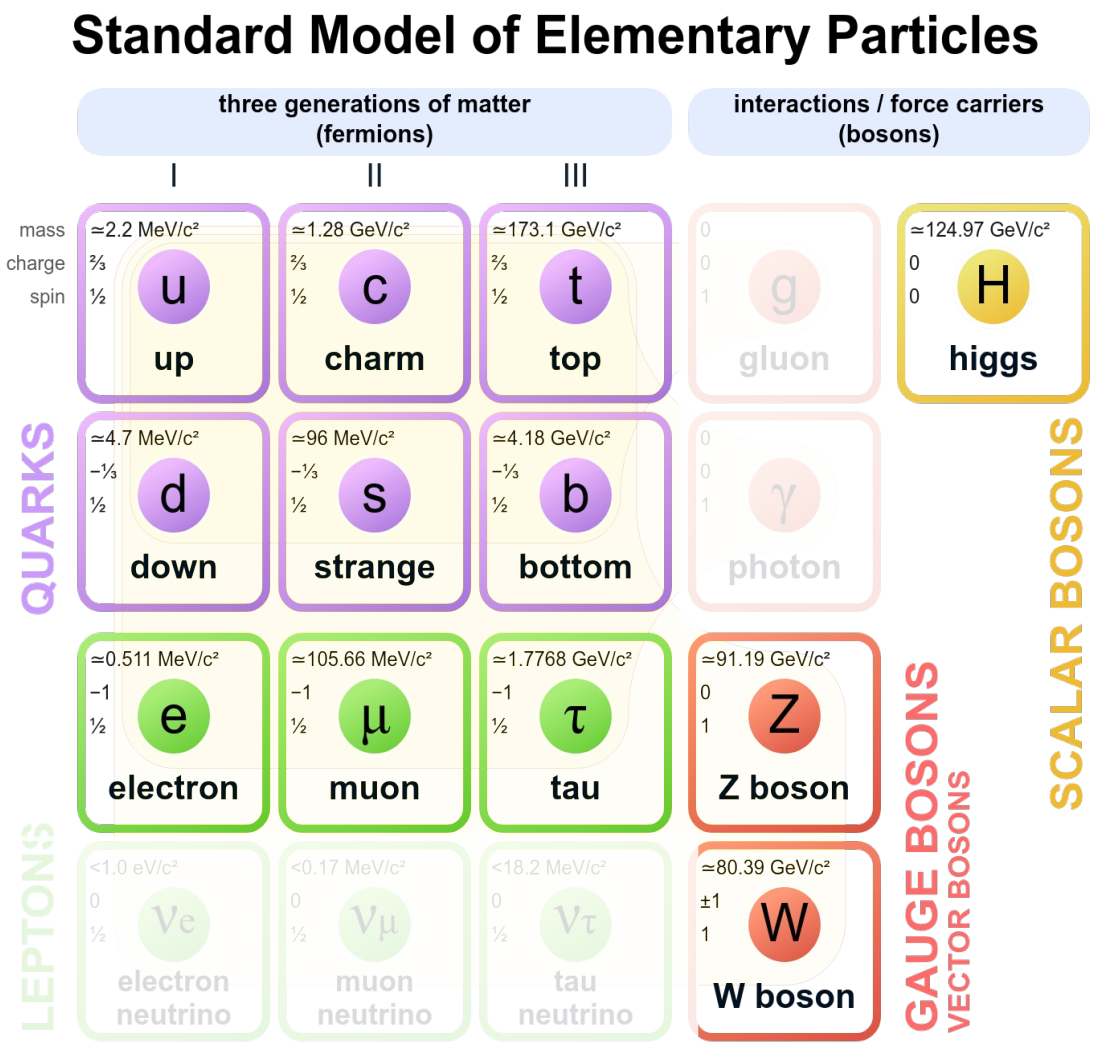
برهمکنش الکترومغناطیسی بین همه ذرات باردار

برهمکنش‌های ذره شگفت‌انگیز

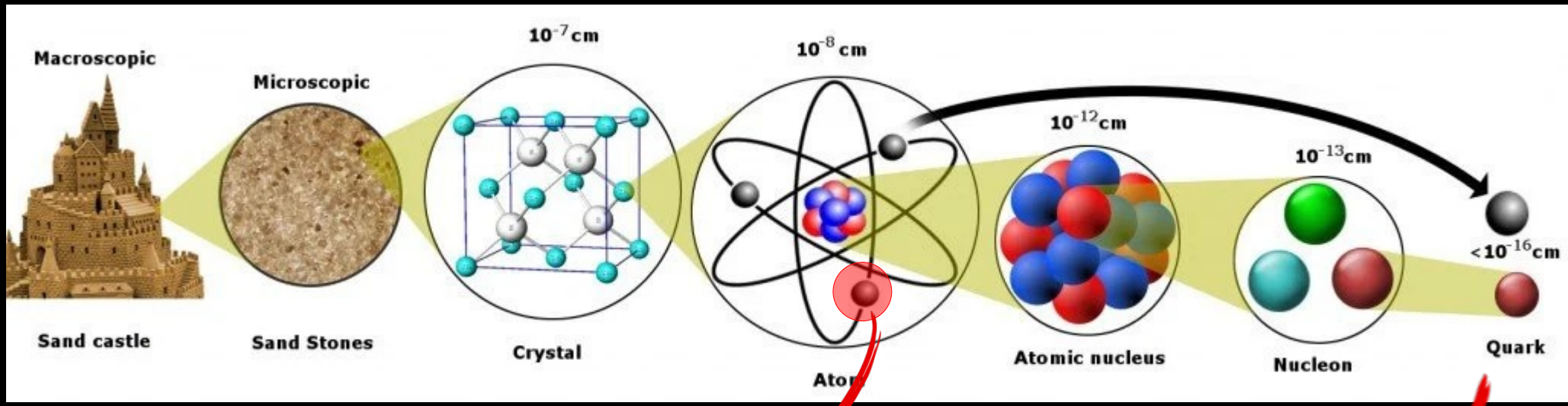


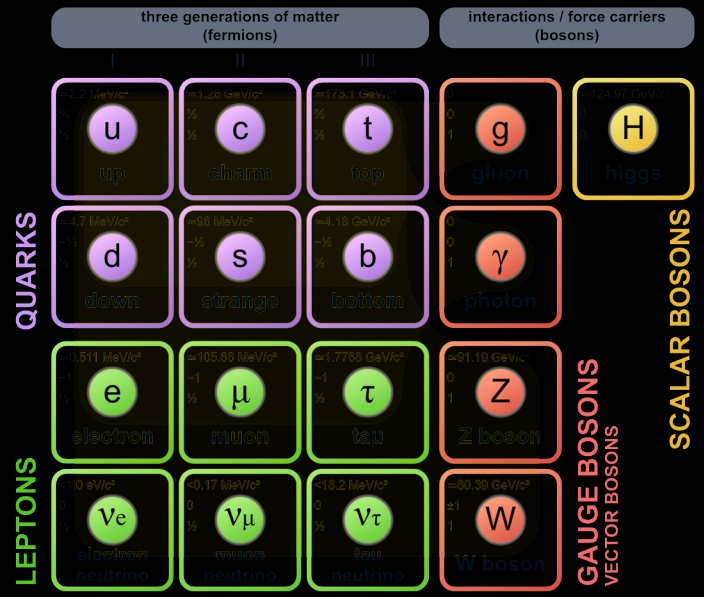
بوزون هیگز چطور برهمکنش می‌کند؟!!

برهمکنش‌های ذره شگفت‌انگیز



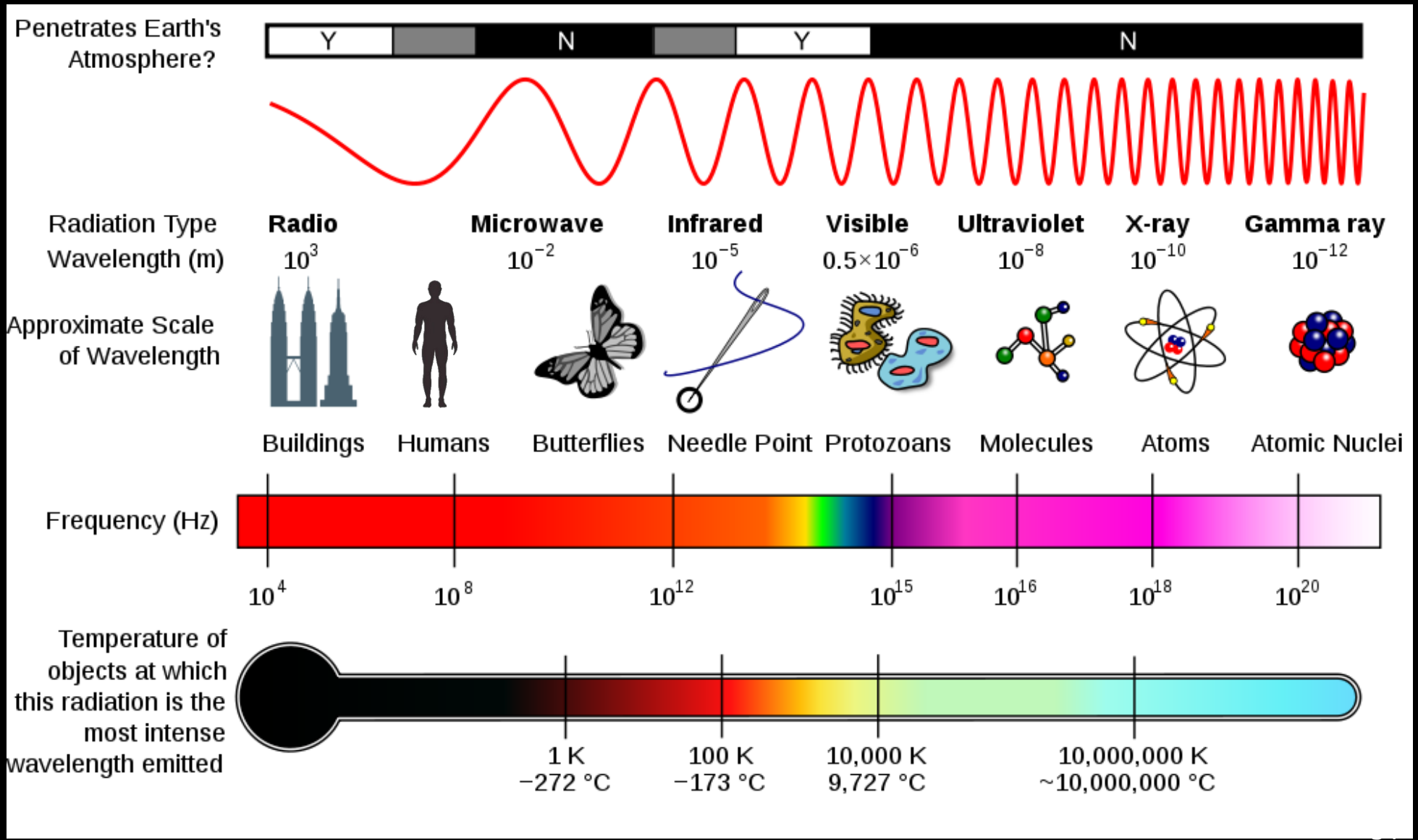
قدرت برهمکنش هیگز با ذرات به جرم آن‌ها بستگی دارد





این تصویر چطور شکل گرفت؟
چطور کامل‌تر می‌شود؟

شناخت طبیعت: انرژی و ابعاد



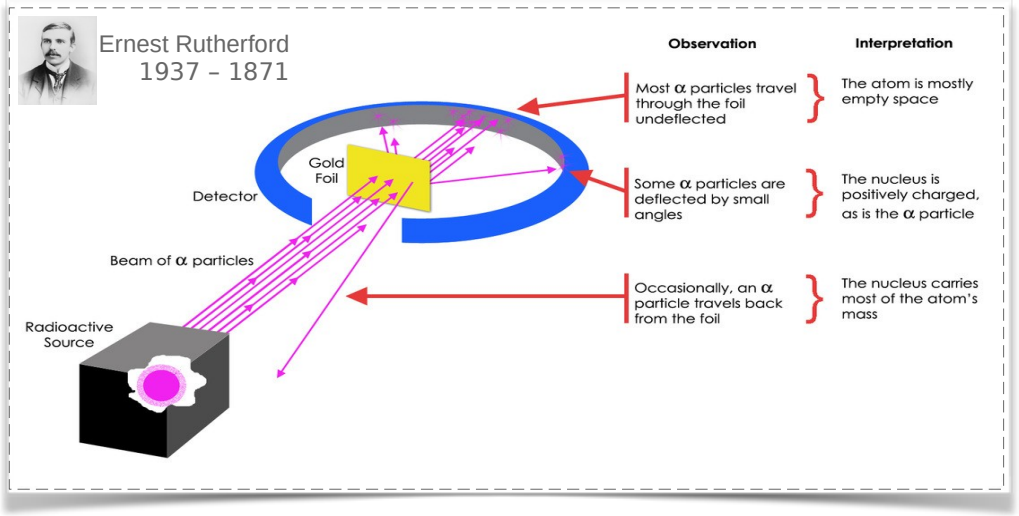
شناخت طبیعت: انرژی و ابعاد

میخوای ساختار یک ماده رو بشناسی؟

بهش ذرات شتابدار شلیک کن

دسترسی به ابعاد ریز تر با ذره پرانرژی‌تر!

شتابگرهای ذرات بعنوان ماشین کشف



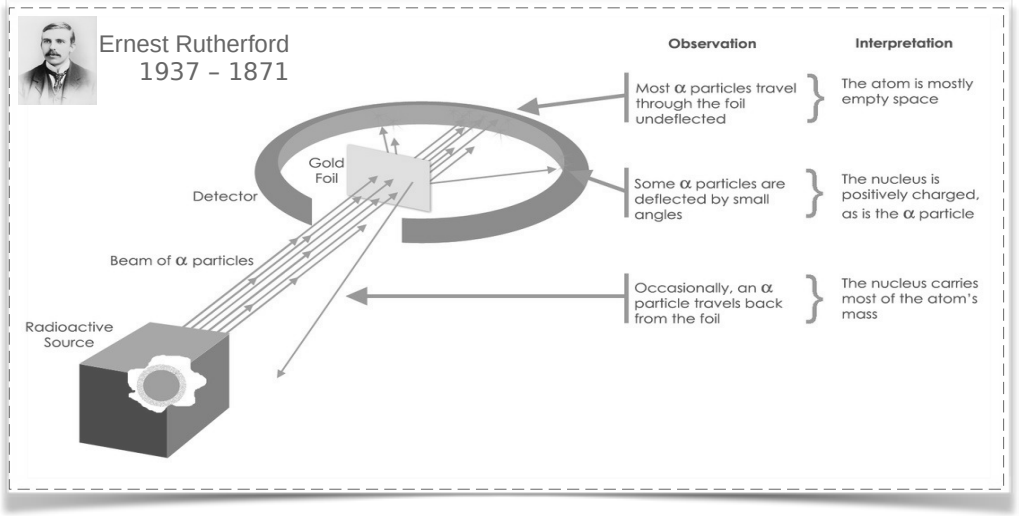
رادرفورد از ذره آلفای شتابدار استفاده کرد

منبع؟ عناصر رادیواکتیو

انرژی: در حد مگاالکترون ولت (غیرقابل تنظیم)

هدف: ثابت (ورقه طلا)

شتابگرهای ذرات بعنوان ماشین کشف



رادرفورد از ذره آلفای شتابدار استفاده کرد

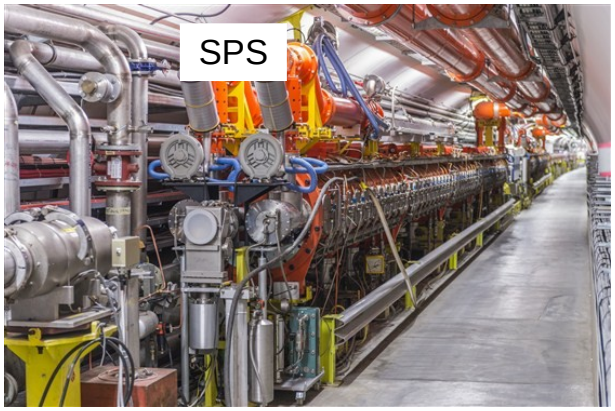
منبع؟ عناصر رادیواکتیو

انرژی: در حد مگاالکترون ولت (غیرقابل تنظیم)

هدف: ثابت (ورقه طلا)

انواع شتابگرها با شتاب دادن الکترون، پروتون و آنتی-پروتون و با انرژی قابل تنظیم
هدف: ثابت یا متحرک

۱۹۵۴ – ۲۰۱۲



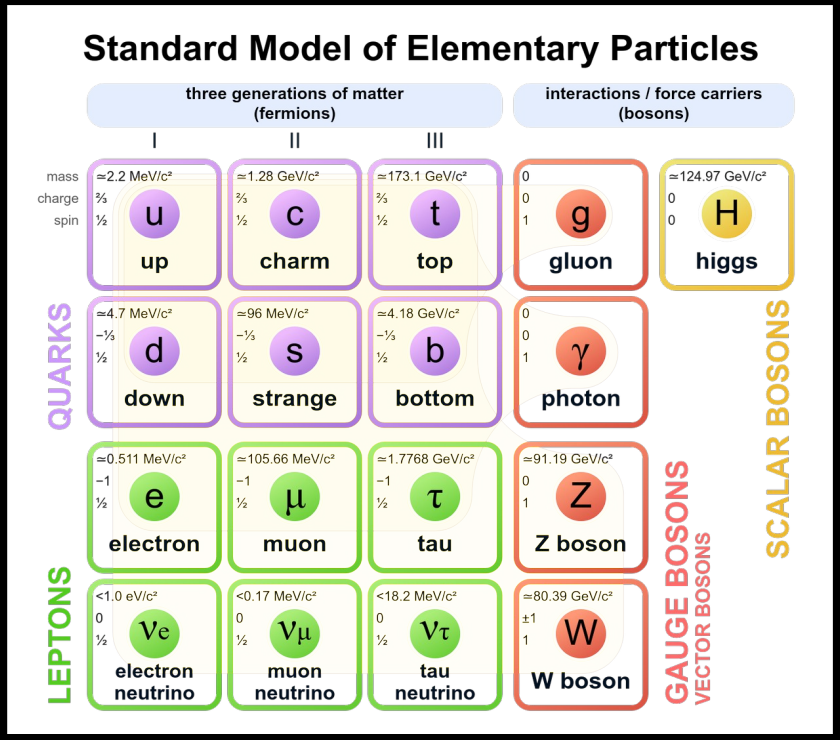
۱۹۷۶ –

۲۰۱۰ –

و اما شتابگر محبوب ما

برخورددهنده بزرگ هادرونی

که پروتون‌ها را تا سرعتی در حد سرعت نور شتاب میدهد!!

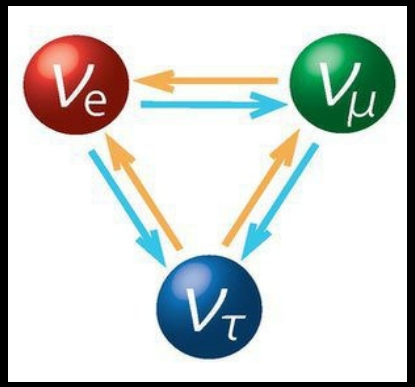


با وجود مدل استاندارد،
چه نیازی به LHC ؟!!

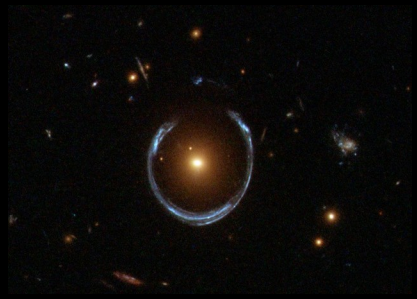
برخی ناکارآمدی‌های مدل استاندارد ذرات

عدم توضیح مشاهدات تجربی

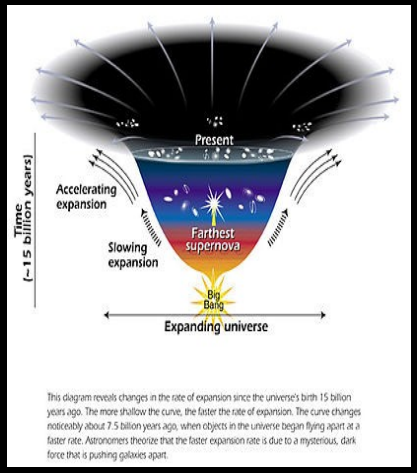
عدم توضیح گرانش



جرم نوترینوها



انرژی و ماده تاریک



عدم پاسخ به بعضی سؤالات تئوری

چرا جرم ذرات این مقداری است که دیده‌ایم؟

چرا نسل‌های مختلفی از فرمیون‌ها داریم؟

چرا محاسبات اختلالی در جرم هیگز واگرایی پیش‌بینی می‌کنند در حالیکه دیده‌ایم این ذره جرم معین دارد؟

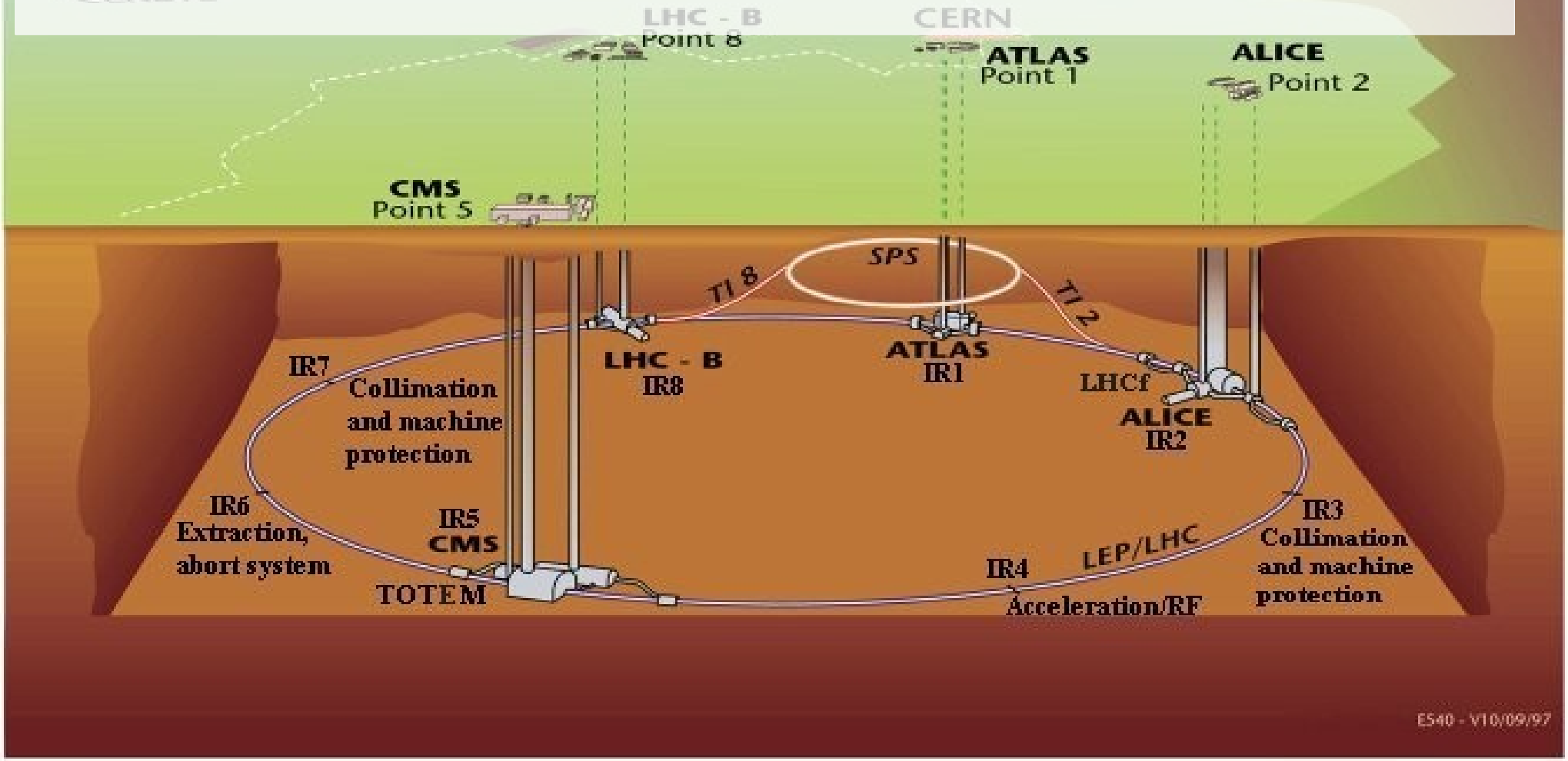
و ....

برخی ناکارآمدی‌های مدل استاندارد ذرات

- انرژی بالا و دستیابی به ذرات سنگین کشف نشده
- درخشندگی بالا و تولید فراوان داده در واحد زمان
- آمار کافی برای کشف یا اندازه‌گیری دقیق

Overall view of the LHC experiments.

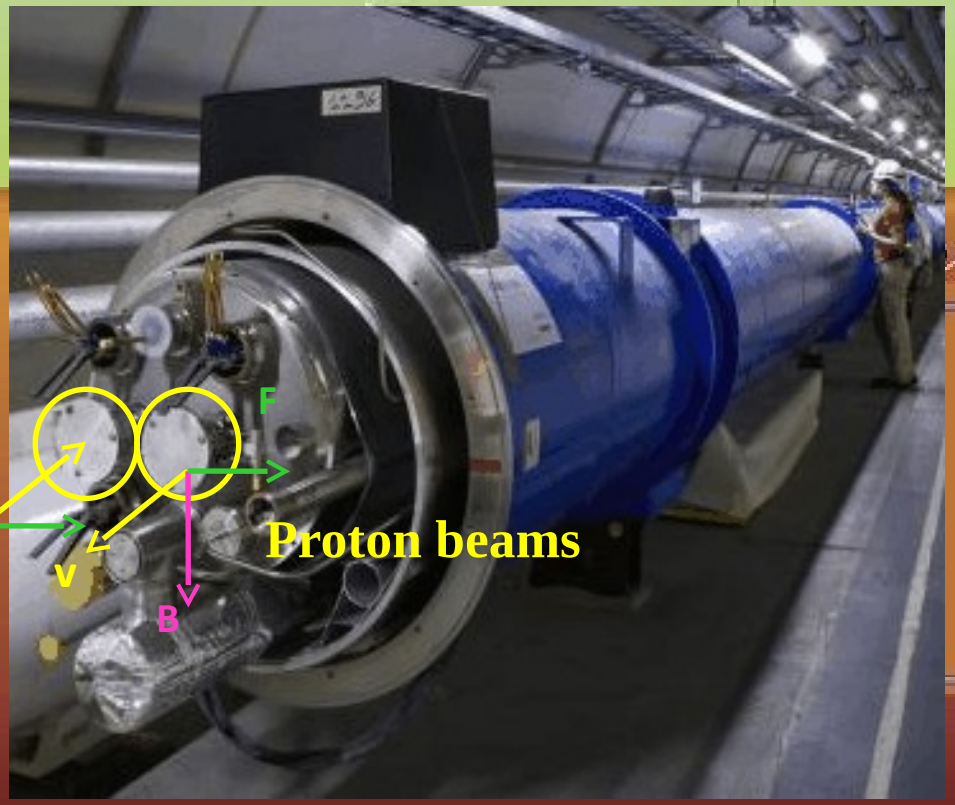
- ✔ تونلی به طول ۲۷ کیلومتر
- ✔ تا حدود ۱۰۰ متر زیر زمین
- ✔ میدان مغناطیسی: 8.5 تسلا
- ✔ انرژی پرتوهای ورودی: ۴۵۰ گیگاالکترون‌ولت
- ✔ فرکانس چرخش ذرات در تونل: ۱۱۰۰۰ بار در ثانیه
- ✔ دمای بسیار پایین برای ابررسانایی (1.9 کلوین)
- ✔ انرژی برخورد پروتونها: حدود ۱۴ تراالکترون‌ولت



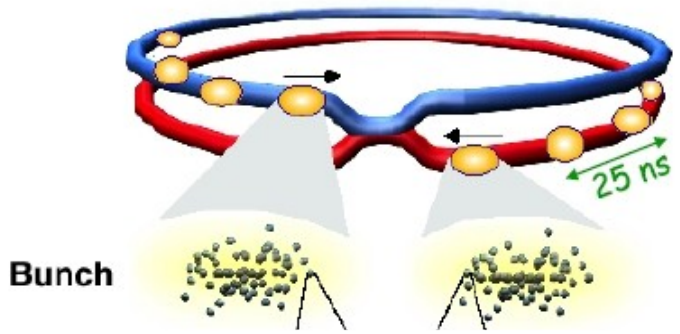
Overall view of the LHC experiments.

- ✔ تونلی به طول ۲۷ کیلومتر
- ✔ تا حدود ۱۰۰ متر زیر زمین
- ✔ خلاء بسیار بالا (10^{-9} پاسکال)
- ✔ میدان مغناطیسی: 8.5 تسلا
- ✔ انرژی پرتوهای ورودی: ۴۵۰ گیگاالکترون‌ولت
- ✔ فرکانس چرخش ذرات در تونل: ۱۱۰۰۰ بار در ثانیه
- ✔ دمای بسیار پایین برای ابررسانایی (1.9 کلوین)
- ✔ انرژی برخورد پروتونها: حدود ۱۴ تراالکترون‌ولت

میدان مغناطیسی دستگاه MRI حدود ۲ تسلاست



انرژی مجموع پروتونها در حلقه LHC

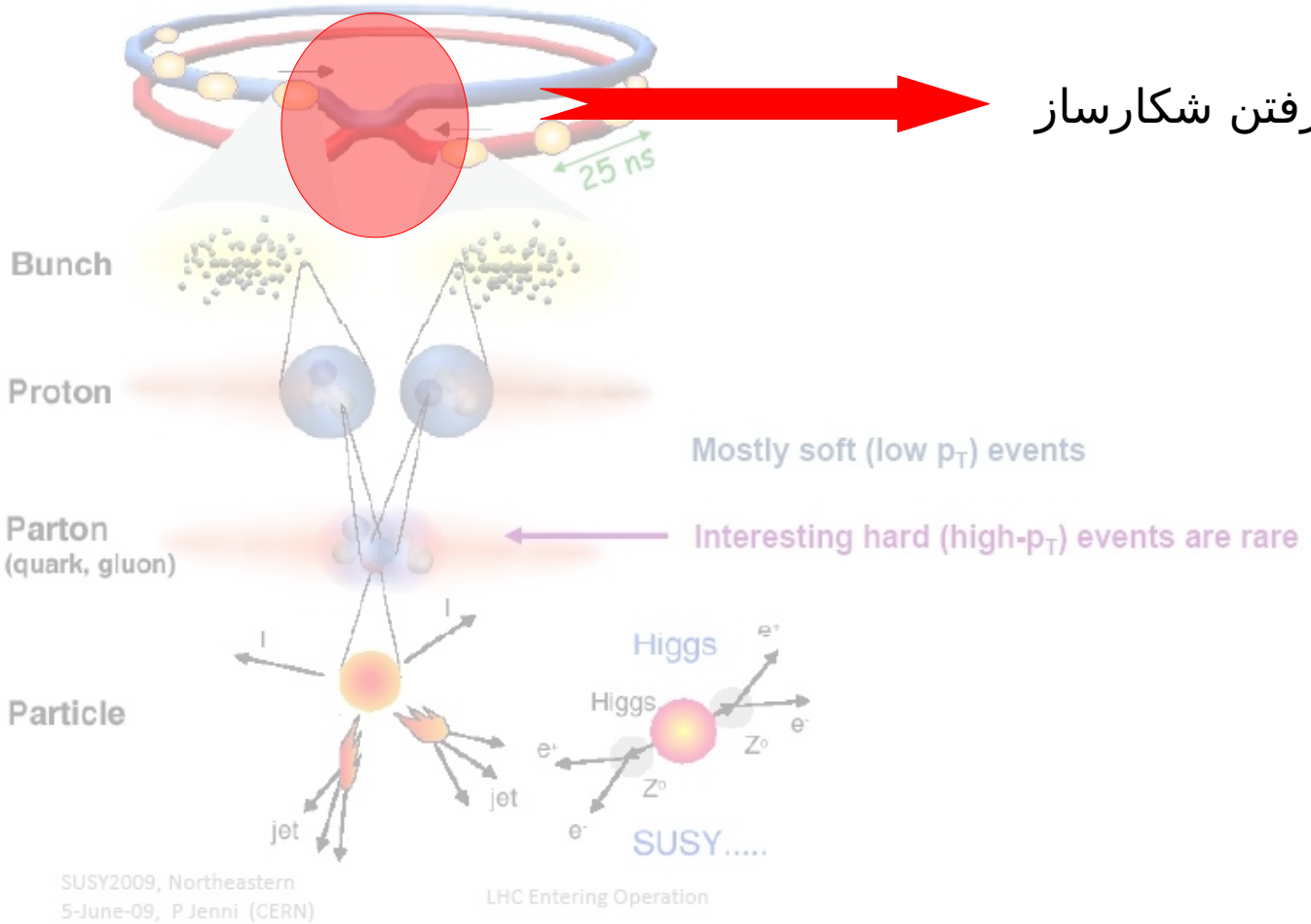


- ✔ در حلقه LHC حدود ۳۰۰۰ بسته پروتونی قرار میگیرد
- ✔ هر بسته حدود $۱۰^{۱۱}$ پروتون دارد
- ✔ انرژی هر پروتون حدود ۷ تراالکترون‌ولت است

$$3 * 10^{3} * 10^{11} * 7 * 10^{12} * 1.6 * 10^{-19} \sim \mathbf{3 * 10^{8}\ J}$$

- ✔ انرژی حدود ۳۰۰ مگاژول
  - ✓ معادل ۱۵۰ کیلوگرم TNT است
  - ✓ میتواند یک تن مس را ذوب کند
  - ✓ ۲۰۰ برابر انرژی شتابگر قبلی یعنی تواترون در فرمی‌لب امریکاست

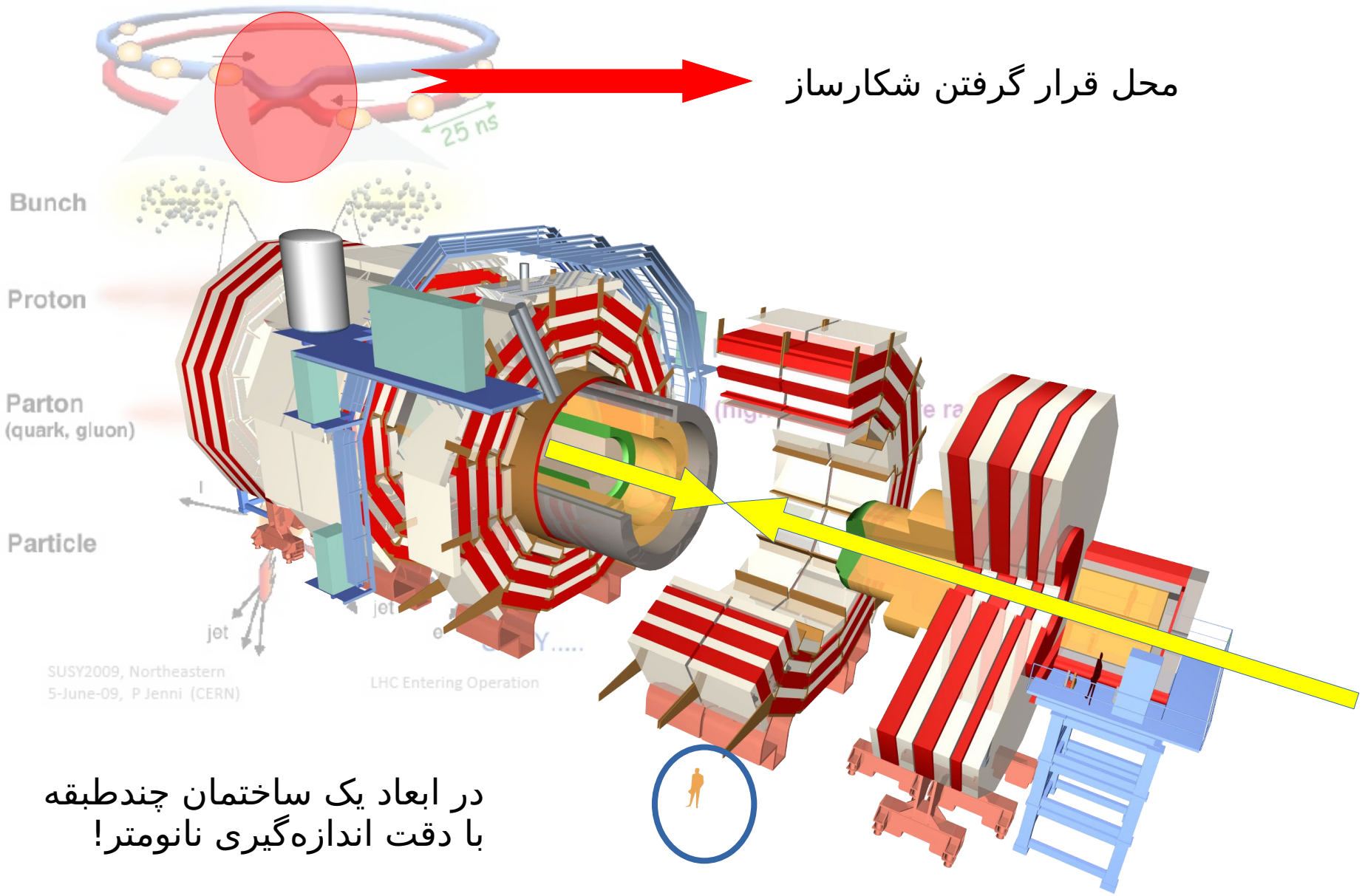
چگونگی برخورد پروتونها



محل قرار گرفتن شکارساز

PAUSE!

چگونگی برخورد پروتونها



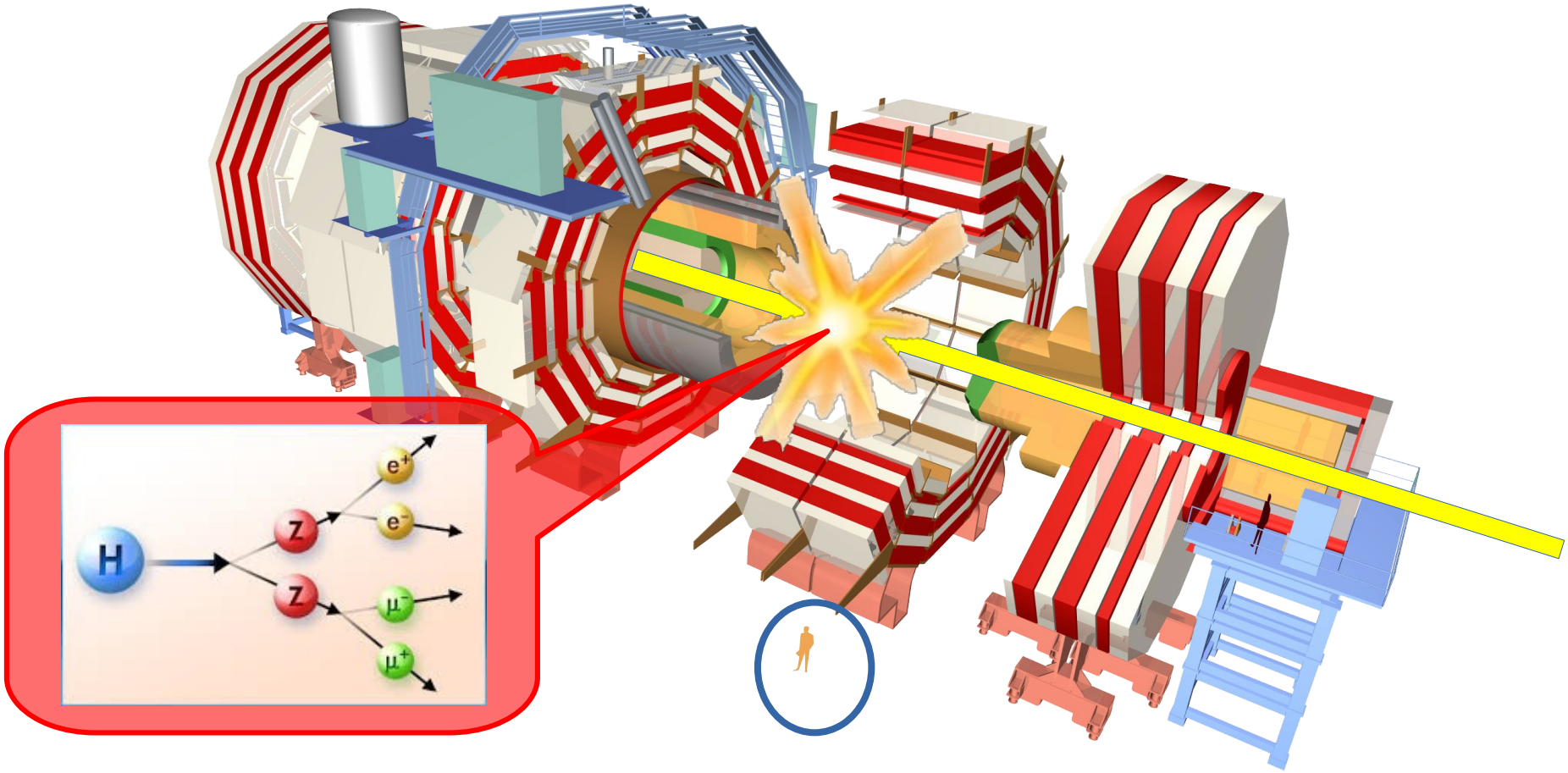
محل قرار گرفتن شکارساز

در ابعاد یک ساختمان چندطبقه
با دقت اندازه‌گیری نانومتر!

چگونگی برخورد پروتونها

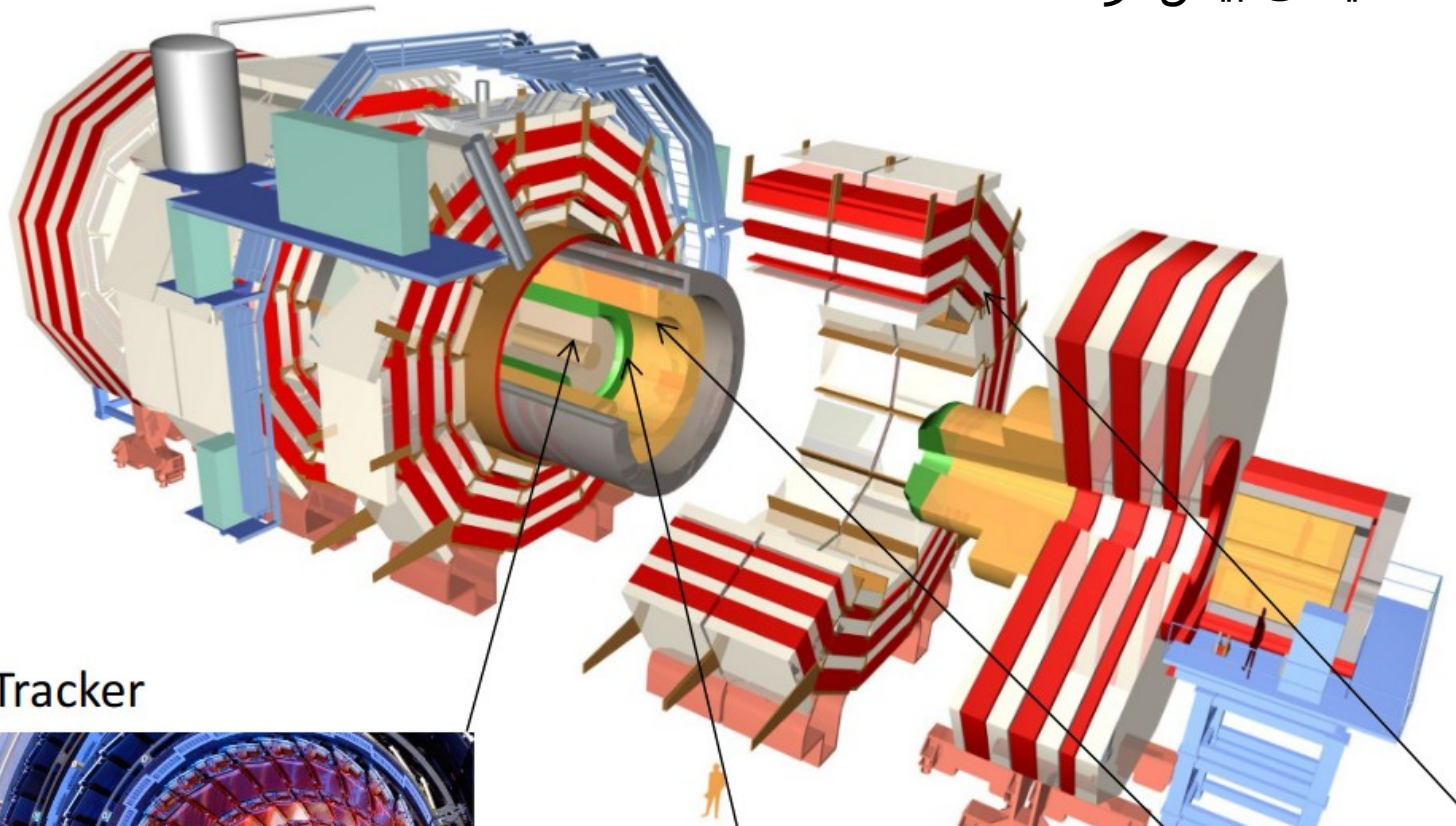
دربرخوردها ذرات سنگین و ناپایدار تولید می‌شوند که به ذرات پایدار واپاشی می‌کنند

آشکارساز ذرات پایدار را آشکارسازی می‌کند

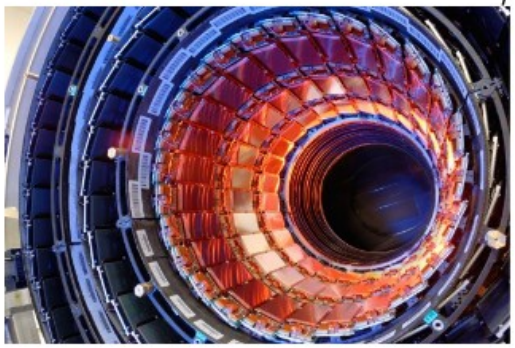


سیملوله فشرده میوئونی

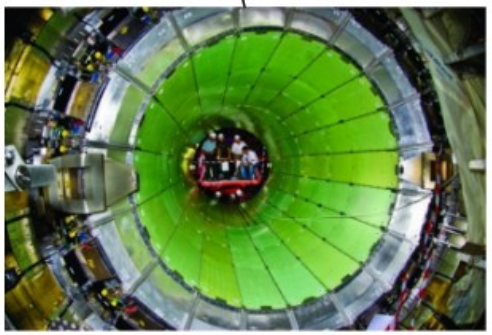
با ۱۲۰۰۰ تن جرم و میدان مغناطیسی بیش از ۴ تسلا



Tracker

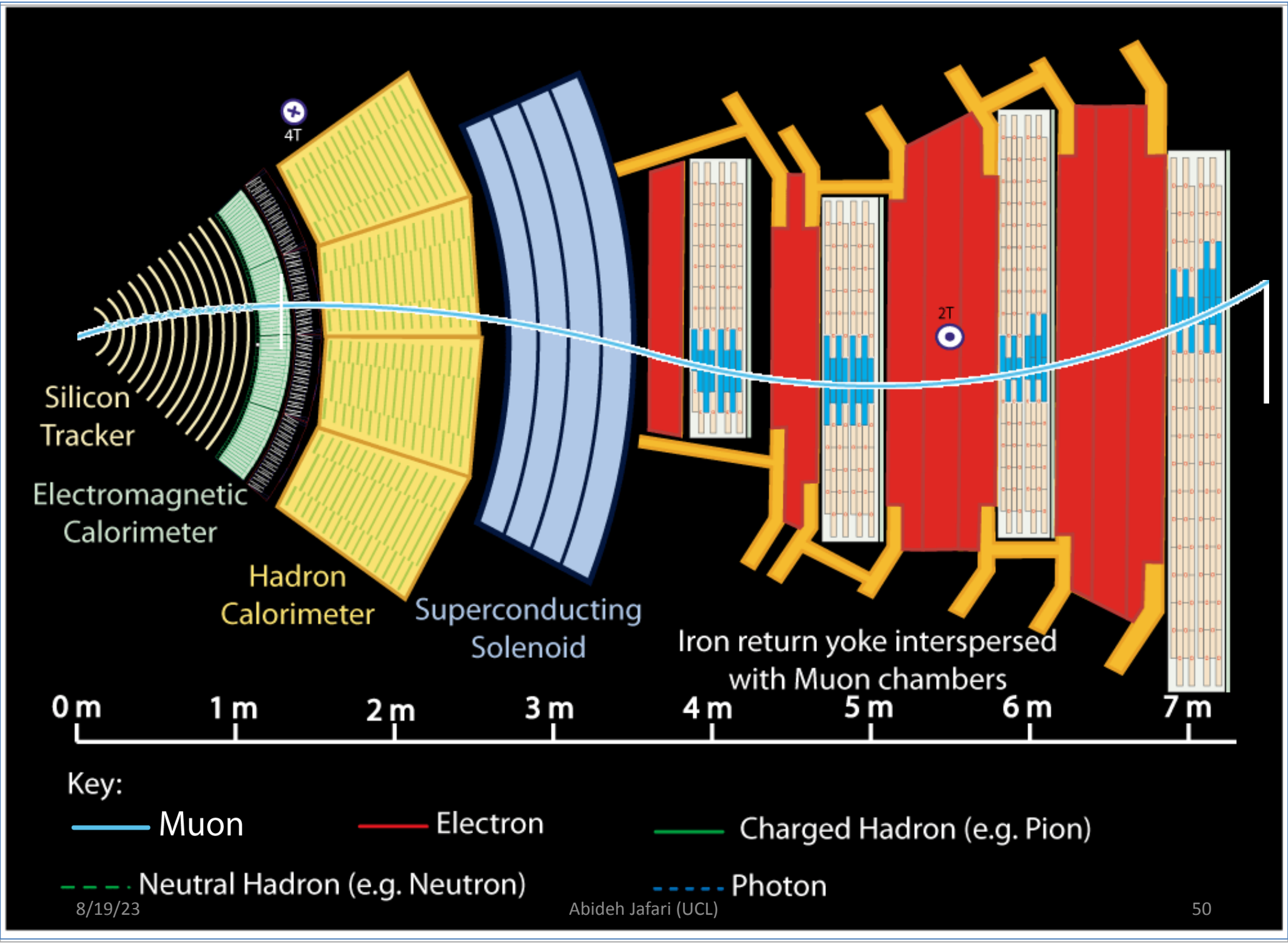


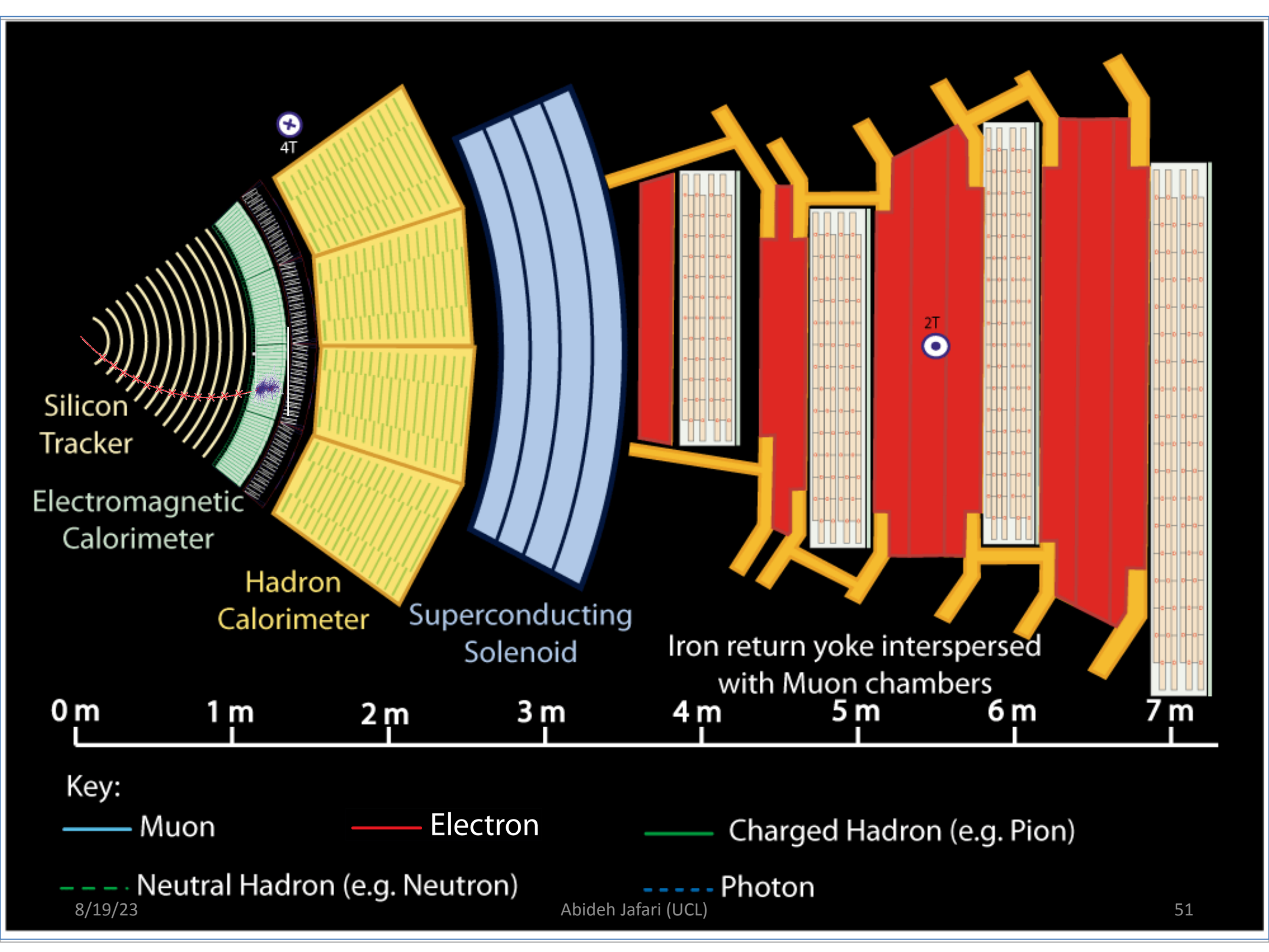
ECAL

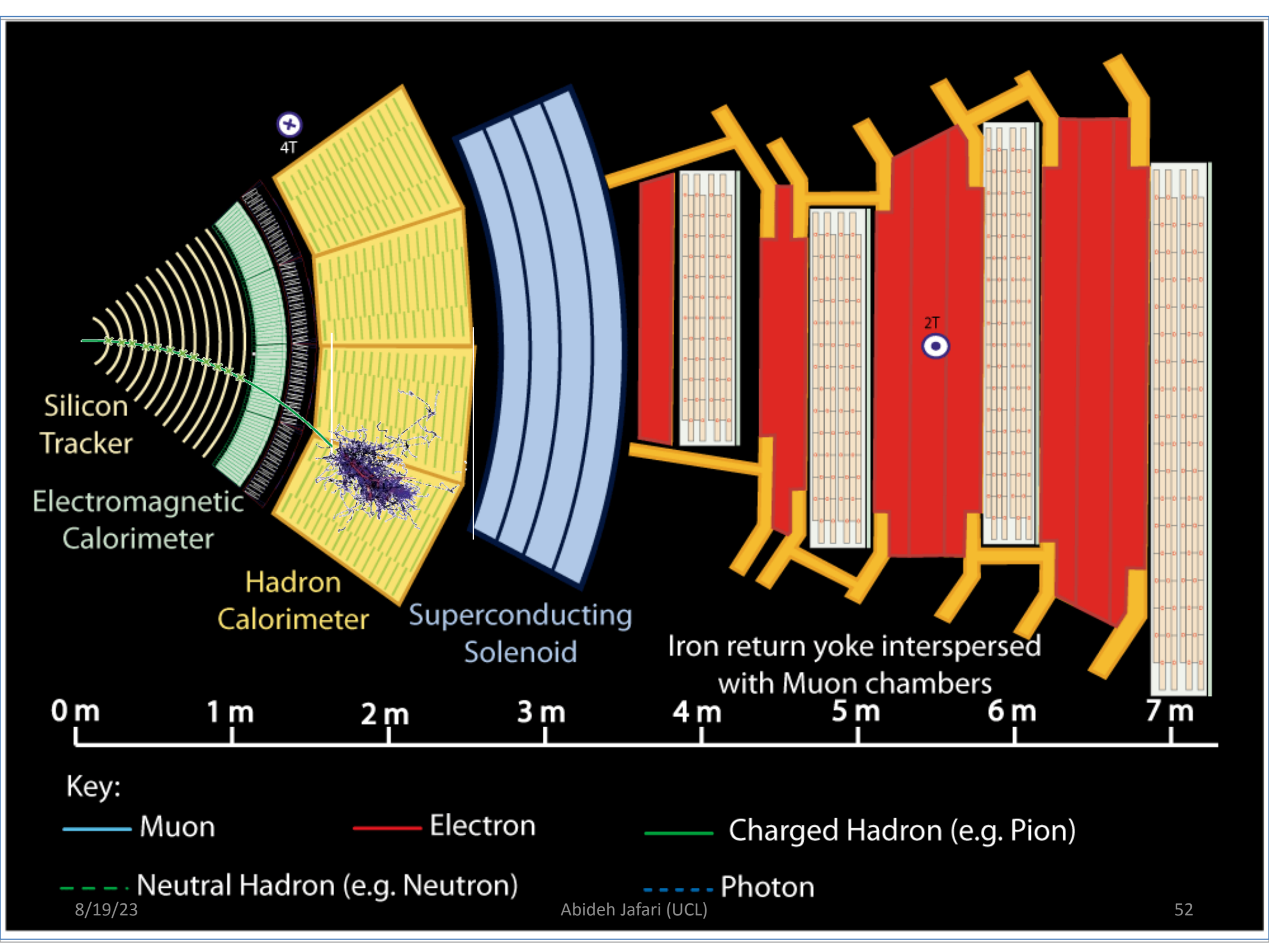


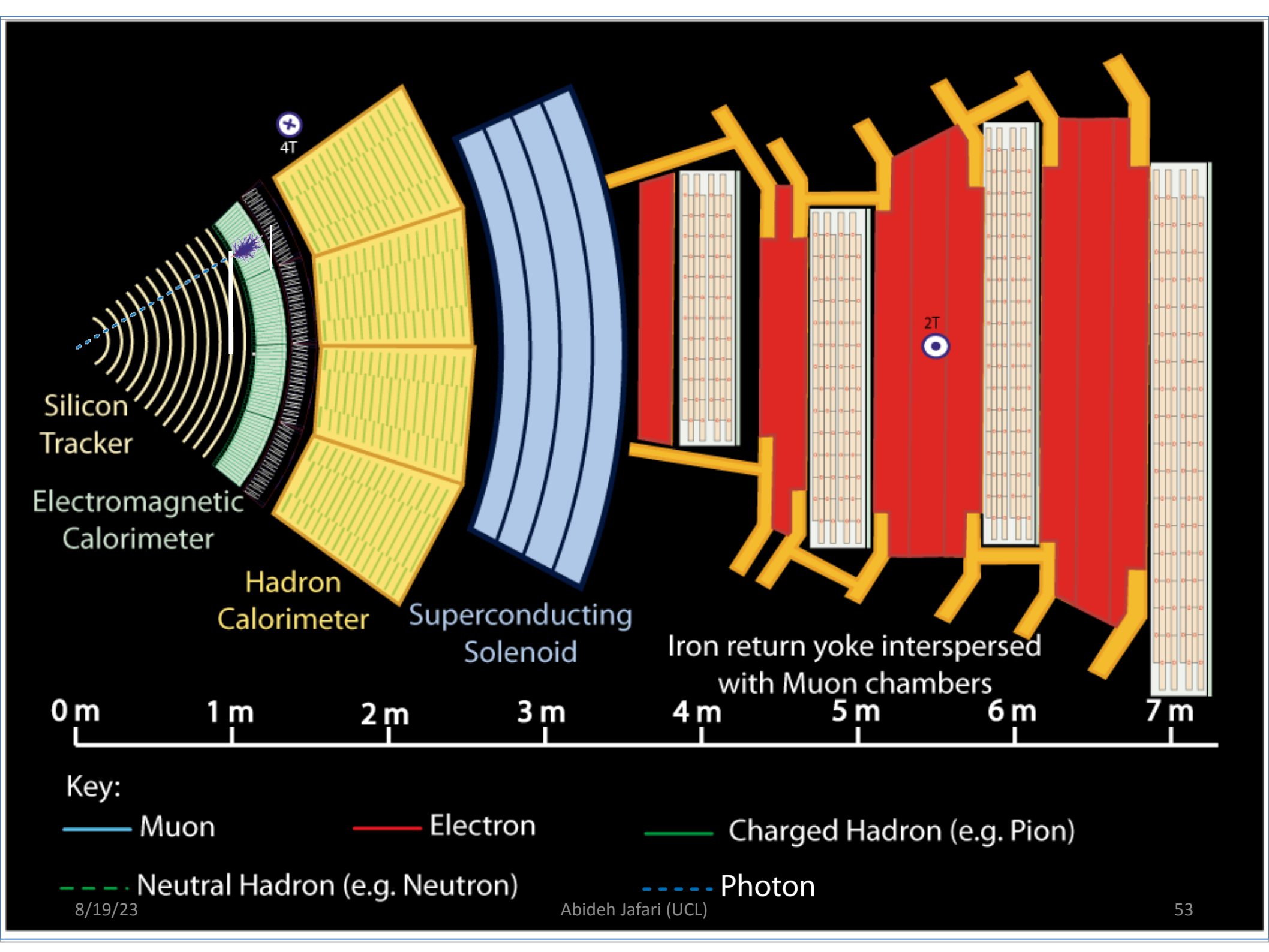
HCAL

Muon Chambers


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

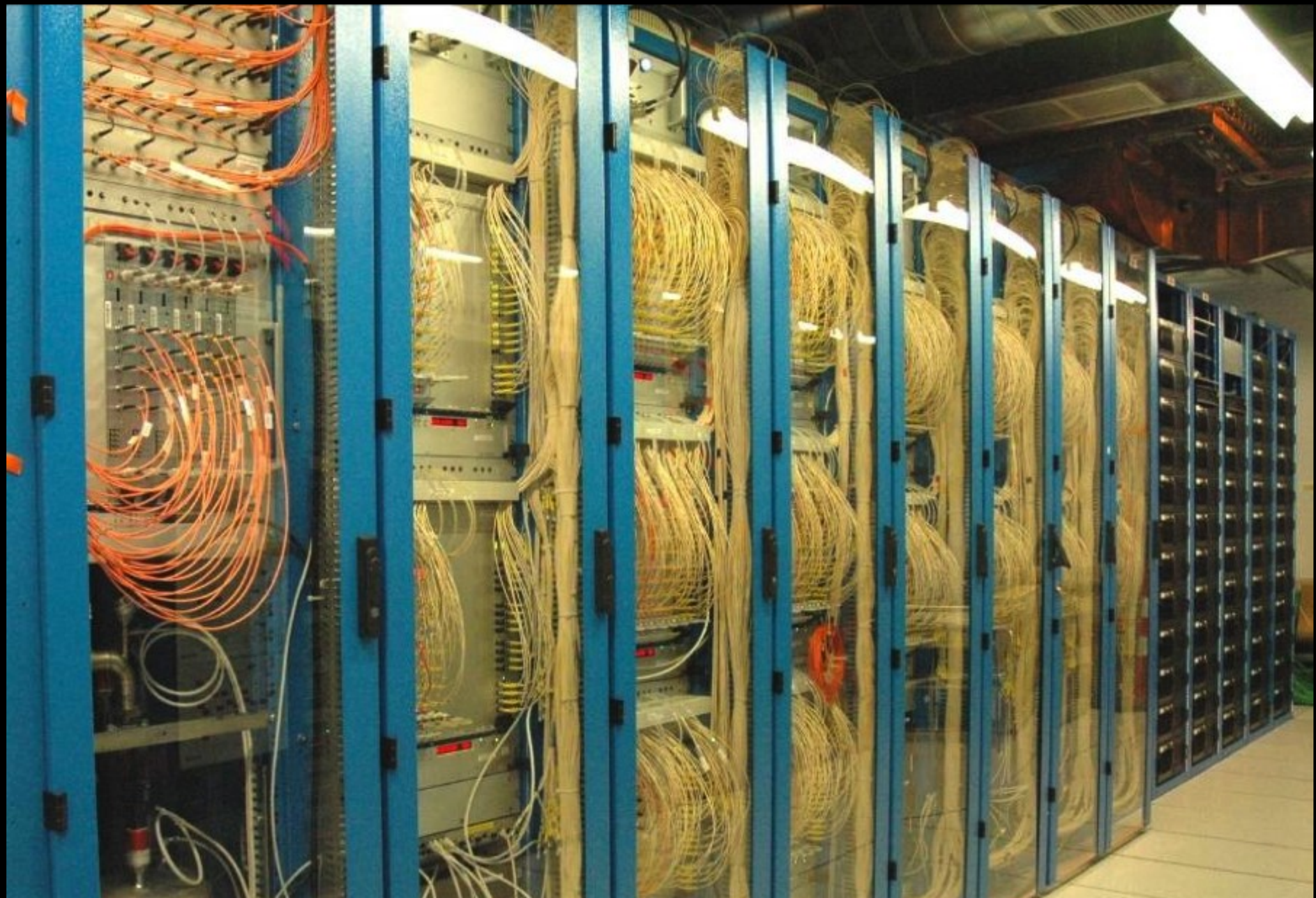

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

بازسازی داده آشکارساز بصورت ویژگیهای ذرات

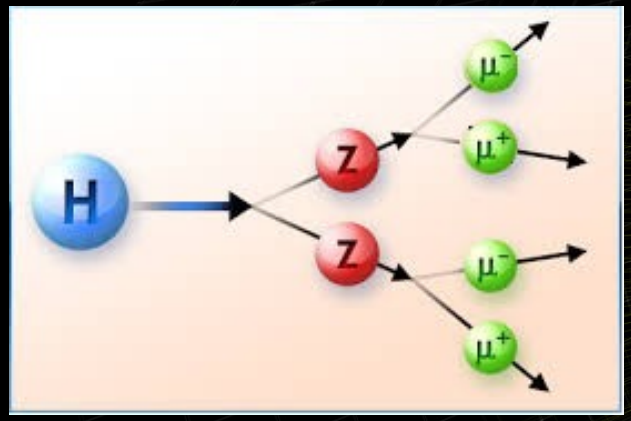
بازسازی داده آشکارساز بصورت ویژگیهای ذرات



بازسازی داده آشکارساز بصورت ویژگیهای ذرات

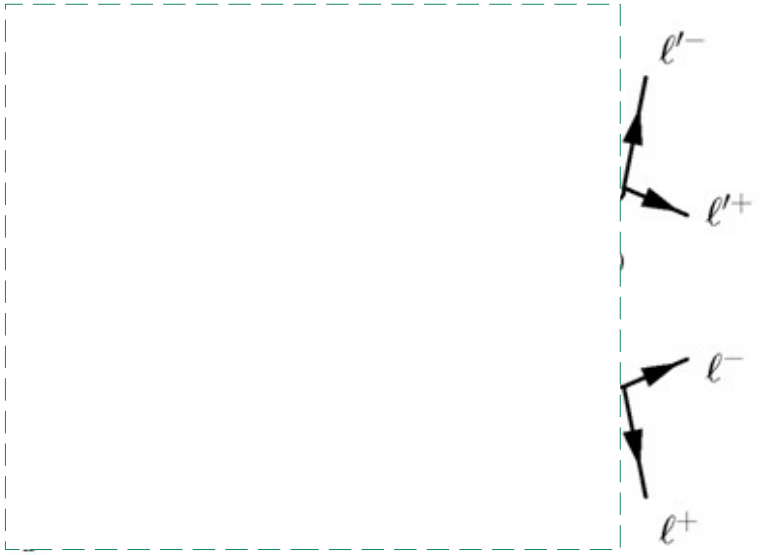
یک رویداد از میان میلیاردها رویداد!

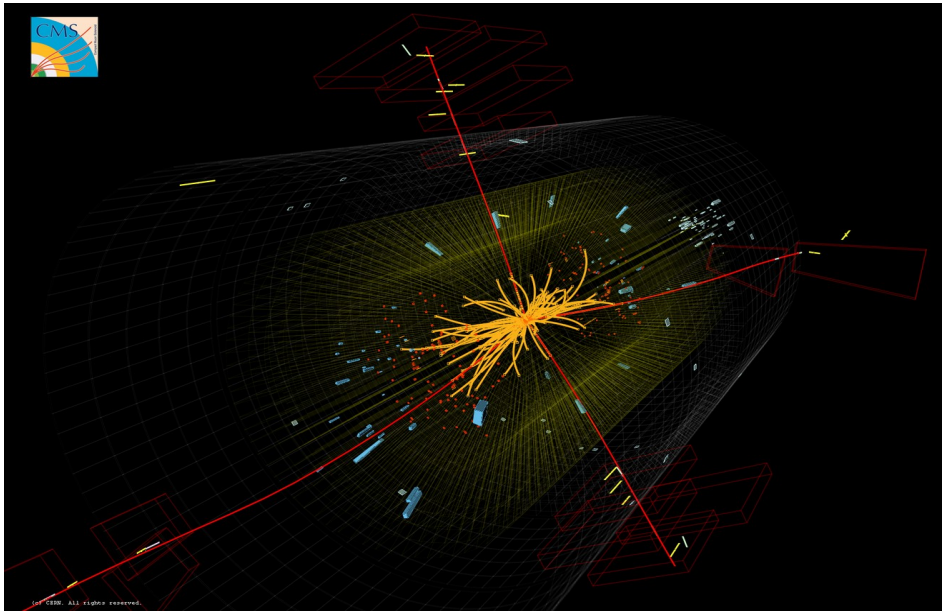
نوع ذرات، انرژی، تکانه و موقعیت
مکانی‌شان مشخص میشود



(c) CERN. All rights reserved.

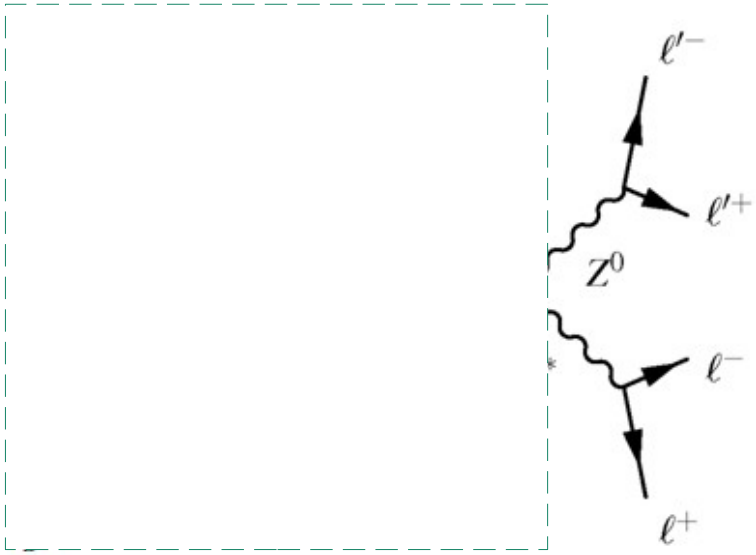
مهندسی معکوس!!!

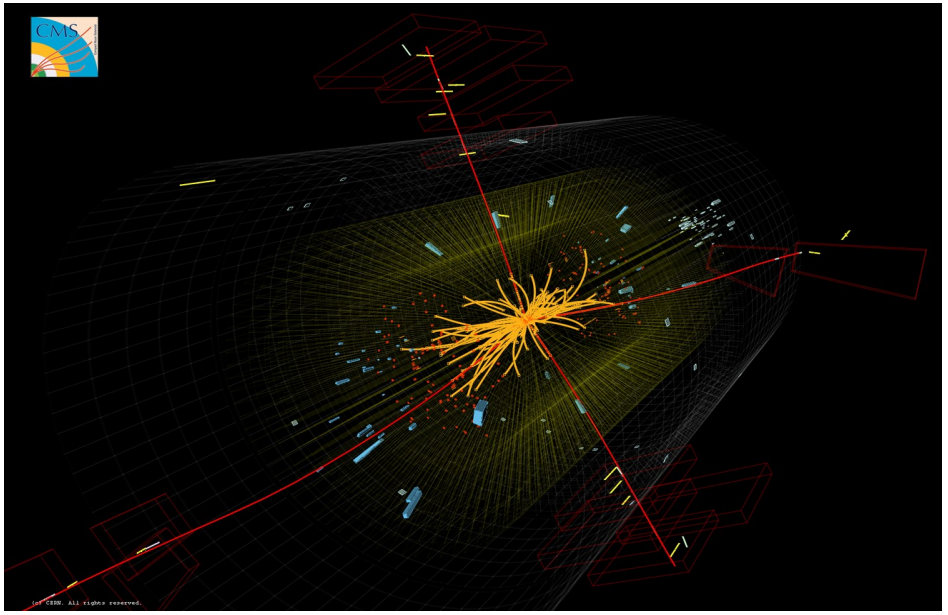




از جمع چهار-بردار محصولات می‌شود به چهار بردار ذره مادر رسید (p_x, p_y, p_z, E)

مهندسی معکوس!!!





از جمع چهار-بردار محصولات می‌شود به چهار بردار ذره مادر رسید

$$(p_x, p_y, p_z, E)$$

جرم ناوردای ذره مادر را میتوان حساب کرد.

$$p_{Z0}^4 = p_{lp}^4 + p_{\ln}^4$$

در مثال ما، این جرم حدود ۹۰ گیگاالکترون‌ولت می‌شود.

$$m_{Z0}^2 = E_{Z0}^2 - P_{Z0}^2$$

احتمالاً دو ذره Z در مسأله داریم

مهندسی معکوس!!!

از جمع چهار-بردار محصولات می‌شود به چهار بردار ذره مادر رسید

$$(p_x, p_y, p_z, E)$$

$$P_{Z0}^4 = P_{l0}^4 + P_{l1}^4$$

جرم ناوردای ذره مادر را میتوان

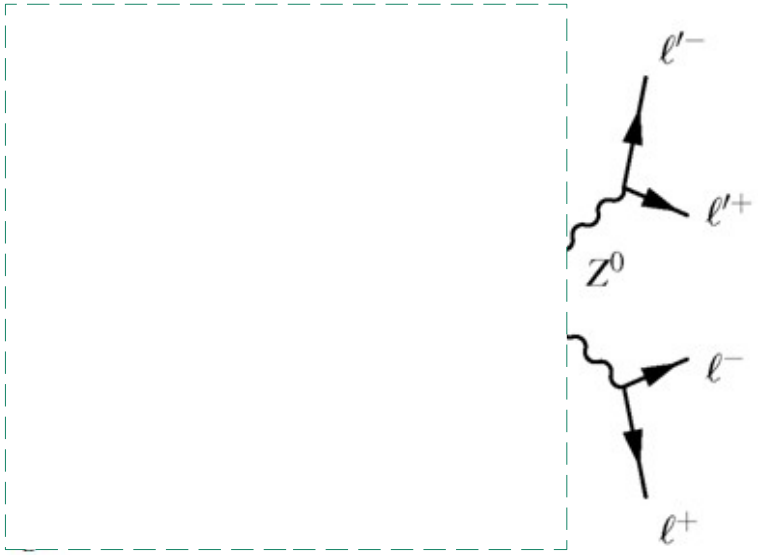
در مثال ما، این جرم حدود ۹۰ گ

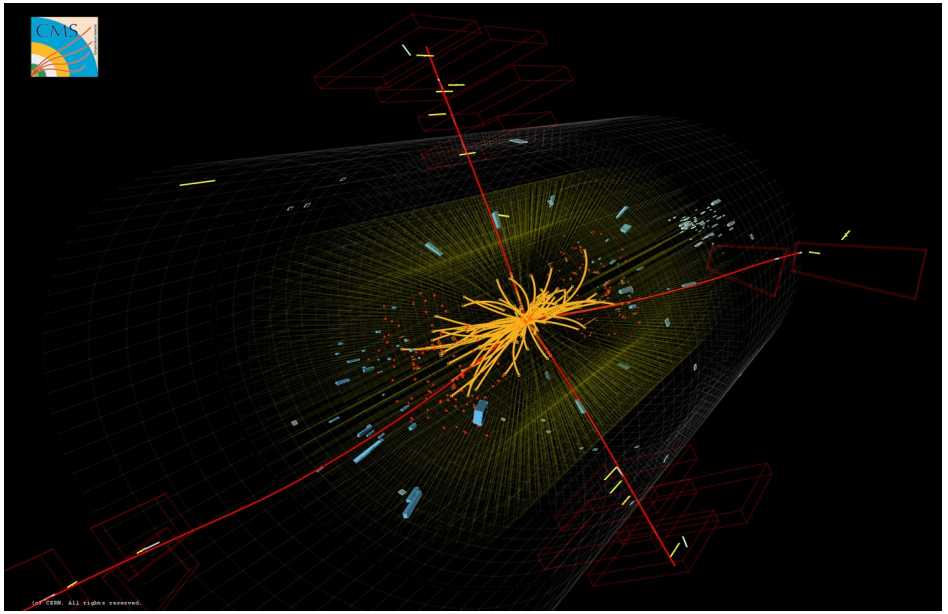
احتمالاً دو ذره Z در مسأله داریم

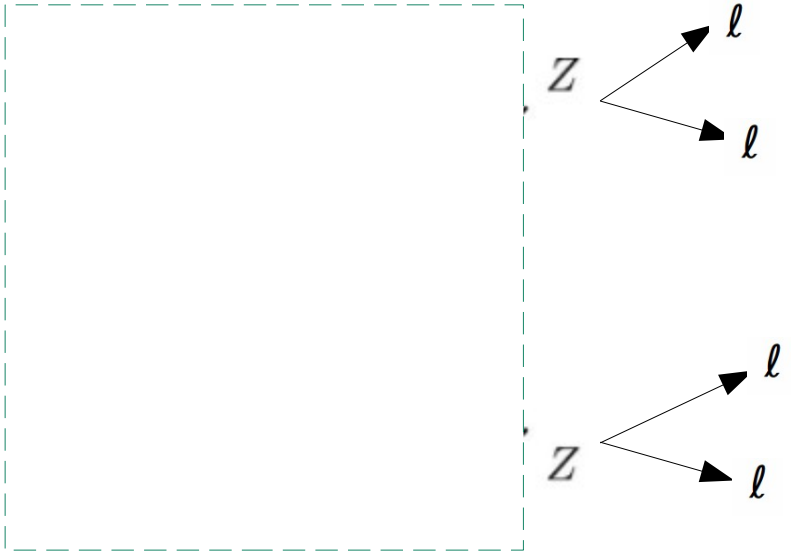
منشاء دو ذره Z چیست؟!

شاید هیگز را پیدا کرده‌ایم که به دو ذره Z واپاشی می‌کند!!

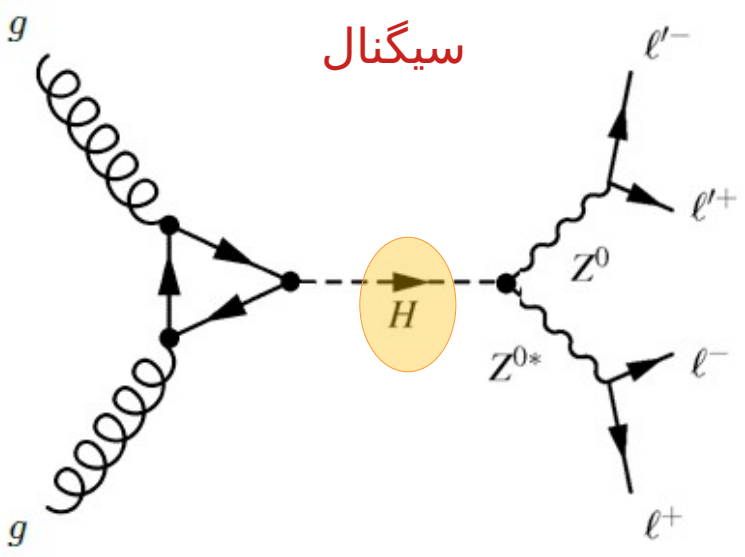
مهندسی معکوس!!!

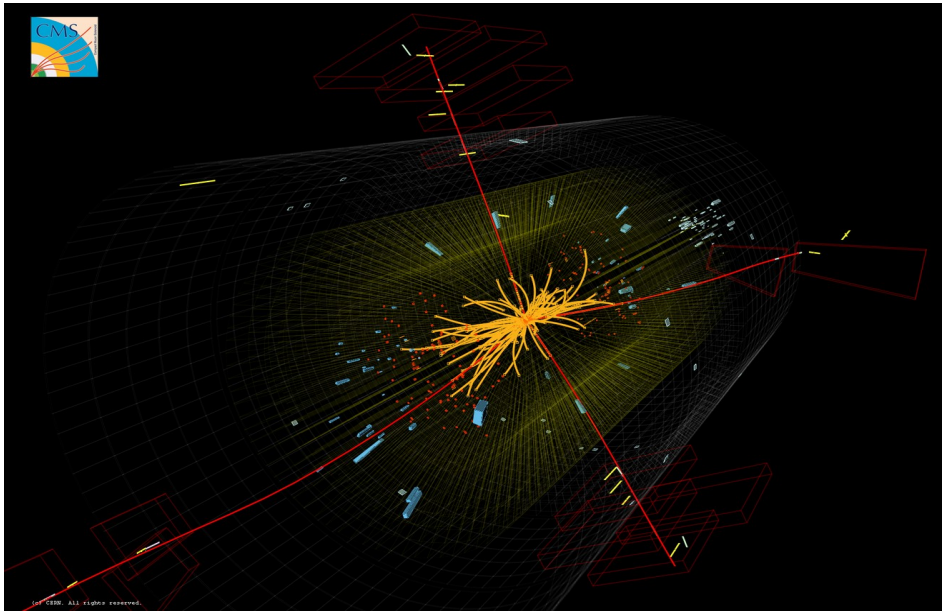


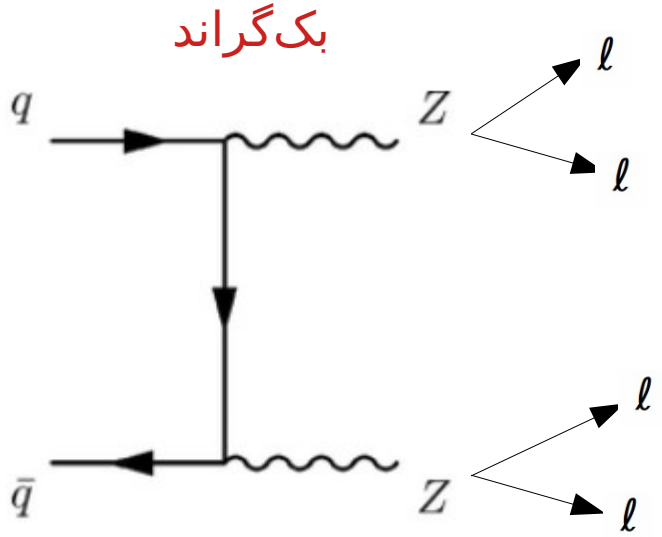


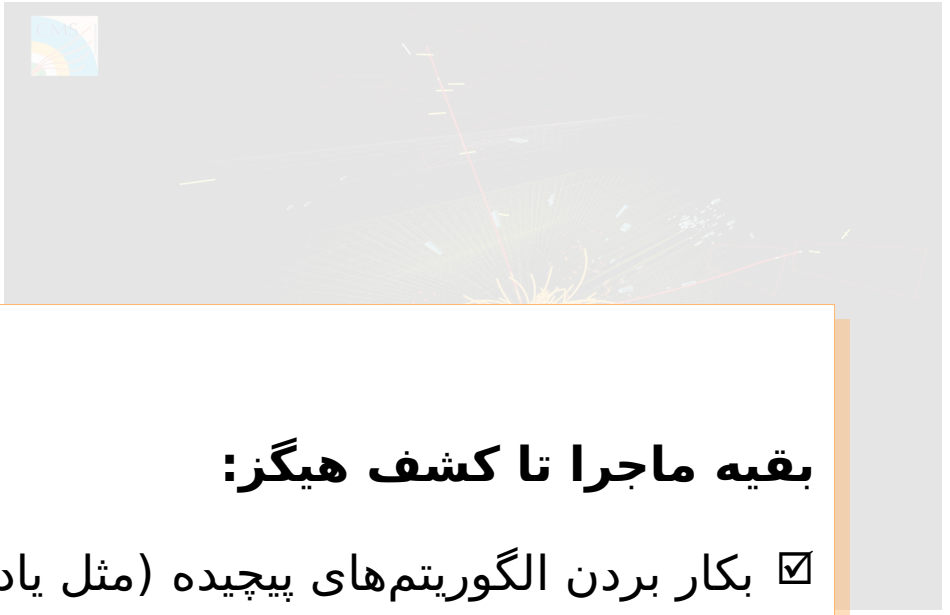


مهندسی معکوس!!!



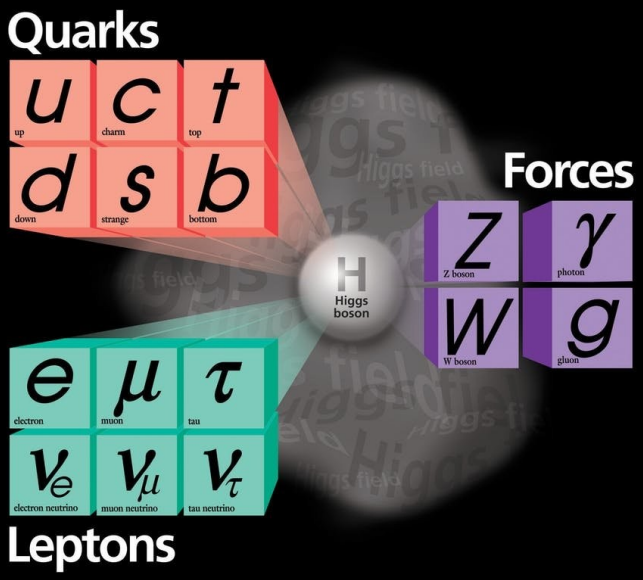




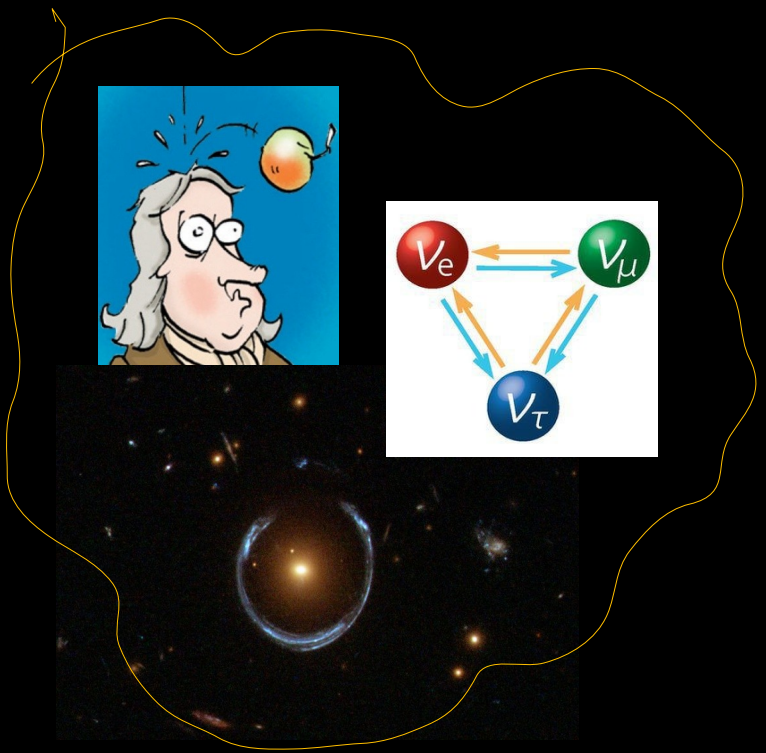


بقیه ماجرا تا کشف هیگز:

- ☑ بکار بردن الگوریتم‌های پیچیده (مثل یادگیری ماشین) برای تفکیک سیگنال و بکگراند
- ☑ بکار بردن متدهای آماری پیشرفته برای تعیین قدرت سیگنال و ادعای کشف


Quarks
u c t
up charm top
d s b
down strange bottom
Forces
Z γ
Z boson photon
W g
W boson gluon
H
Higgs boson
e μ τ
electron muon tau
νe νμ ντ
electron neutrino muon neutrino tau neutrino
Leptons

ALICE
CMS
ATLAS
LHCb


νe
νμ
ντ

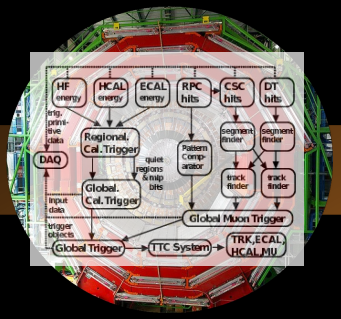
اندازه‌گیری دقیق

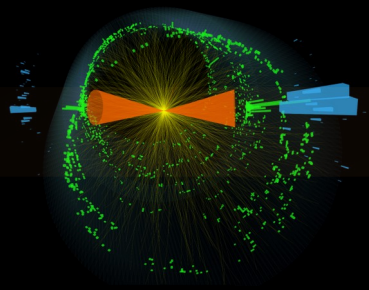
جستجو و کشف

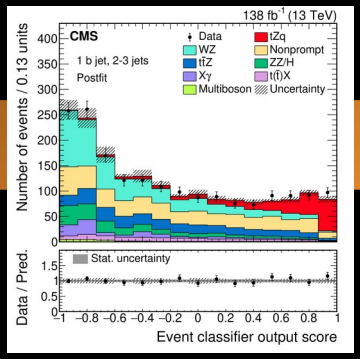
زنجیره تولید داده و آنالیز در یک نگاه

انتخاب برخط
جهت ذخیره‌سازی

جداسازی سیگنال
و بکگراند







برخورد
پروتونها

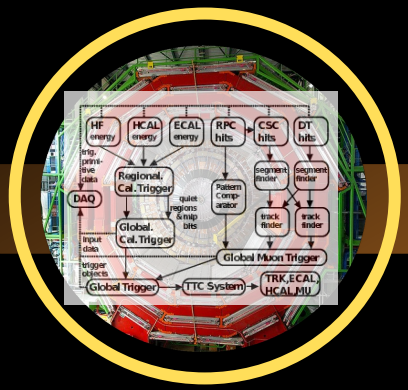
شناسایی ذرات
در آشکارساز

زنجیره تولید داده و آنالیز در یک نگاه

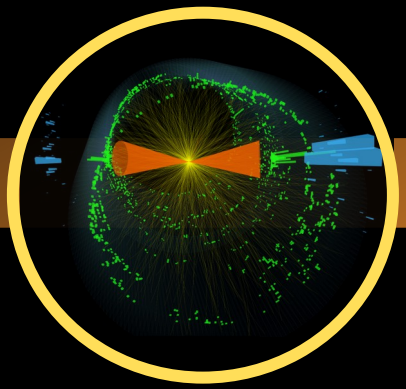
یادگیری ماشین و هوش مصنوعی

برخورد
پروتونها

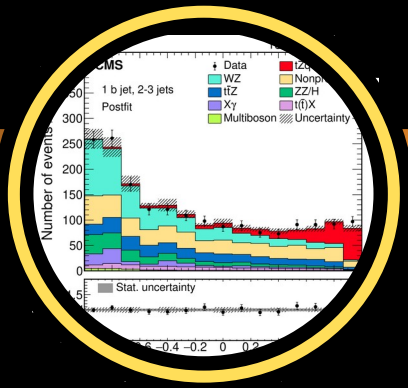
انتخاب برخط
جهت ذخیره‌سازی



شناسایی ذرات
در آشکارساز

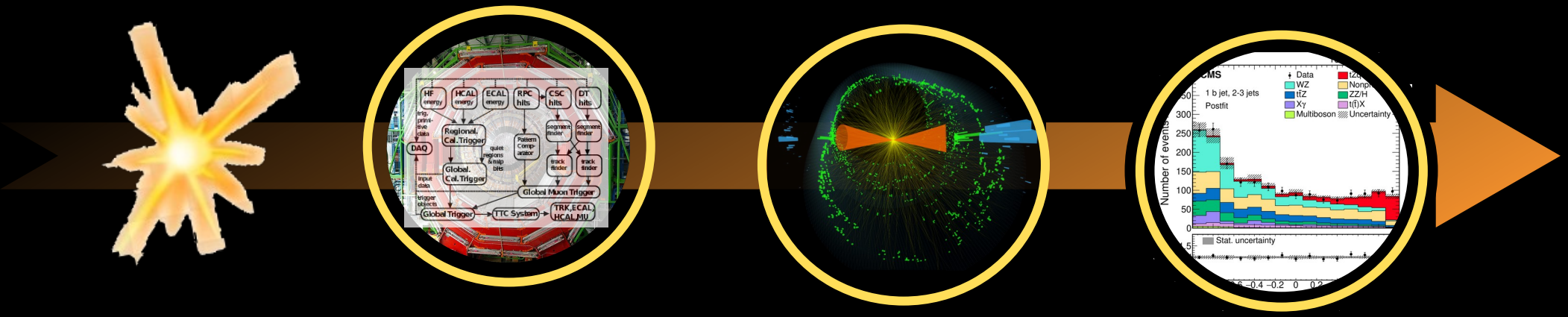


جداسازی سیگنال
و بکگراند



زنجیره تولید داده و آنالیز در یک نگاه

یادگیری ماشین و هوش مصنوعی



برخورد
پروتونها

انتخاب برخط
جهت ذخیره‌سازی

شناسایی ذرات
در آشکارساز

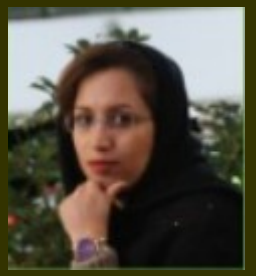
جداسازی سیگنال
و بکگراند

محاسبات کوانتومی بعنوان ابزار آینده

دانشکده فیزیک

دکتر عبیده جعفری

دکتر حامد بخشیان



دکتر الهام خزاعی

وحید صدیق‌زاده

دکتر مریم زینلی
دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده برق و کامپیوتر

دکتر اصغر غلامی

دکتر محمد صدقی

فایزه کگونانی

محمد سیچانی

دلارام طهماسبی

مهتاب جلالوندی

صالح ذریه

مهدی حاج‌مقصود