



S'ha acabat la Física?

Ramon Pascual

10 Novembre 2017

Continguts

Com creiem que és el món

Els constituents de la matèria

Les interaccions entre els constituents

El Model Standard

El Bosó de Higgs

Problemes pendents



(c) Andy Brice 1998

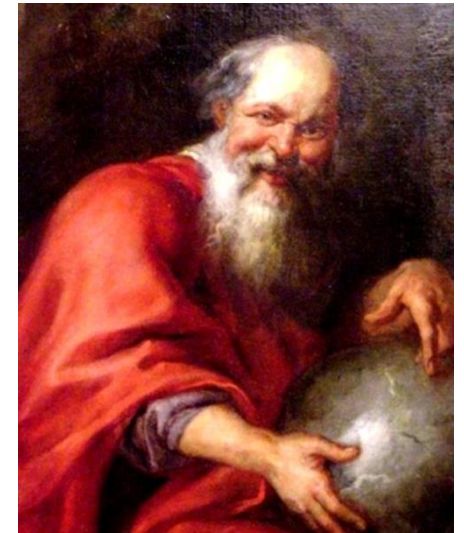
De què està fet el món?

Pels grecs hi havia quatre elements fonamentals, la terra, l'aire, el foc i l'aigua.

Demòcrit va introduir la paraula “àtom”, indivisible.

Eren els àtoms eren els blocs fonamentals de la naturalesa.

Per “**fonamental**” volem dir blocs **simples** i **sense estructura**, que no estan formats per res més petit.



Final del segle XIX: amb Maxwell i la Mecànica **la física estava acabada**

Quedaven detalls: radiació del cos negre,...

- El sentit de la vista és el que ens ha ajudat més a conèixer el món
- Durant molts anys ens hem limitat a veure el món amb els nostres ulls, que són uns magnífics detectors de la llum visible.

Més endavant auxiliant
els ulls amb microscopis

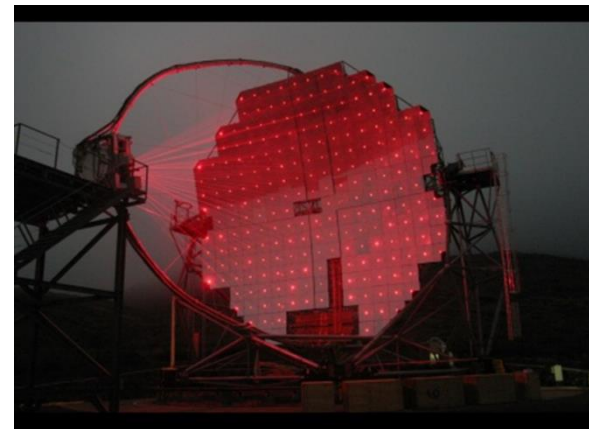


Microscopi Culpeper
Acadèmia Ciències

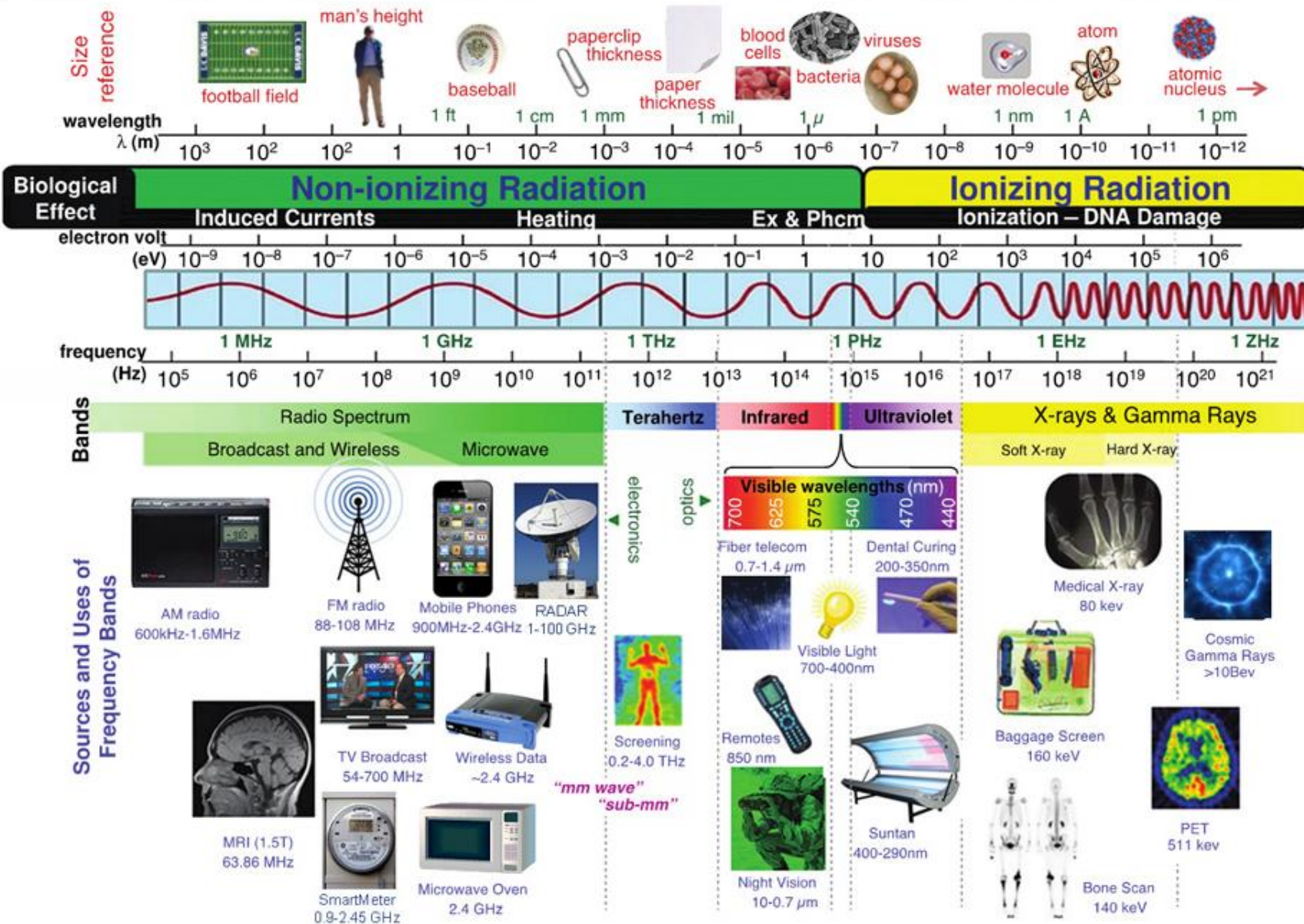


TITAN

i amb telescopis



ELECTROMAGNETIC RADIATION SPECTRUM



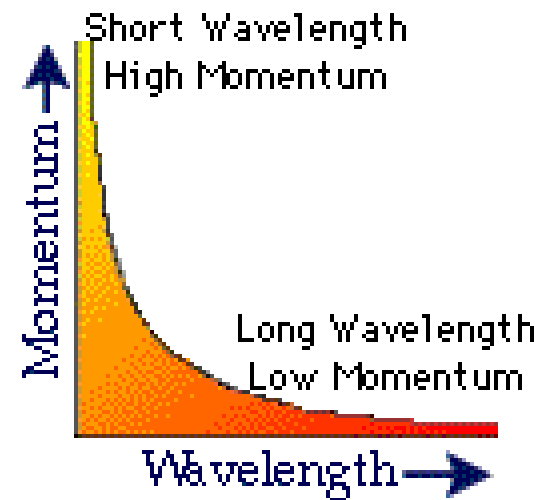
Però podem observar amb **altres projectils** que la MQ ens diu que tenen una longitud d'onda associada

$$\lambda = h/p$$

**Per augmentar p (la velocitat)
hem de fer servir els “acceleradors”**

Acceleren partícules (estables) i carregades

Normalment electrons, protons, ions
o les seves antipartícules



Alternativa als acceleradors: La radiació còsmica

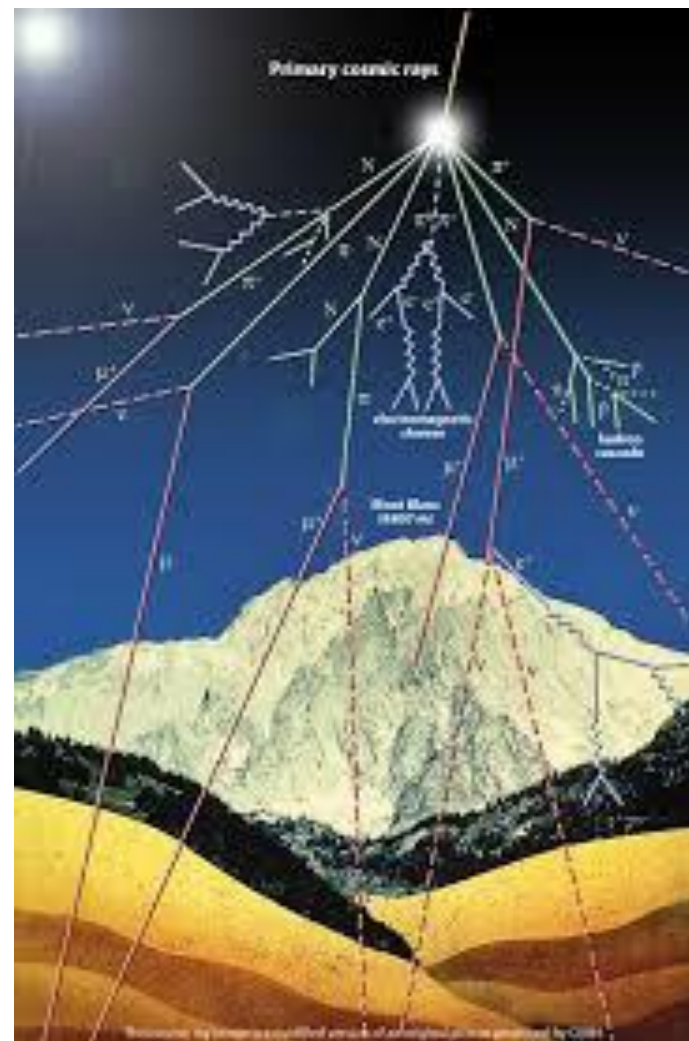
Descoberta el 1912 per Viktor Hess

Va permetre descobrir el positró, el muó,
el pió, ...

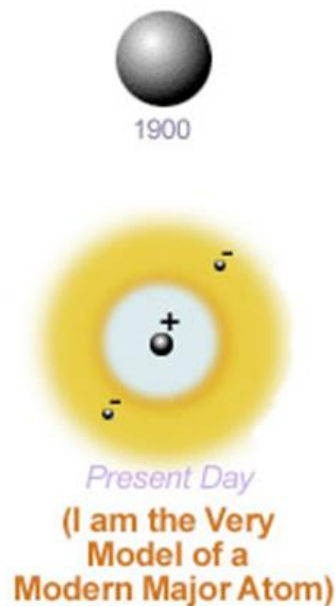
Fins que cap als 1950 el seu poder va ser
substituït pels **grans acceleradors** del
moment

De fa uns anys s'ha recuperat el seu
paper, atés que els més energètics tenen
energies més grans que els acceleradors
més grans esperats (10^{20}eV)

Projecte Auger, CTA,...



Els àtoms



Periodic Table of the Elements

1																	2	
3	4																	10
11	12	13	14	15	16	17	18									36		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	

Naming conventions of new elements

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

* Lanthanide Series
+ Actinide Series

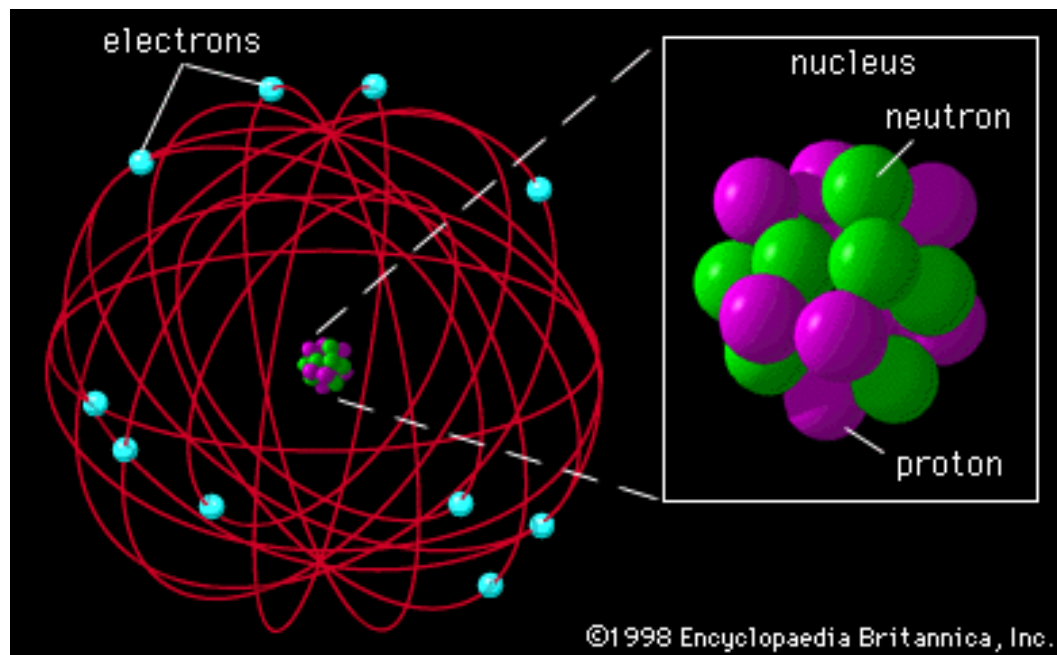
És l'àtom fonamental?

- Al segle XIX es va observar que es podien agrupar els àtoms en grups que compartien propietats químiques similars (formant la **Taula Periòdica dels Elements**).
- Model de Bohr: una gran massa central, el **nucli**, i electrons perifèrics que determinaven les propietats químiques dels elements
- Per comptes d'un centenar de nuclis, un per cada àtom, millor pensar en **constituents més simples**: els **protons** i, més endavant, els **neutrons**.

El model atòmic

Els electrons i els protons

Els àtoms són els constituents de tot el que ens envolta. Són molt petits: una dècima de nanometre ($1 \text{ nm} = 10^9 \text{ metres}$).



Estan formats per electrons i nuclis centrals (cent mil vegades més petits, formats a la vegada per protons i neutrons).

En els nuclis es produeixen els processos “nuclears” dels que no ens ocuparem

Els electrons i els protons tenen càrrega elèctrica i són estables.

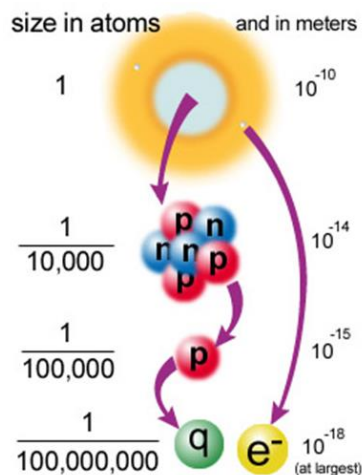
Es poden accelerar

Com són els àtoms?



Cada element te un nombre Z de **protons**, igual al d'electrons perifèrics, i uns quants **neutrons** (descoberts a inicis dels 1930).

Aixp explicava els **isòtops** d'un element



La **massa** del protó es **2000** vegades més gran que la de l'electró

Un àtom és petit (10^{-10} metres), el nucli es encara deu mil vegades més petit (10^{-14} metres).

Els electrons són com a mínim encara més de mil vegades més petits. Segur que són més petits que 10^{-18} metres; podrien ser puntuals però no ho sabem.

Cap a finals dels anys 1960, **els acceleradors**, van posar de manifest que els protons i els neutrons, i les desenes de partícules que s'havien anat descobrint, estaven formades per **parts (partons)** més petites: **els quarks**

Igual que a principis de segle es va veure que els àtoms tenien parts: electrons i nuclis.

Els quarks

Els **quarks** van ser proposats el 1964 per Murray Gell-Mann (i George Zweig), com a components dels centenars de partícules que s'havien anat descobrint.

Totes es podien explicar com a combinacions de només **tres** quarks: Protons i neutrons compostos de dos quarks, el **up** i el **down**, més un tercer, **l'estrany**, per altres partícules "estranyes"

- Gell-Mann els va anomenar "**quarks**" (pronunciat "kworks") una paraula inventada per James Joyce a *Finnegan's Wake*:
"Three quarks for Muster Mark!"



- Per a que el model funcionés els quarks havien de tenir càrregues elèctriques fraccionàries de $2/3$ i $-1/3$ la càrrega de l'electró. Mai s'havien observat càrregues fraccionàries.
- Mai s'han observat quarks lliures, de manera que molt temps es varen considerar una **ficció matemàtica**.

- Els dos quarks més lleugers són el **up** i el **down**

- El tercer quark es l'**strange** (de l'“estranya” vida mitjana de la partícula K, la primera partícula composta (que es va trobar a la radiació còsmica i es va denominar “estranya” que el contenia).

- El quart quark és el **charm**. Es va descobrir el **1974 al Brookhaven National Laboratory** i es va identificar quasi simultàniament al Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) en la partícula J/Psi.

- El cinquè i sisè quarks primer es van anomenar “truth” i “beauty”, o top i bottom.

- El quark bottom es va descobrir a Fermi National Lab (Fermilab) el **1977**, en una partícula composta anomenada Upsilon.

- El quark **top** es va descobrir a **Fermilab (TEVATRON)**, el **1995**, 20 anys després de predir-se la seva existència. És el més massiu (com la massa d'un àtom de plata).

Els quarks

- Els **quarks** (i els nuclis) són la major part de la matèria que veiem.

- Els **6 quarks**, s'agrupen en tres famílies, tres "sabors":
up/down,
charm/strange,
top/bottom.

(Per a cada quark hi ha el seu corresponent **antiquark**.)

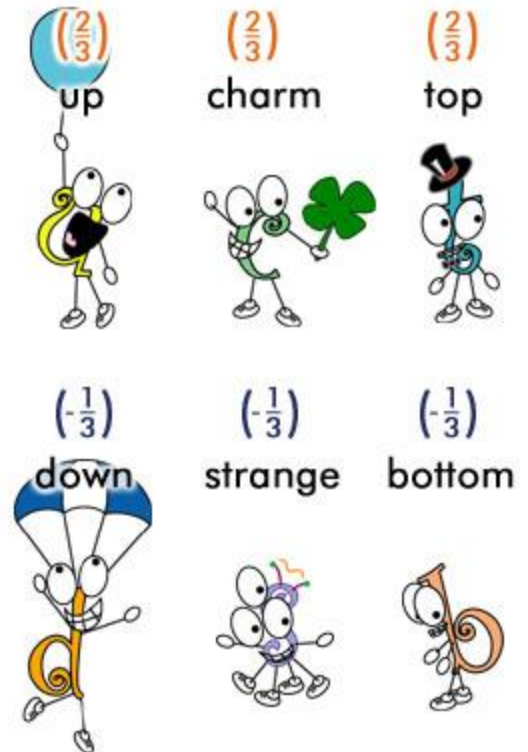
Els quarks tenen una càrrega elèctrica **fraccionària**, mentre que el protó i l'electró, tenen càrregues elèctriques +1 i -1 respectivament.

p (uud)

n (udd)

Altres partícules com els **mesons** son parelles quark-antiquark

(Ara hi ha alguna altre partícula de **4 o 5 quarks**: **tetraquark** states in $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S)$, **pentaquark** "molecule" $\Omega_c(3188)$)



Els leptons

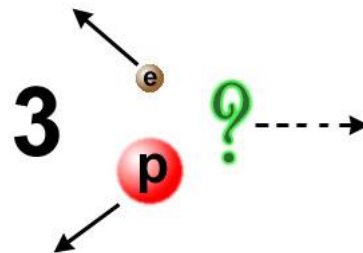
- Els anys 1940 es van trobar altres partícules elementals
- Una de les primeres va ser el **muó**, un “electró” de massa unes 200 vegades més gran (a la radiació còsmica)
- Més endavant es va trobar un nou leptó, la partícula tau de massa quasi dues vegades la del protó
- De manera que teníem tres **famílies**
 - 3 parelles de quarks
 - 3 leptons (e , μ , τ)

Isaac Rabi



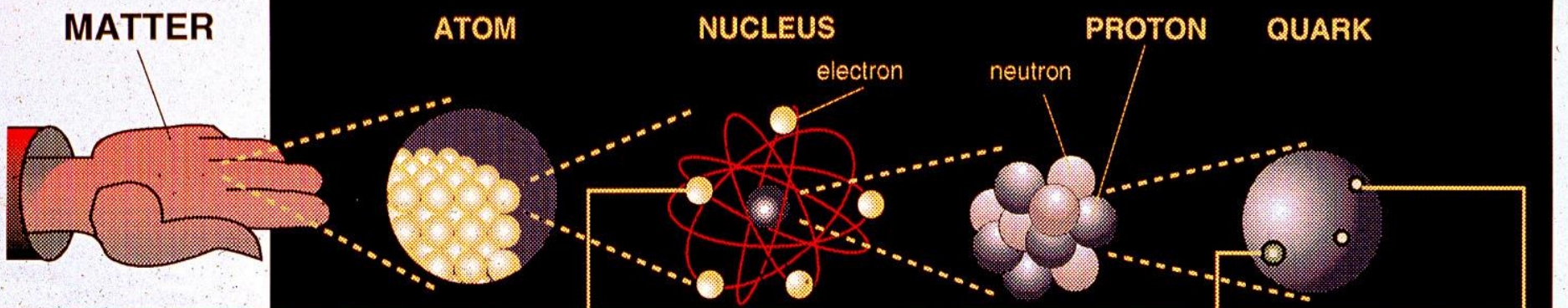
Són de spin $\frac{1}{2}$, **fermions**

Els neutrinos



- La desintegració beta dels nuclis va portar a Pauli a postular el (anti)**neutrino**.
- No tenia càrrega elèctrica i quasi bé no interaccionava amb les altres partícules. La majoria de neutrinos passen a **través de la terra** sense ni tan sols interaccionar amb cap dels seus àtoms.
- Es va tardar **30 anys** a detectar-lo (a les proximitats d'un reactor nuclear)
- Avui coneixem **3 neutrinos** (i els seus antineutrinos), associats als 3 leptons...
- Molt de temps es va pensar que la seva massa semblava era nul·la. Ara sabem que es d'uns pocs eV (atenció als Nobels futurs)
- Com els neutrinos es van produir en gran abundància a l'univers primitiu i rarament interaccionen amb la matèria, n'hi ha molts a l'univers.

Els components



ALL ORDINARY MATTER BELONGS TO THIS GROUP.



LEPTONS	
electron Electric charge -1 . Responsible for electricity and chemical reactions	electron neutrino Electric charge 0 . Rarely interacts with other matter.

QUARKS	
up Electric charge $+2/3$. Protons have 2 up quarks Neutrons have 1 up quark	down Electric charge $-1/3$ and one down quark. ... and two down quarks.

THESE PARTICLES EXISTED JUST AFTER THE BIG BANG.



NOW THEY ARE FOUND ONLY IN COSMIC RAYS AND ACCELERATORS.

muon A heavier relative of the electron.	muon neutrino Created with muons when some particles decay.
tau Heavier still.	tau neutrino Not yet observed directly.

charm A heavier relative of the up.	strange A heavier relative of the down.
top Heavier still, recently observed.	bottom Heavier still.

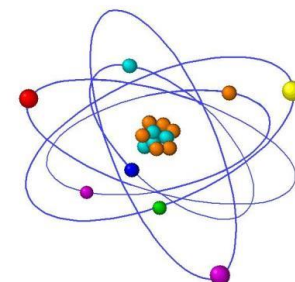
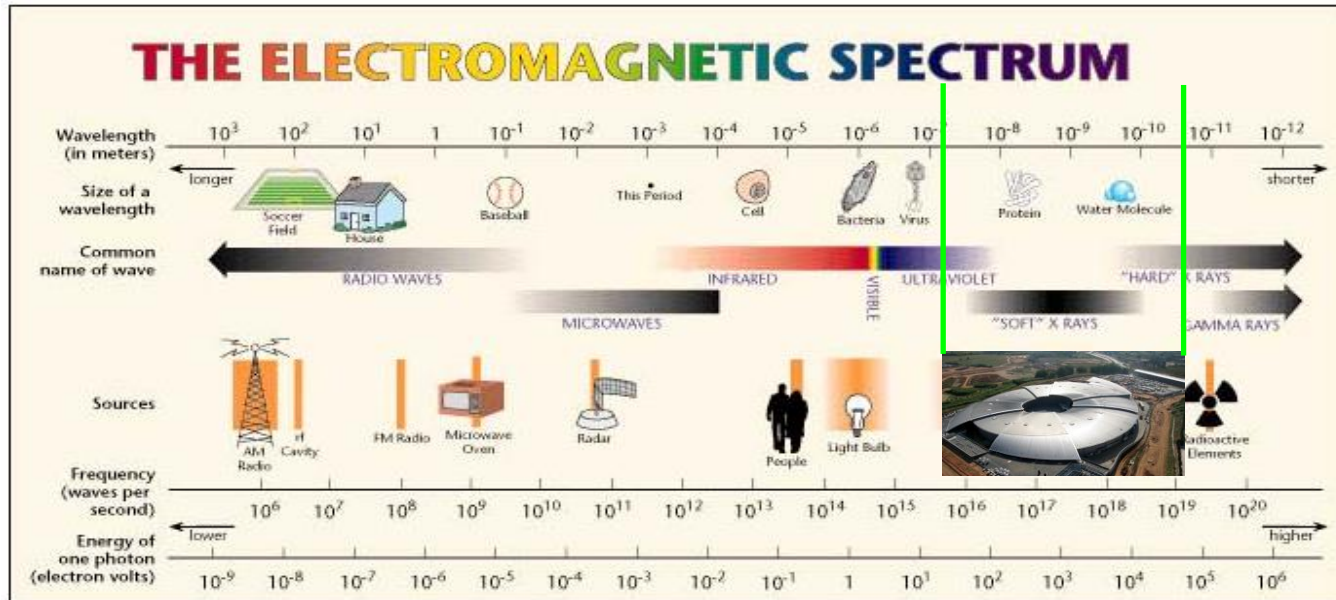
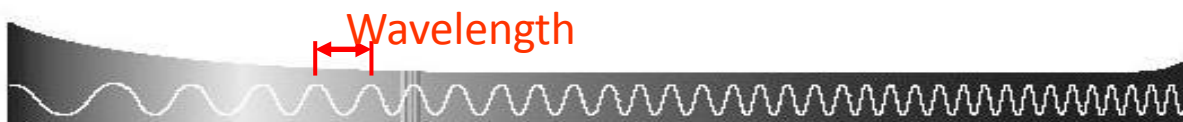
ANTIMATTER

Each particle also has an antimatter counterpart ... sort of a mirror image.



Les interaccions

- La **gravitació** és coneguda des de l'antiguitat (encara que només entesa des de Newton (i Einstein: Les ones gravitacionals))
- L'**electromagnetisme** també és conegut des de fa molt (encara que només entès i unificat des de Maxwell (QED))



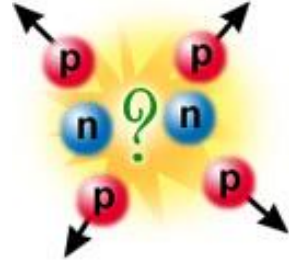
Què lliga els nuclis dels àtoms?

- Hi ha un problema amb els àtoms: **Quina força lliga els nuclis?**

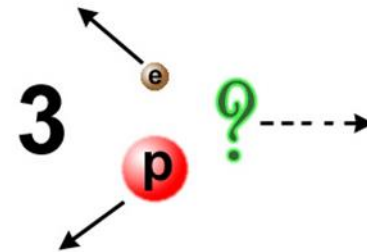
(un conjunt de protons (positius) i neutrons (neutres))

No amb les forces electromagnètiques.

Ni amb la gravetat, que és massa dèbil per superar la repulsió elèctrica



- Tampoc s'entenia la **radioactivitat beta**, que fa que un neutró es “transformi” en un protó i un electró (i un antineutrino)



Les quatre interaccions

S'inventen dos nous tipus de forces, d'abast molt curt:

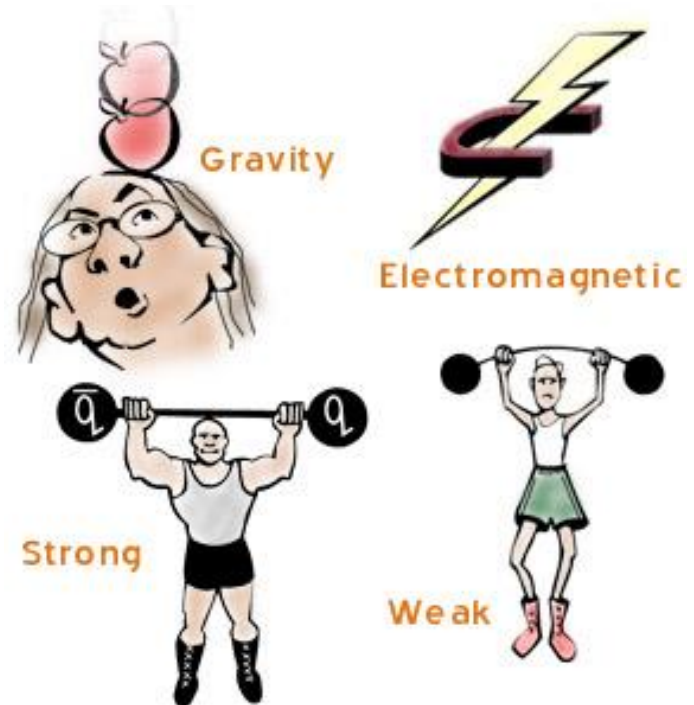
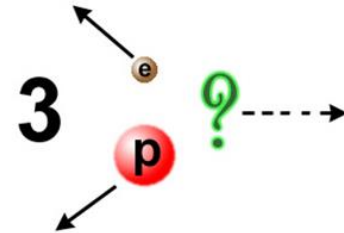
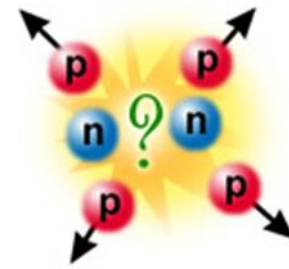
les nuclears fortes
les nuclears dèbils

• Hi ha quatre interaccions fonamentals, i **totes les forces del món es deuen a aquestes quatre interaccions!**

En termes quàntics les forces són degudes a l'**intercanvi de partícules** de spin 0, els **bosons intermediaris**

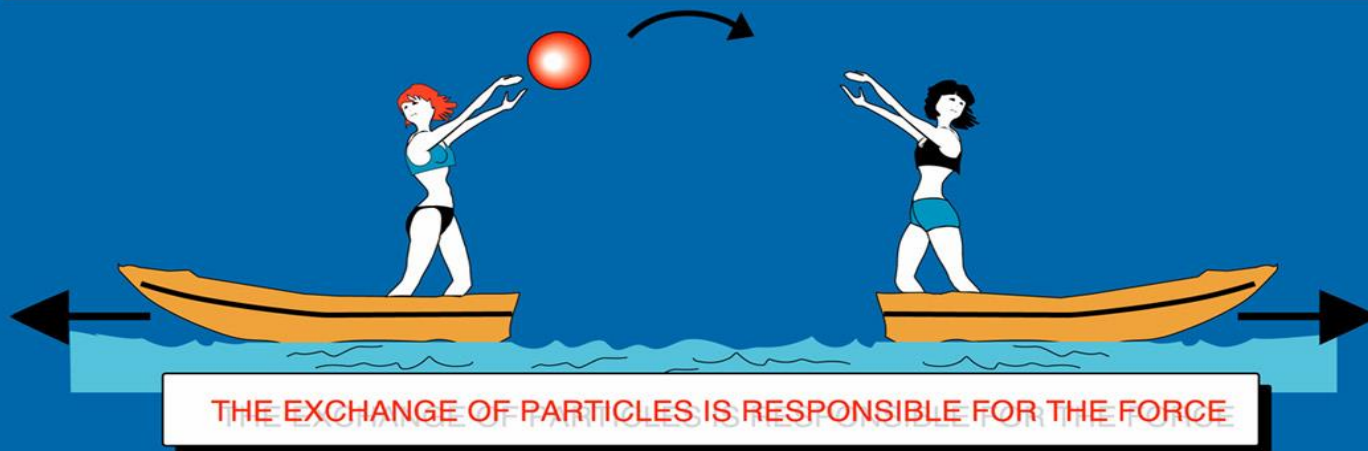
L'electromagnetisme per l'intercanvi de **fotons**
L'electrodinàmica quàntica (QED)

la gravetat és per l'intercanvi de **gravitons**
La gravetat quàntica???



The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES



La força dèbil: per l'intercanvi de W i Z

Unificada amb la em: **La teoria electrodèbil**

La nuclear forta: per l'intercanvi de gluons

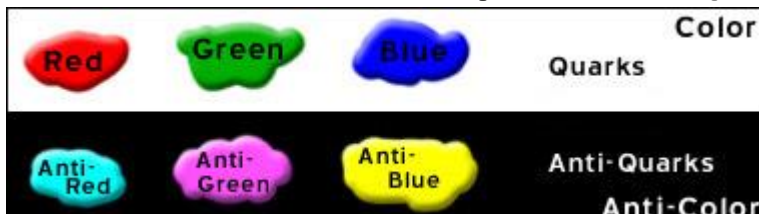
- Els quarks i els gluons són partícules amb “**càrrega de color**”.
- Les partícules amb càrrega de color intercanvien **gluons**



Quan dos quarks estan propers **intercanvien gluons** i creen un molt intens camp de forces de **color** que lliga els quarks.

El camp de forces es fa més intens a mida que els quarks se separen.

La Cromodinàmica quàntica (QCD)



El Model Estàndard

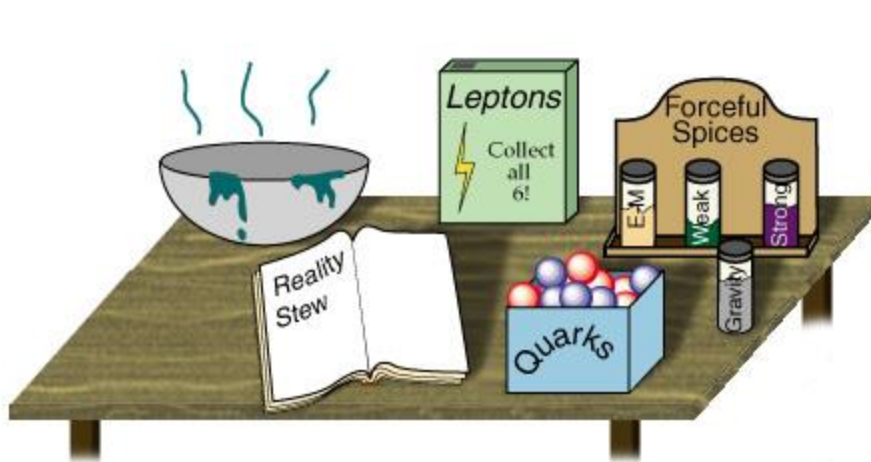
- Els físics han construït una teoria anomenada el **Model Estàndard** que explica de què està fet el món i què el manté unit. És una teoria simple i general que explica els centenars partícules i les seves interaccions amb només:

6 quarks

6 leptons (el leptó més conegut es l'electró)

les partícules que transmeten les forces.

- Totes les partícules conegudes estan formades per quarks i leptons, i interaccionen intercanviant les partícules que transmeten les forces.



				
	Gravity	Weak Electromagnetic (Electroweak)	Strong	
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

Èxits del Model Estàndard

Factor giromagnètic del muó ($g-2$)

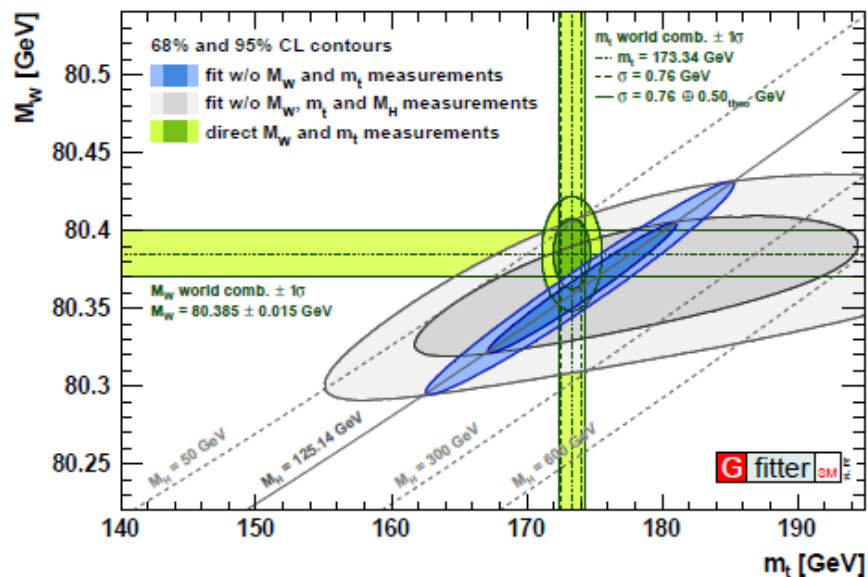
Mesura: 0.001 165 920 9(6)

Càlcul: 0.001 165 918 04(51)

Factor giromagnètic de l'electró ($g-2$)

Mesura: 0.001 159 652 180 73(28)

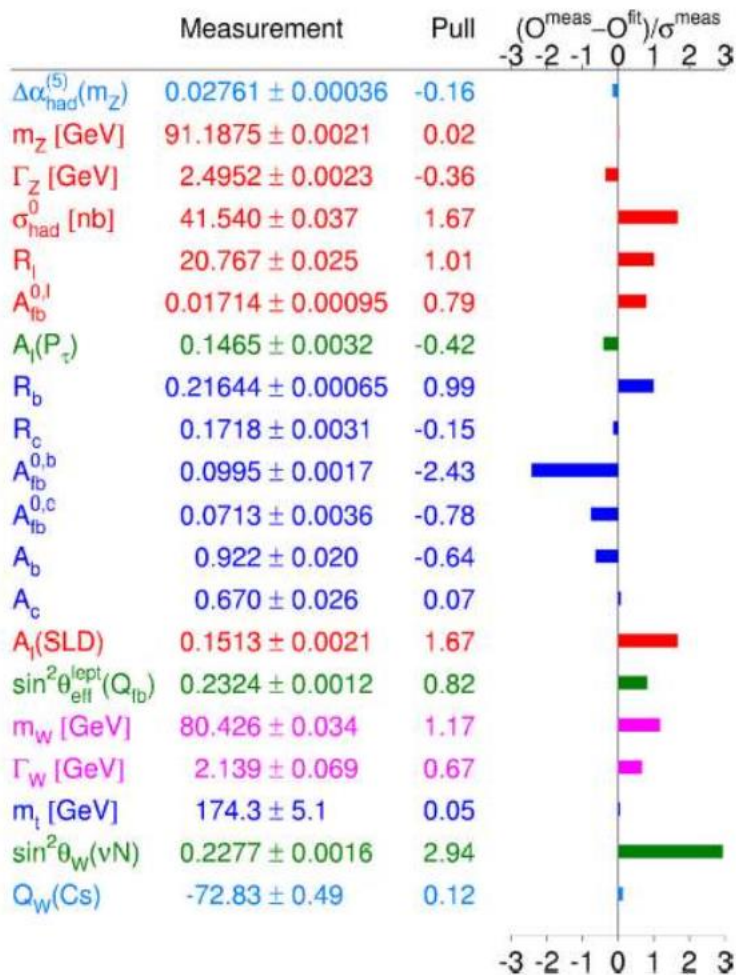
Càlcul: 0.001 159 652 181 643 (764)



A. Pich

Figure 1: SM electroweak fit in the m_t - M_W plane, with (blue) and without (gray) the Higgs mass, compared with the direct measurements of the top and W masses (green) [42].

Global SM Fit



Fit to all data:

$$\chi^2/\text{dof} = 25.5 / 15 (4.4\%)$$

Fit without NuTeV:

$$\chi^2/\text{dof} = 16.7 / 14 (27\%)$$

fitted parameters
almost unchanged

Stephan Roth

Però totes les partícules i les transmissores haurien de tenir **massa zero**! Però això no és així. Per exemple, els bosons Z i W tenen masses de l'ordre de **90 àtoms d'hidrogen**

Faltava alguna cosa que **donés massa a les partícules**,...
La possibilitat més plausible seria **el bosó de Higgs**

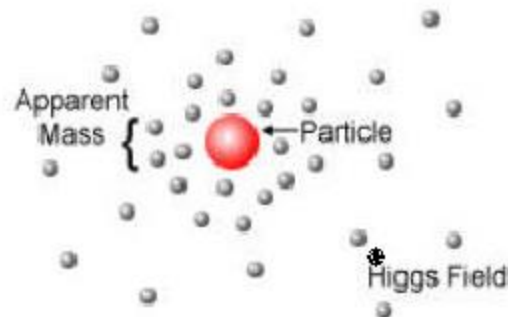
Però el SM no dona pistes sobre la massa del Higgs
S'esperava trobar-lo en un colisionador
d'electrons i positrons: **el LEP**

**Però el LEP es va limitar a confirmar el MS amb gran
precisió (1%)**

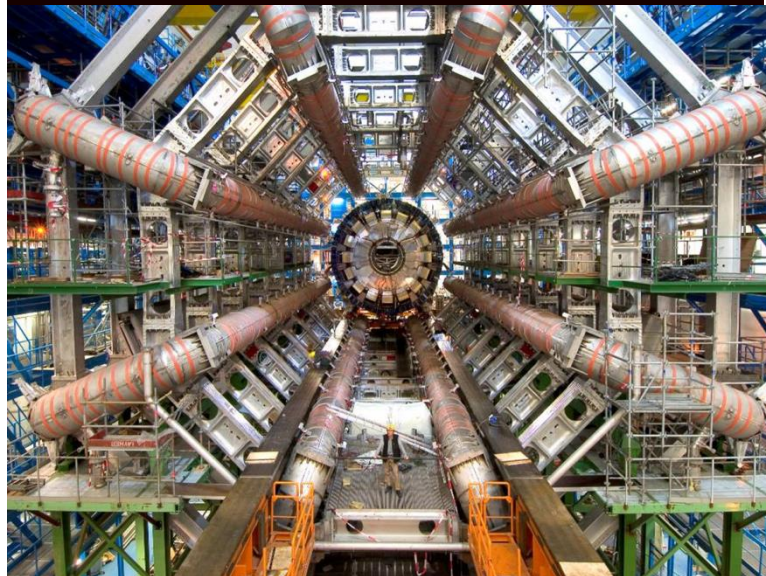
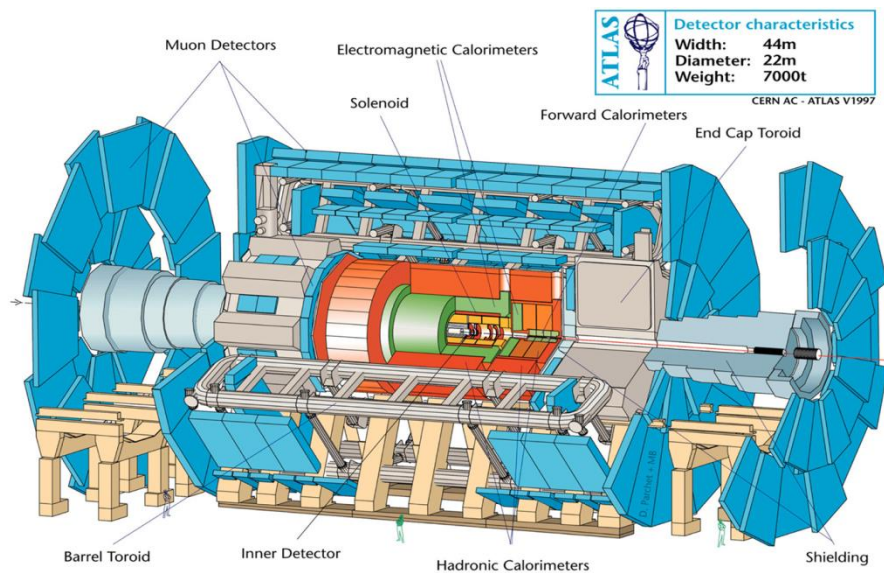
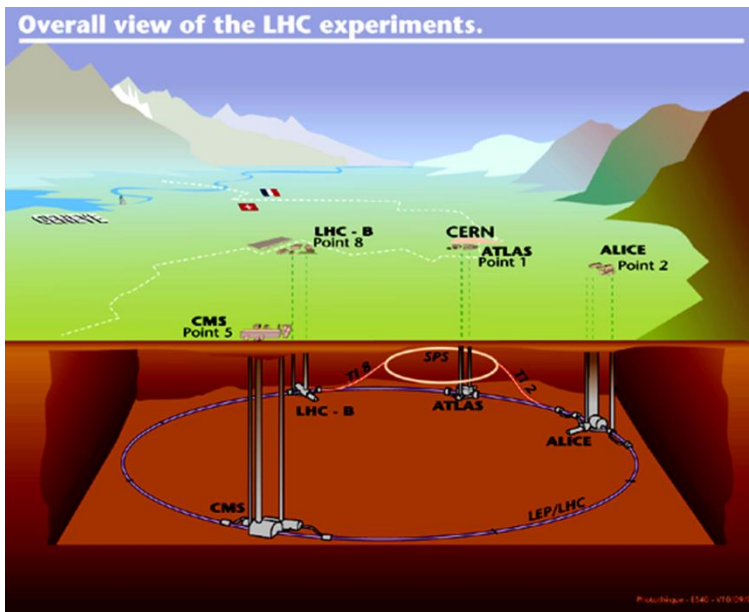
Necessitavem densitats d'energia encara més grans: el LHC

QUÈ ÉS EL BOSÓ DE HIGGS?

- És un **camp de força** que
 - Està a tot l'espai
 - No té direcció
 - Té el mateix valor per tot arreu
 - No té font (al contrari dels camps electromagnètics, o gravitacionals, que s'originen en les càrregues elèctriques o en les masses)
 - *La partícula és un quantum del camp*
- Intuitivament: *penseu que us moveu dins una piscina:* – us costarà caminar, pensareu que teniu més massa de la real...
 - Pot ser una forma raonable de representar-se mentalment el camp de Higgs



La cerca del bosó de Higgs

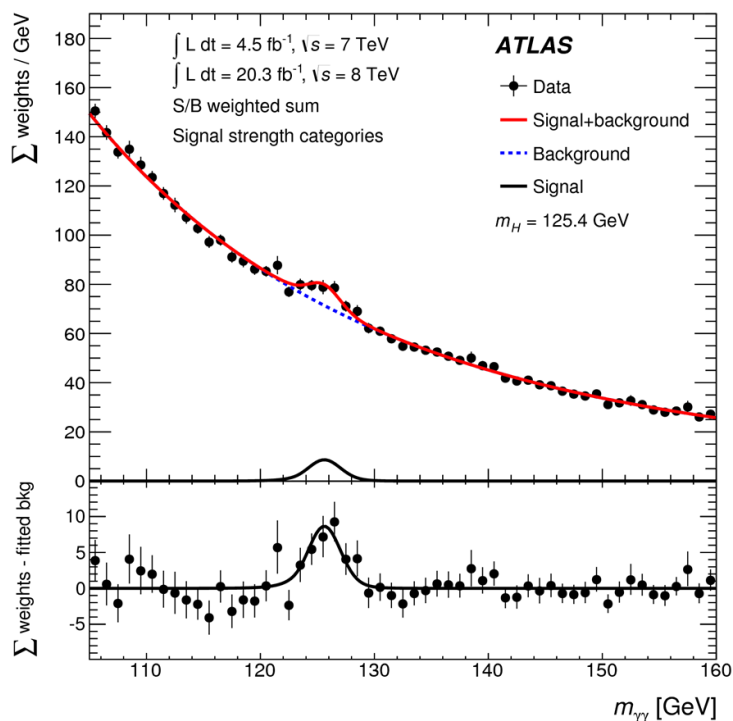


Per explicar perquè les masses no són zero,
una possible explicació és

el bosó de Higgs (imaginat el 1964)

Englert and Brout+

Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen and Tom Kibble,



$H \rightarrow \gamma\gamma$



Peter Higgs al CERN (el 4 de juliol de **2012**) a l'anunci de la descoberta

«El meu dubte no era si la meua teoria era correcta, sino si viuria per a veure-la provada»



The Nobel Prize in Physics **2013**.
François Englert, Peter Higgs

PER QUÈ HEM TRIGAT 48 ANYS A TROBAR-LO?

La teoria

- Preveu totes les propietats del Higgs, però NO LA SEVA MASSA, i no se sabia on buscar-lo
- Progressivament es va pensar que la massa havia de ser relativament gran (100-200 atòms d'hidrogen)
- Es desintegra ràpidament: només es pot *veure pels productes de la seva desintegració*
- No es va trobar a energies menors de 114 GeV (LEP)
- Es necessitaven acceleradors de partícules de més energia, per tal de convertir grans concentracions d'energia en la massa d'un Higgs: el Large Hadron Collider,
- Amb dos grans detectors, ATLAS i CMS.
- El LHC es va començar a planificar ara fa més de 25 anys (aprovació formal el 1994)

S'estimava que feien falta desenes de milers de milions de xocs de protons per a produir un bosó de Higgs.

S'ha d'analitzar una quantitat descomunal de col·lisions.

Entre 2011 i 2012, s'han generat dades a partir d'uns mil bilions (10^{15}) de col·lisions protó-protó.

Això és el “**Model Estandard**”

(amb molts (massa) paràmetres)

(Nobels: Weinberg, Salam i Glashow; Rubbia i van der Meer; Higgs), ...

Hi caben **les generacions de leptons i quarks**, amb les seves masses (que no sabem calcular!).

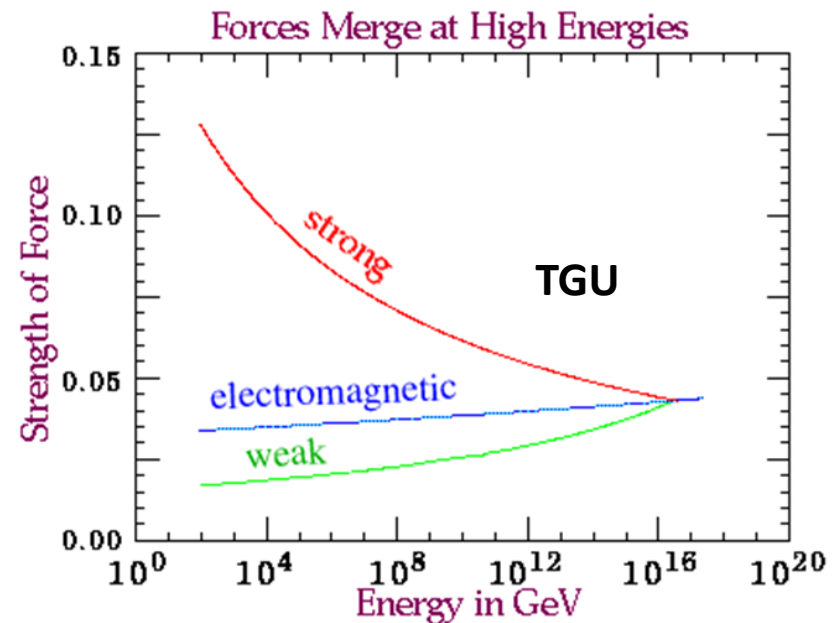
Unifica les forces electromagnètiques i les nuclears dèbils

(són una sola força **electrodèbil**, que es va separar en dues, molt diferents, als primers instants de l'univers....)

Gran Unificació E-W +QCD
(llevat de les **gravitacionals**)

Describeix amb enorme precisió (1%) **totes** les forces entre partícules:

Describeix l'univers des dels seus primers instants (10^{-45} s) després del Big Bang:



Problemes pendents (1)

Sabem que el SM no pot ser complet a energies encara més altes!

Necessitem massa **paràmetres** que no sabem calcular

Convertir el “Model” Estàndard en una “**Teoria**”, **sense més de 20 paràmetres** arbitraris que hem de treure dels experiments

Raó entre massa del protó i de l'electró. **Perquè 1836?**

Perquè les masses dels quarks?

Per què **tres famílies**?

Hi ha **més d'un bosó de Higgs**?

Els **quarks (i els leptons)** són “**elementals**” o tenen estructura?

Acabar de saber si hi ha **desviacions significatives: nova física**?

Propostes

Teories **supersimètriques**.

Milloren la **Gran Unificació**

Desintegració del protó

Unificar GUT amb Gravitació:

Teories de **cordes i supercordes**

Problemes pendents (2)

Interrogants

Aclarir física dels **neutrinos** i la seva **massa** (**oscil·lacions!**)

Propietats del **plasma** de quarks i gluons

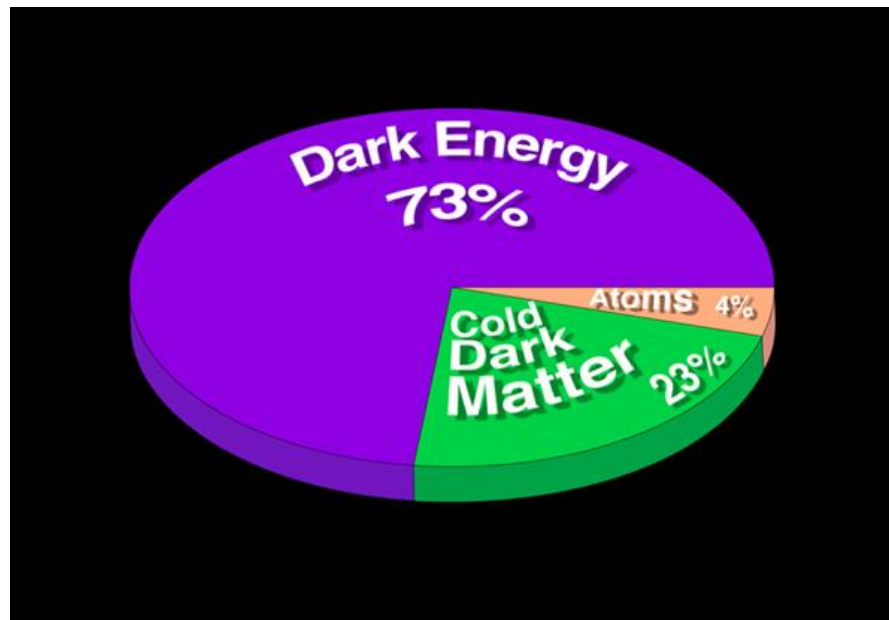
Gravetat quàntica i unificar **Gravitació** i **GUT**

Gravetat de la **antimatèria**

Massa fosca de l'univers:

SUSY, neutrinos, WIMP, Axions,

Expansió accelerada: la “**Energia Fosca**”,
que no s'explica amb la física “clàssica”



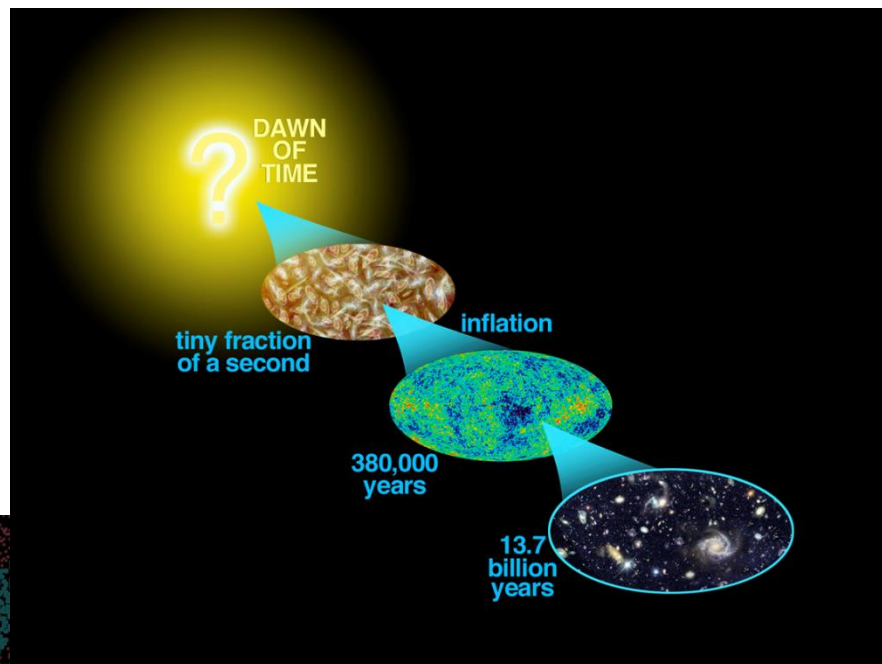
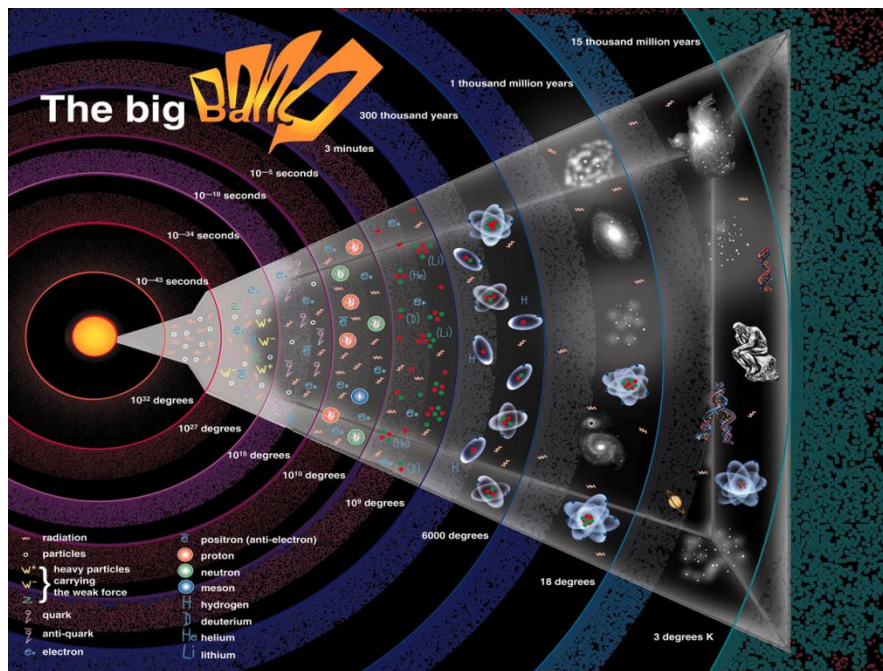
Problemes pendents (3)

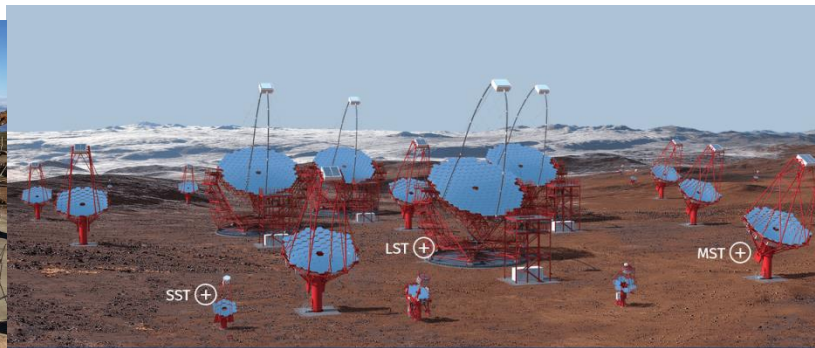
Interrogants

Evolució de l'univers: **inflació**

Violació de CP i Absència (?) d'antimatèria

Hi ha universos paral·lels?



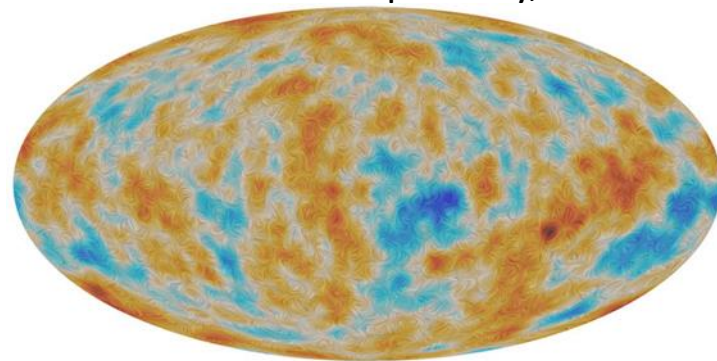


Cerenkov Telescope Array, La Palma

Haurem d'esperar més informació:

- de l'univers i del seu inici on hi va haver densitats d'energia més grans (Planck, Auger-UHECR, CTA, GW)

- d'un futur accelerador
 - (ILC, FCC,...)

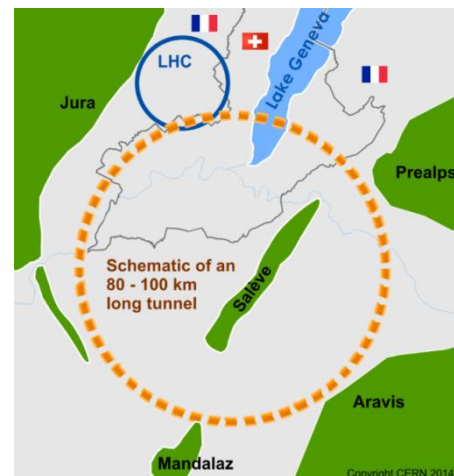


Planck (ESA) detecta variacions de temperatura d'unes milionéssimes de grau i medeix les **polaritzacions**

Physics is not over

Moltes gràcies

Future
Circular
Collider



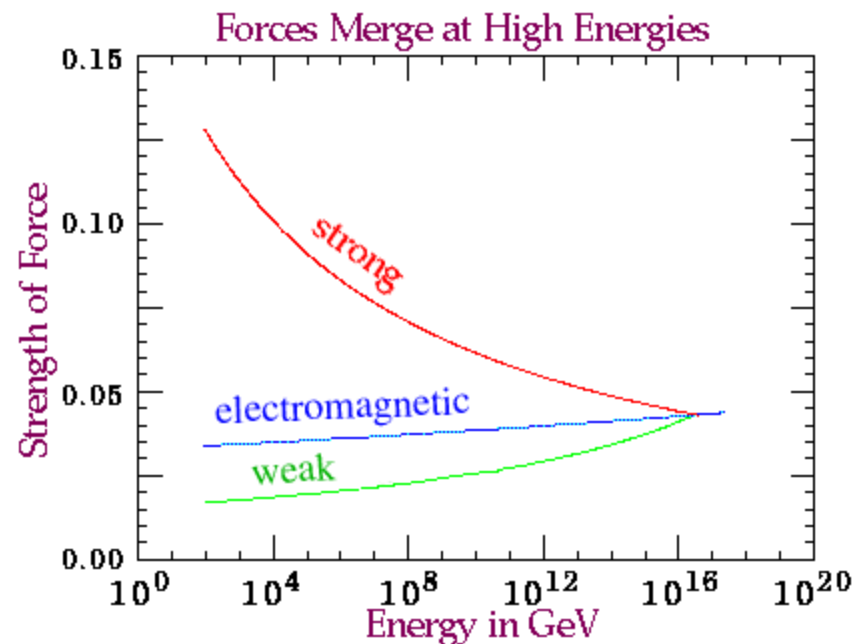
Complements

Forces i Teories de Gran Unificació (GUT)

- Els físics esperen que una **Teoria de Gran Unificació** unificarà les interaccions fortes, dèbils i electromagnètiques. Hi ha hagut diverses propostes de teories unificades, però encara no saben si alguna d'elles descriu la natura.

- Com pot ser això si són tan diferents en intensitat i característiques? Però les dades i les teories actuals suggereixen que aquestes forces tan diverses es confonen en una quan les partícules tenen prou energia.

- Els treballs sobre GUT suggereixen l'existència d'una altre partícula mitjancera que fa que el protó es desintegri. Però amb una vida mitjana de més de 10^{32} anys.

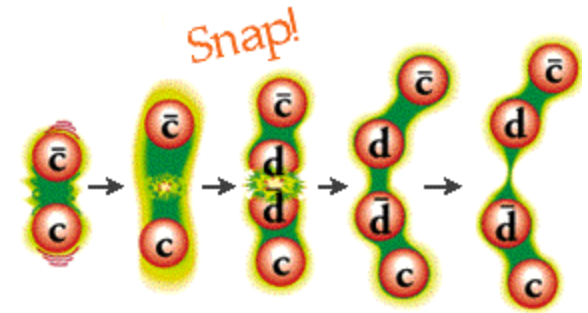


Característica del camp de color

Com el camp de la força de color s'intensifica al augmentar la distància, si un dels quarks d'un hadró s'intenta separar dels seus veïns, el camp de la força de color s'intensifica.

Per continuar separant fa falta afegir més i més energia

Arriba un punt en que és energèticament favorable que el camp creï una nova parella quark-antiquark.



Així, els quarks no poden existir individualment

Nota:

La càrrega de “color” no té res a veure amb els colors ordinaris; és una manera convenient d'anomenar el sistema matemàtic que permet explicar les observacions.

Matèria i antimatèria

Per cada tipus de partícula de matèria existeix una partícula d'**antimatèria**, o **antipartícula**

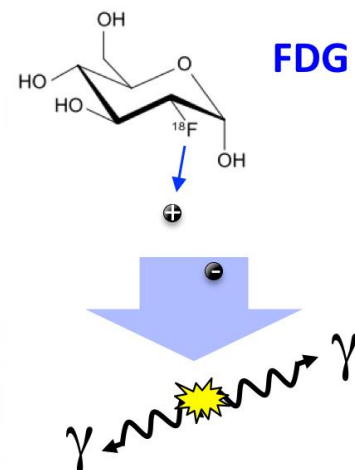
Les antipartícules semblen i es comporten igual que les seves corresponents partícules de matèria, excepte pel fet de tenir càrregues oposades.

Per exemple, un protó es elèctricament positiu mentre que un antiprotó es negatiu.

I un antielectró és un **positró**

- Quan una partícula de matèria i una d'antimatèria es troben, s'aniquilen donant energia! (I al revés: l'energia es pot convertir en parells partícula-antipartícula)
- La gravetat afecta igual la matèria i la antimatèria perquè la gravetat no depèn de la càrrega i la partícula de matèria té la mateixa massa que la seva antipartícula.

Positron Emission Tomography



Com és l'univers

- Tots els pobles han tingut la seva “**cosmologia**”.
- Des d'en Kant sabem que les estrelles s'agrupen en **galàxies**. Avui sabem que hi ha cent mil milions de galàxies, cada una amb uns cent mil milions d'estrelles.
- El **Sol** és una estrella “normal” en una galàxia “normal”, la Via Lactea.
- Fins a principis del segle XX es pensava que l'univers era **estàtic**. Per això Einstein va introduir la constant cosmològica
- Fins a les observacions de Edwin **Hubble** (1929):
La observació de Hubble de que les galàxies s'allunyen unes de les altres ens indica que l'univers està en expansió, que **l'univers no és estàtic**.

univers en expansió



El nostre Univers

- Atesa la velocitat finita de la llum, **mirar a l'espai és mirar enrere en el temps**: la llum ens porta al passat, ens informa de com eren les estrelles i les galàxies quan va ser emesa.

Com més hagi tardat la llum en arribar-nos, més temps haurà viatjat i farà més temps que va ser emesa.

- Després de molts anys, hem entrat en una etapa de **cosmologia de precisió**, en la que les observacions de supernovas, galàxies i cúmuls, de fons de microondes i del coneixement de l'abundància dels elements lleugers s'estudien amb gran detall.

- Els fets experimentals que ens porten a creure en el **Big Bang** són:
 - **L'expansió de l'univers** (predicció de RG sense CC)
 - **L'abundància dels elements lleugers** (H, He, Li)
 - **El fons còsmic de microondes** 2.7 K
- Les grans masses neutres de l'univers són un excel·lent banc de proves de les teories de la gravitació
 - Llei de la Gravitació de Newton
 - Relativitat General d'Einstein**

El Big Bang

- Com que s'expandeix, fa mils de milions d'anys era molt menor, i més dens i calent que ara. El moment inicial és el Big Bang.
- No és una explosió en un punt. **El Big Bang és l'inici de l'espai i el temps**
- El Big Bang és el **model acceptat de l'evolució de l'univers**.

Estableix que durant els darrers **13.7 mil milions d'anys**, l'univers s'ha expandit a partir d'un estat inicial extremadament **dens i calent**, fins al que ara veiem.

El Model Estàndar ens descriu bé la seva evolució **des d'uns 10^{-45} segons després**

Per entendre els **instants anteriors**, necessitem una **gravetat quàntica** inexistent

Aquesta és la Via Lactea, La Galaxia

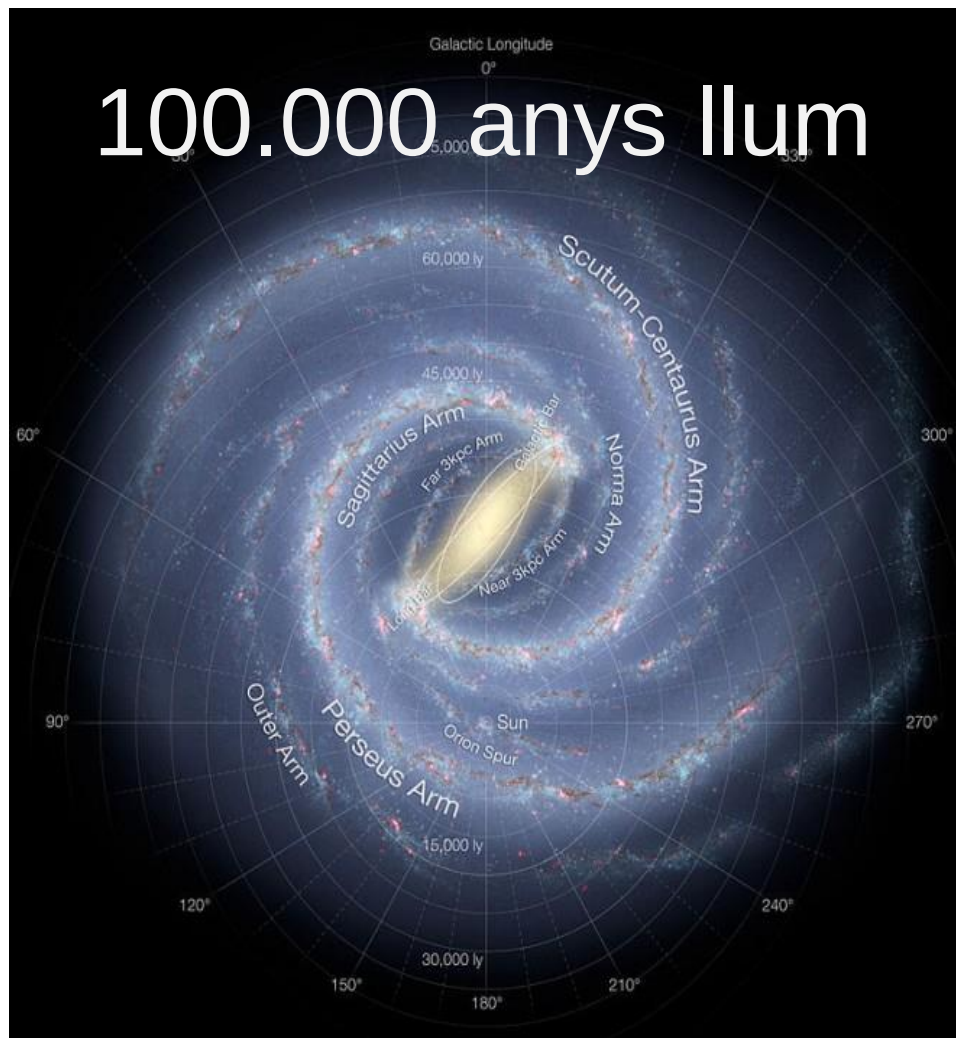
Distància Terra Sol: 150 milions de km=
8 minuts llum

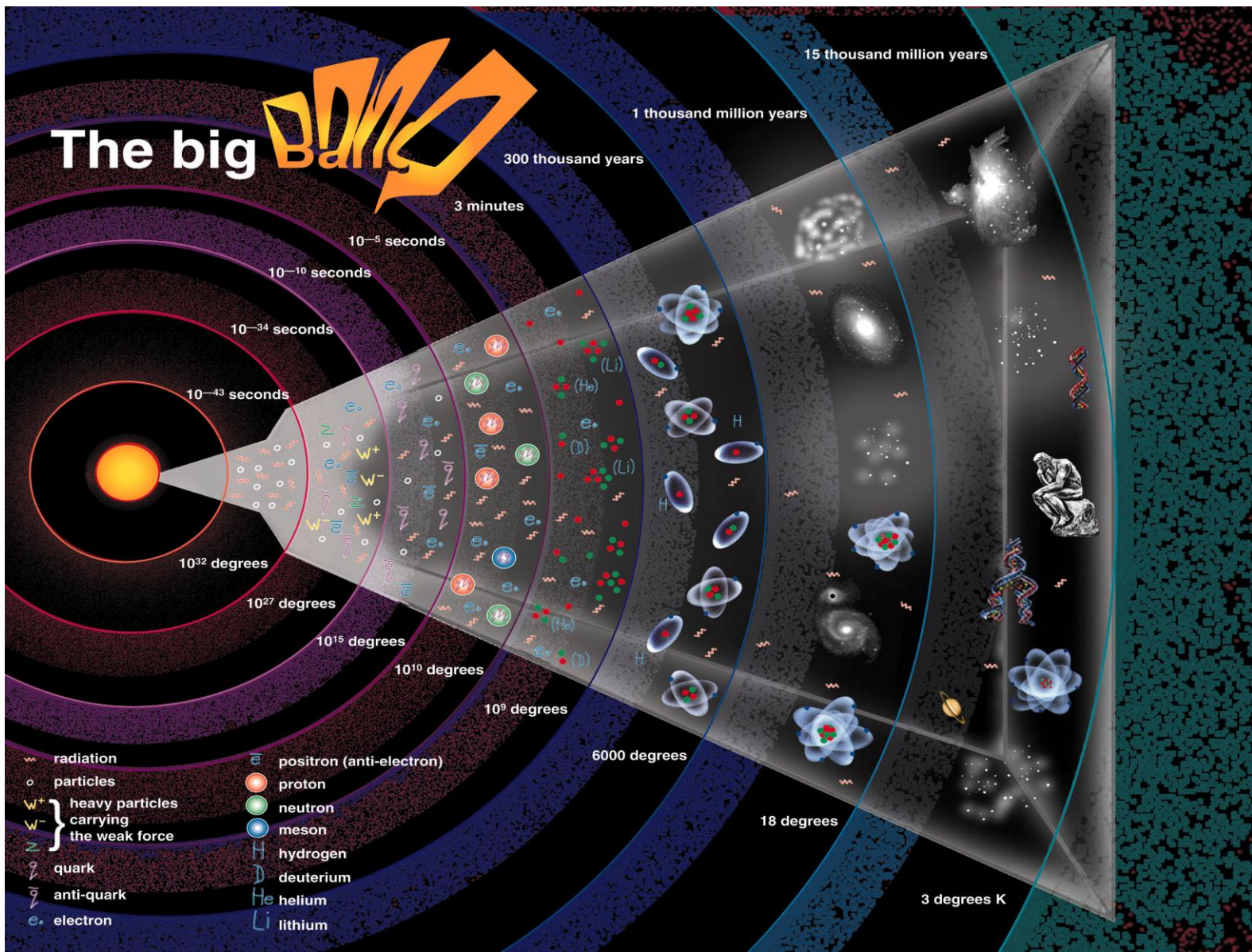
Estrelles més properes: pocs anys llum

Gruix Galaxia 30.000 a-l

Radi Galàxia 100.000 a-l

1 any-llum = 9500 mil milions de km





Què no explica el Big Bang original?

- Perquè l'univers **és tan uniforme** a escales molt grans. Més enllà de la uniformitat demanada pel Principi Cosmològic com a principi bàsic, la gran uniformitat demana **una extensió del Big Bang**.
- **L'origen de les estructures**, de les estrelles, de les galàxies i dels cúmuls de galàxies.
- Les **fluctuacions del fons de microondes** còsmic: la seva temperatura varia molt poc en les distintes regions de l'espai. Quin és l'origen de les fluctuacions i com es relaciona amb les estrelles i galàxies?

El Big Bang inflacionari

- **La inflació** explica la uniformitat i l'origen de les estructures.
- La inflació va ser un **curt i ràpit període** de creixement de l'univers produït era molt jove.

Proves clàssiques de la RG

Avançament del periheli de mercuri

Desviació dels raigs de llum en passar per una gran massa

Desplaçament cap al roig de les línies espectrals

Predicció de les ones gravitacionals

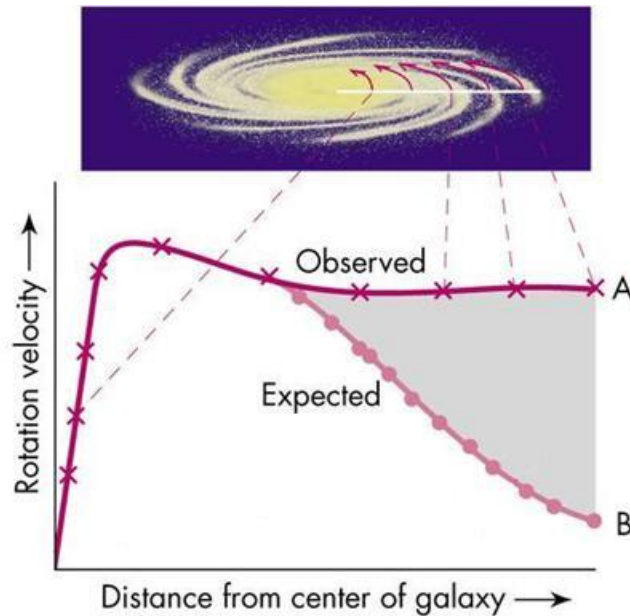
Evidència indirecta: el 1993 **Hulse i Taylor**, van descobrir un nou tipus de **púlsar, una classe d'objectes de ràpida rotació d'un radi d'uns 10 km amb el** radiotelescopi de 300-m d'Arecibo, Puerto Rico.

La precisa emissió del púlsar presentava una variació que es va demostrar deguda a que tenia una altre sistema massiu a prop i que la variació era deguda a l'emissió de les ones gravitacionals predites per Einstein.

Però no s'havien detectat **directament** fins al 14 de setembre de 2015 (**GW150914**) al **LIGO**

De què està fet l'univers?

- El tipus de matèria feta d'àtoms explica la **massa visible** de les galàxies i dels cúmuls de galàxies. La “veiem” a causa de la llum que emet i de que la seva massa interacciona per la gravetat.
- Però aquesta matèria visible no és suficient per lligar gravitacionalment les estrelles a les seves galàxies i explicar els seus moviments interns.
- L'evidència d'aquesta gravetat “extra” inclou:
 - Una **velocitat de rotació de les galàxies** inesperada
 - Grans núvols de gas confinats en el espai que la gravetat de la matèria ordinària no poden explicar
 - Per a que la densitat de l'univers faci que aquest sigui pla
- Hi ha d'haver una “**massa fosca**” que no es veu falta perquè només interacciona per la gravetat.
 - un tipus de **matèria molt diferent, no feta d'àtoms**; se n'hi diu “matèria fosca” perquè no és directament visible. Però es noten els seus efectes gravitacionals



La velocitat de rotació de les galàxies

Velocitat dels objectes de les galàxies en funció de la distància al centre.

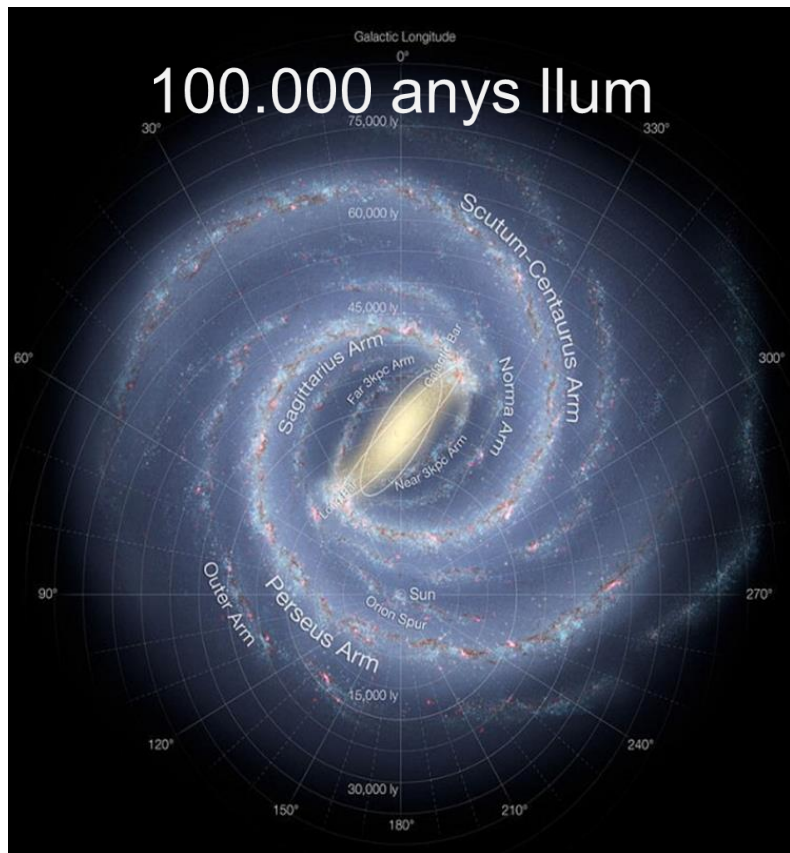
La línia morada és la observada i la rosa és la que s'esperaria per la quantitat de massa lluminosa segons la llei de Kepler

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$$

La discrepància es consistent amb la presència d'halos de matèria fosca
(From Stadnik)

La Via Lactea

Com la imaginavem



Com la imaginem



© Addison-Wesley Longman

Què és la matèria fosca?

- És una de les **grans qüestions** que contempla la **cosmologia** i la **física de partícules**
- La física de partícules prediu l'existència de **candidats a la matèria fosca**
- Hi podrien contribuir els neutrinos, però, a més, hi ha d'haver altres formes més exòtiques de matèria,
 - Axions** (predits per certs models)
 - Partícules supersimètriques** (necessàries per completar el ME)
- Aquesta **matèria fosca** és **molt superior a la matèria visible i coneguda**

Què és la massa que falta?

Els càlculs de l'univers en expansió també es podien extrapolar cap al futur.

L'expansió

s'accelerarà,

es frenarà

s'invertirà col·lapsant-se?

De les dades experimentals de supernovas s'ha deduït que l'univers està en **expansió accelerada**

Això indica que a l'univers hi ha molta més massa que la fosca:

Això és l'“**energia fosca**”

De la que encara en sabem menys

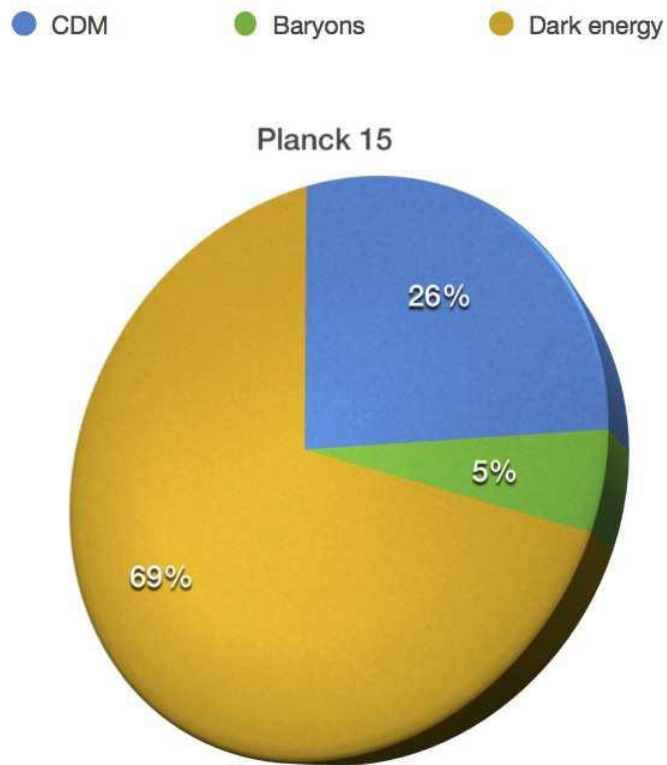
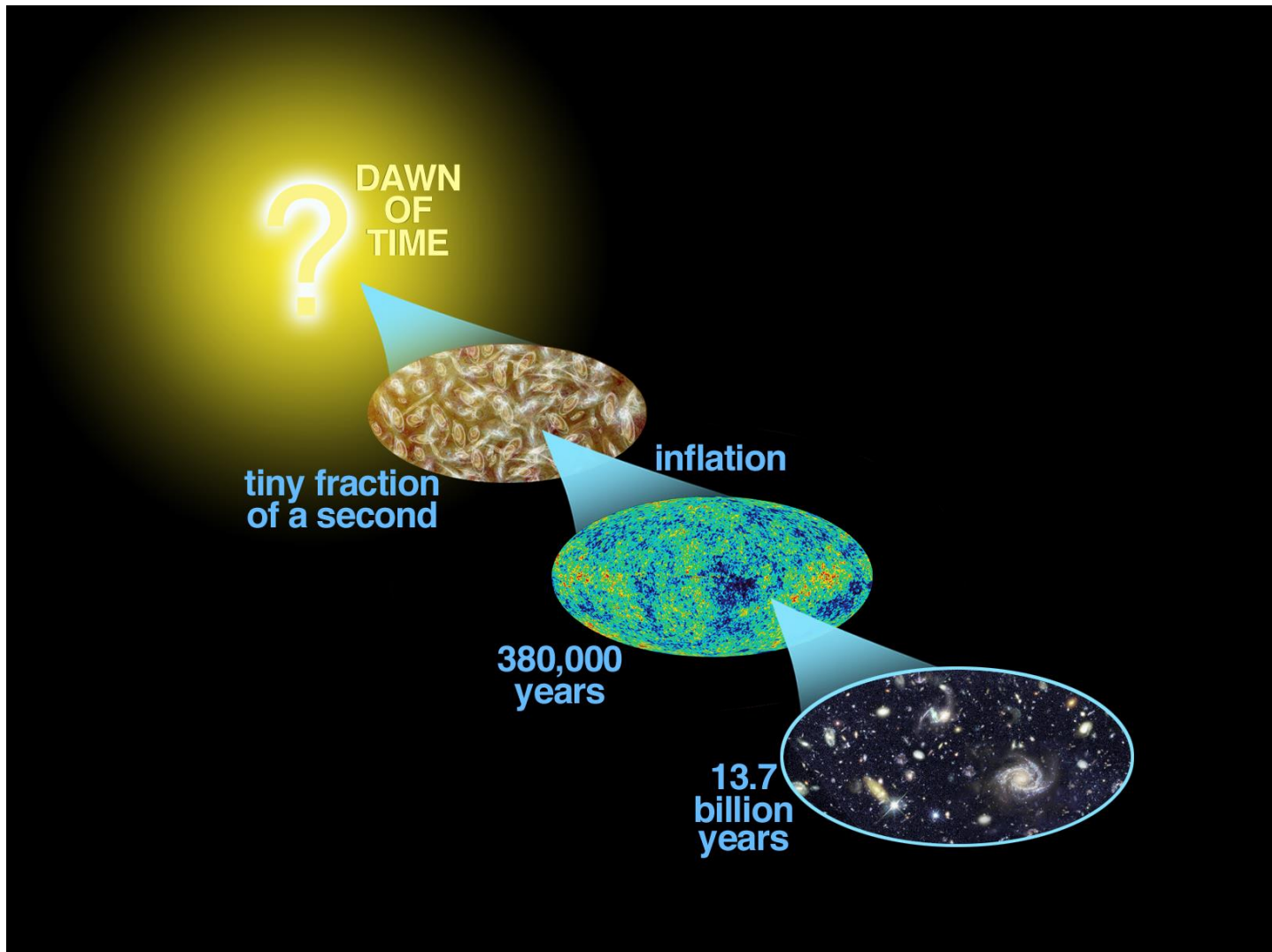


Fig. 4: Distribution of contributions to the total energy density at present from Planck 15 best fit parameter.

Kunze <http://xxx.unizar.es/abs/1604.07817>

L'expansió accelerada

- Aquesta expansió accelerada indica que la gravetat (que frena l'expansió) està compensada per una misteriosa força de repulsió, la “Energia Fosca”, que no s'explica amb la física “clàssica”
- La pressió cap a fora d'aquesta energia fosca sembla empènyer l'univers a expandir-se més i més de pressa, i el pot portar a expandir-se per sempre.
- L'energia fosca té un efecte exactament oposat a la gravetat: és repulsiva.



Problemes i preguntes pendents

Com va ser la **inflació**?

Què és la **matèria fosca**? Partícules supersimètriques?

Què és l'**energia fosca**?

Hi ha una teoria que unifiqui la gravetat i la mecànica quàntica?

Teoria de tot, teoria de cordes,...

Hi ha **lleis de la natura** encara no descobertes?

Perquè no queda **antimatèria** a l'univers?

Hi ha **universos paral·lels**?

....

Altres preguntes

- Tota la matèria visible de l'univers està feta de la **primera generació** – quarks up i down, i electrons. Les partícules de la segona i tercera generacions són inestables i ràpidament es desintegren en partícules de la primera generació.
- **Perquè existeixen les altres?**
- **Perquè tres?**
- Hi ha més d'un bosó de Higgs?
- O potser la resposta és que els quarks i els leptons no són fonamentals, sinó que estan fets d'altres partícules més elementals.



Els futurs instruments

- Per seguir progressant i posar a prova les noves idees, necessitem acceleradors encara més energètics
- Ara està planificat una nova fase de l'LHC
- En el futur es pensa en un “**linear collider**” (de 30 km) o un “**circular collider**” (de 100 km) al món: EUA, Europa, Japó,... O la Xina
- I analitzar els resultats del Big Bang, un esdeveniment realment energètic, amb grans telescopis a terra o en satèl·lits... **Telescopis de 50 m**,...

Caldrà estar atents...

Moltes gràcies

Com funciona la càrrega de color?

Hi ha tres càrregues de color i les tres corresponents d'anticolor (el color complementari).

Cada quark té una de les tres càrregues de color i cada antiquark una de les d'anticolor.

Igual que una barreja de llum vermella, verda i blava dóna llum blanca, en un barió una combinació de càrregues de color “vermella”, “verda” i “blava” té color neutre, i en un antibarió “antivermell”, “antiverd” i “antiblau” també dóna un color neutre. Els mesons són de color neutre (o incolors) perquè tenen combinacions com “vermell” i “antivermell”.

- Com l'emissió i l'absorció de gluons sempre canvia el color i, a més, el color és una quantitat que es conserva, els gluons es poden imaginar com que porten una càrrega de un color i un anticolor. Com hi ha nou possibles combinacions color-anticolor podem esperar que hi hagi nou diferents càrregues de gluó, però les matemàtiques funcionen de manera que només hi ha vuit combinacions.

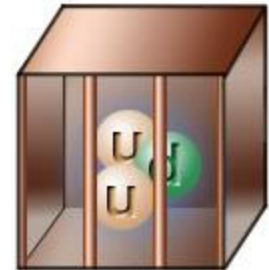
El confinament dels quarks

- Les partícules amb càrrega de color **no es troben isolades**. Per això els, quarks estan **confinats** en grups (hadrons). Aquests compostos són incolors.

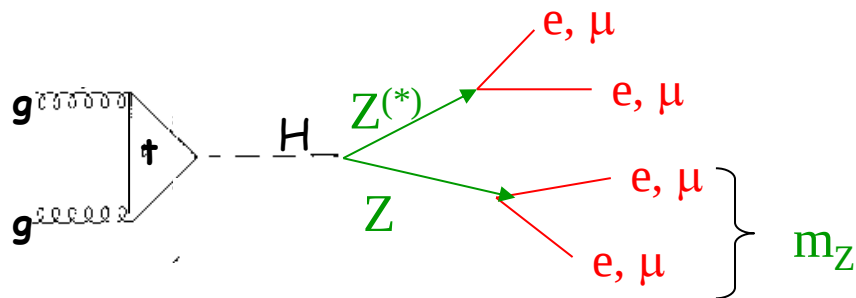


- Així entenem que només els barions (tres colors diferents) i els mesons (color i anticolor) són incolors. Partícules com **ud** o **uddd** que no poden ser combinacions incolores no s'observen.

- El desenvolupament del Model Estandard de les interaccions fortes reflecteix l'evidència que els quarks només es combinen en barions (objectes de tres quarks) i mesons (objectes de quark-antiquark), però no, per exemple, en objectes de quatre quarks.

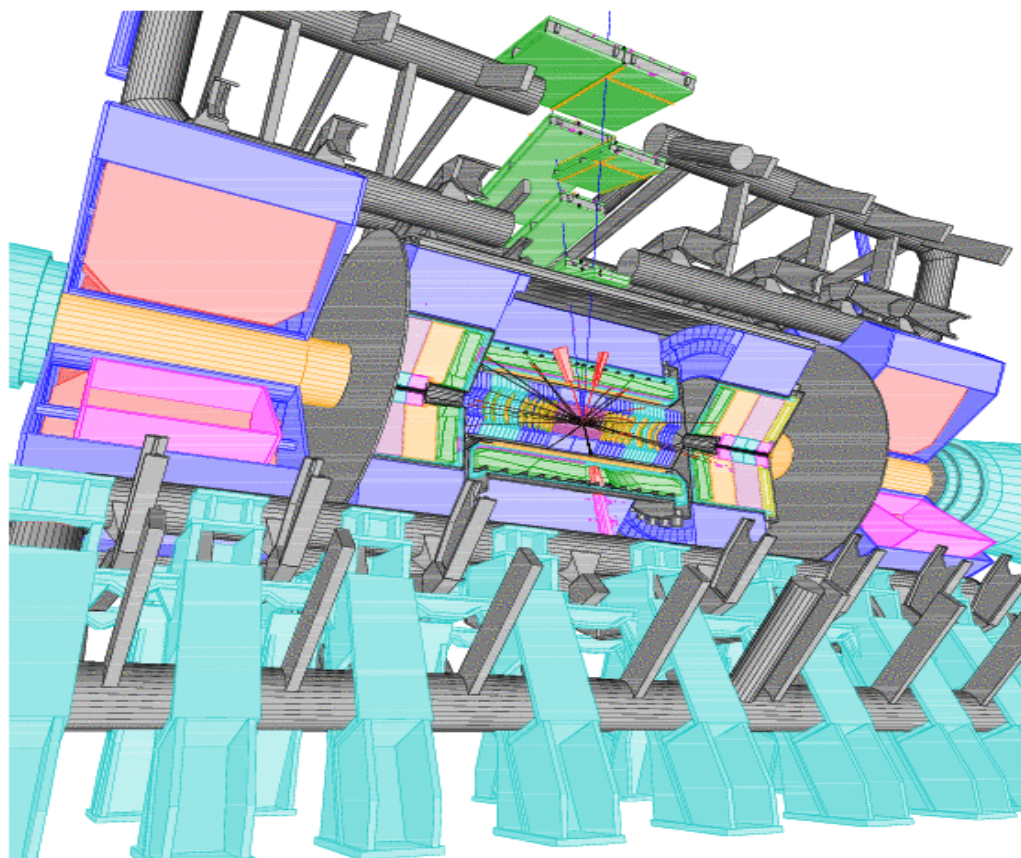


$$H \rightarrow ZZ \rightarrow (e^+e^-)(\mu^+\mu^-)$$

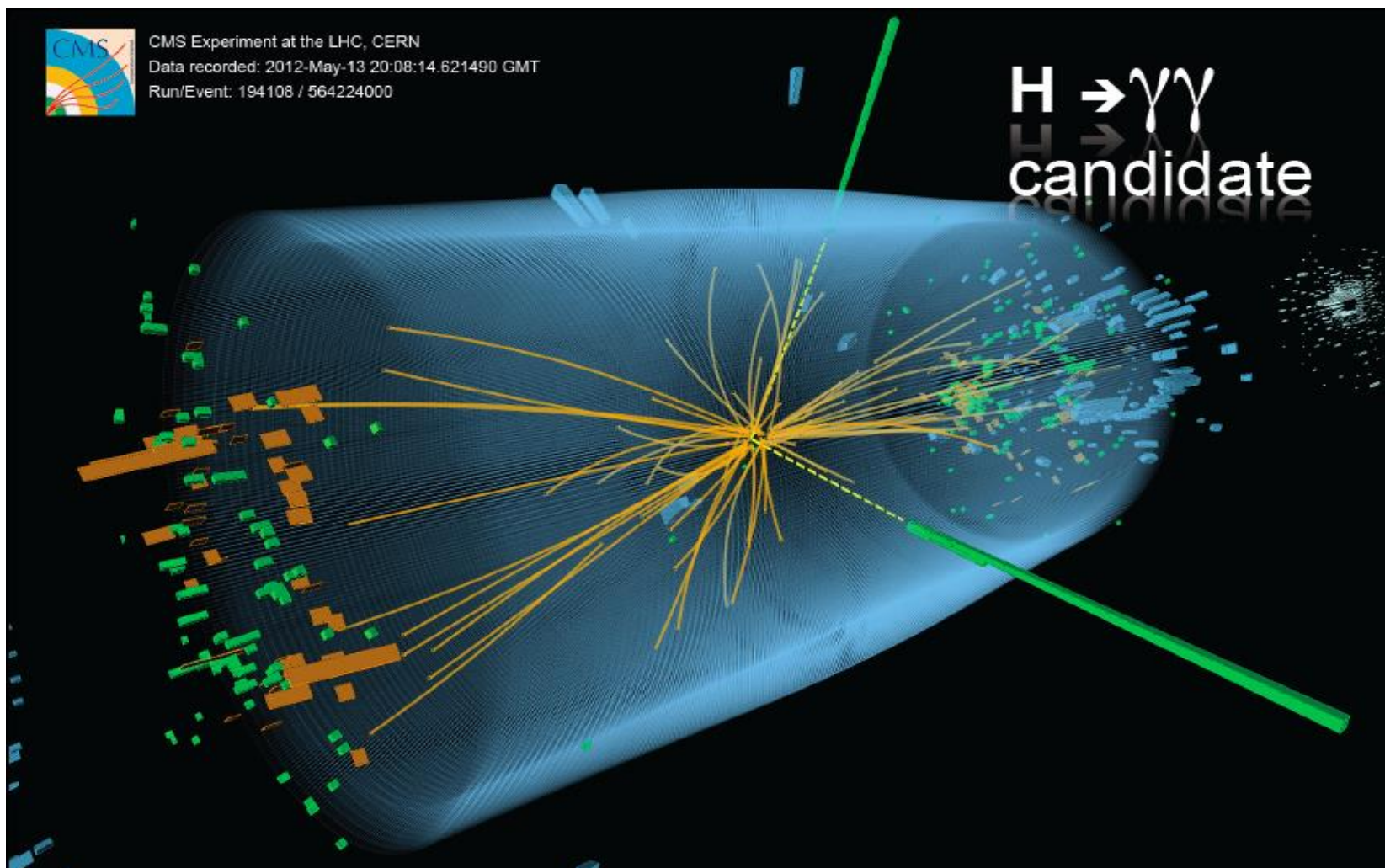


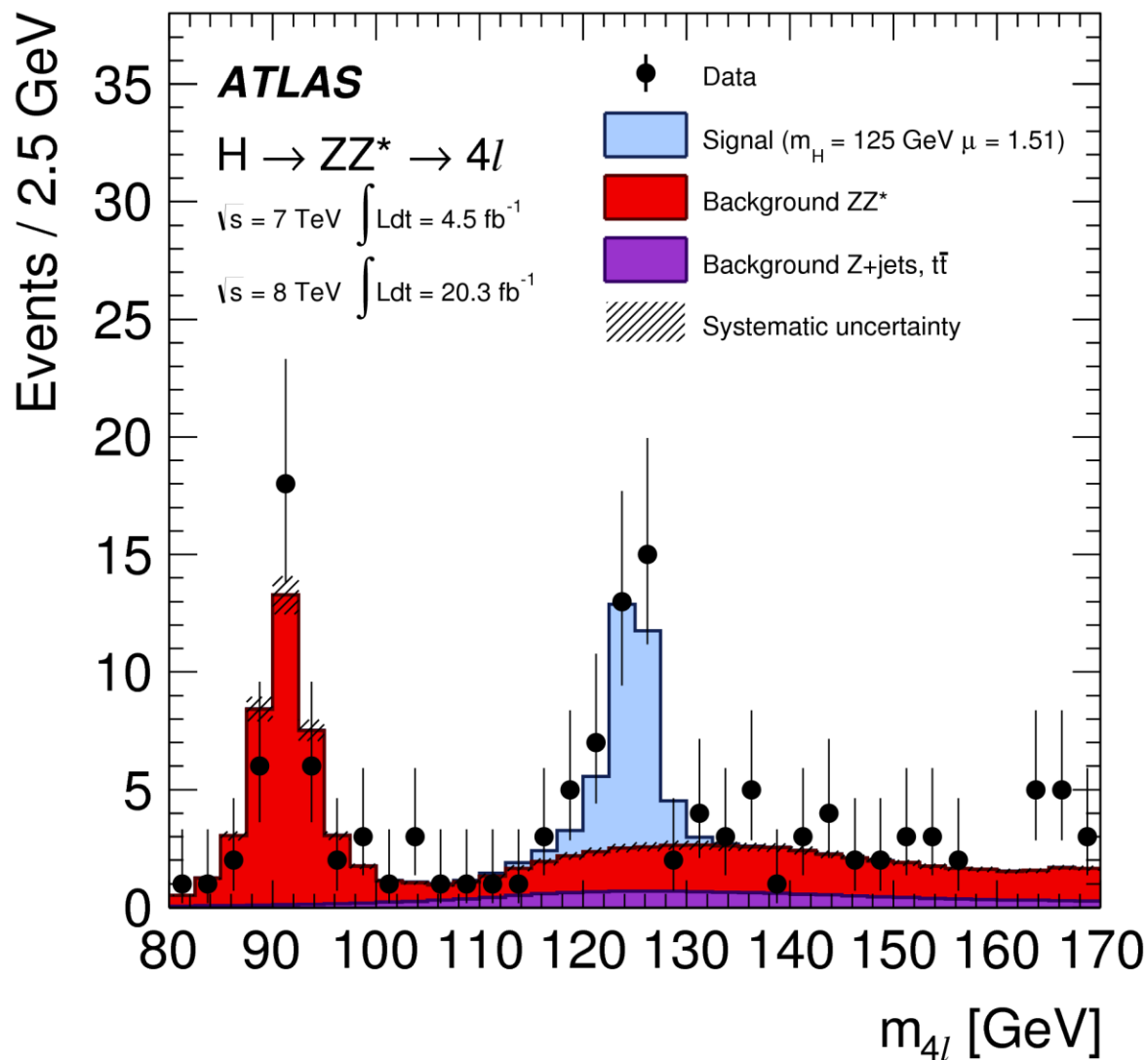
**UN EXEMPLE DE
DESINTEGRACIÓ
MOLT CLARA DEL
BOSÓ DE HIGGS:**

$$H \rightarrow ee \mu\mu \text{ en ATLAS}$$



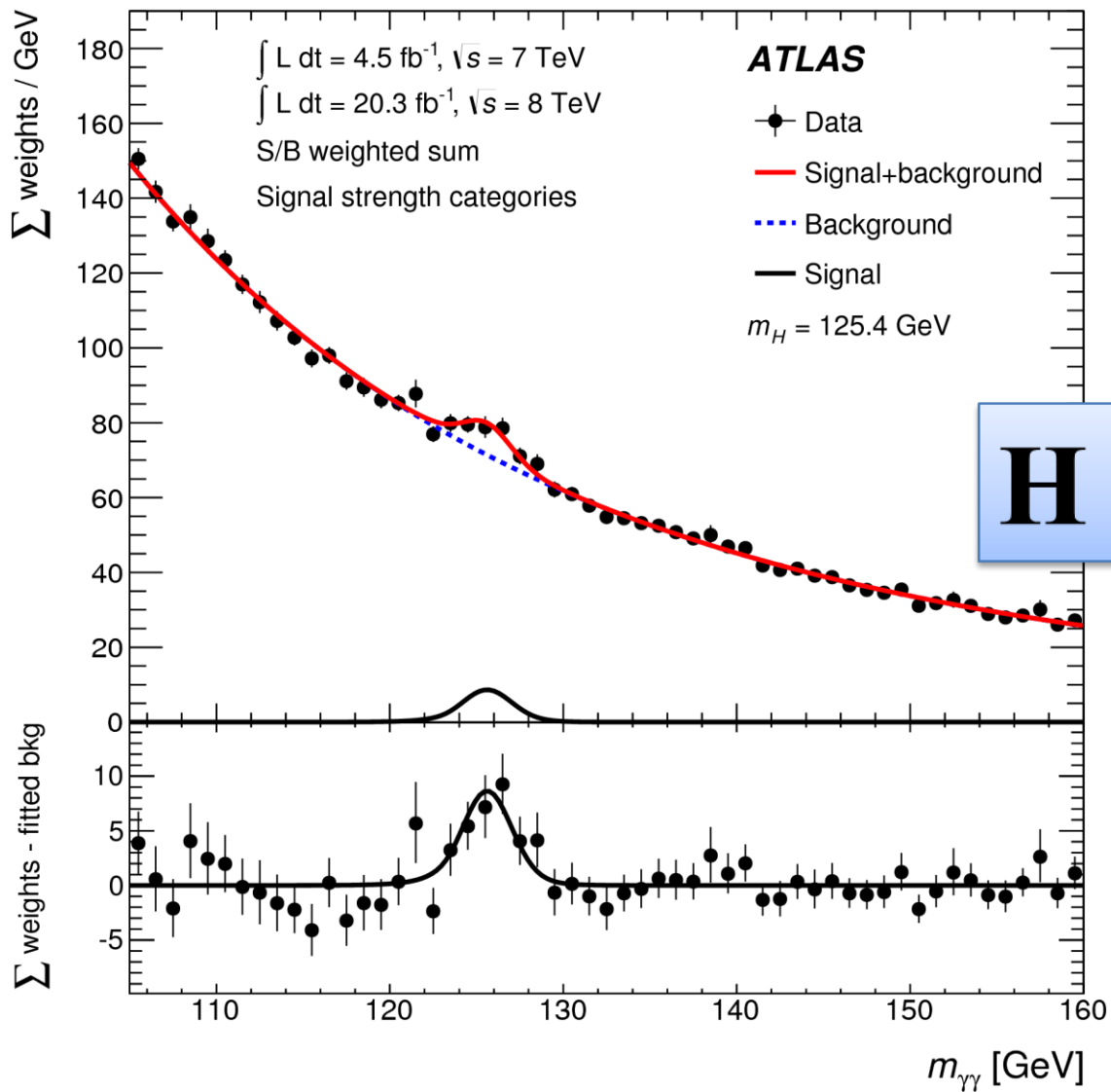
Un esdeveniment de desintegració d'un candidat a bosó de Higgs en dos fotons. Les línies verdes representen l'energia de les partícules detectades al calorímetre electromagnètic: dos fotons amb una massa de 125 GeV.





La producció d'un bosó de Higgs i la seva desintegració en 4 leptons passa una vegada per cada 10 bilions (10^{13}) de col·lisions

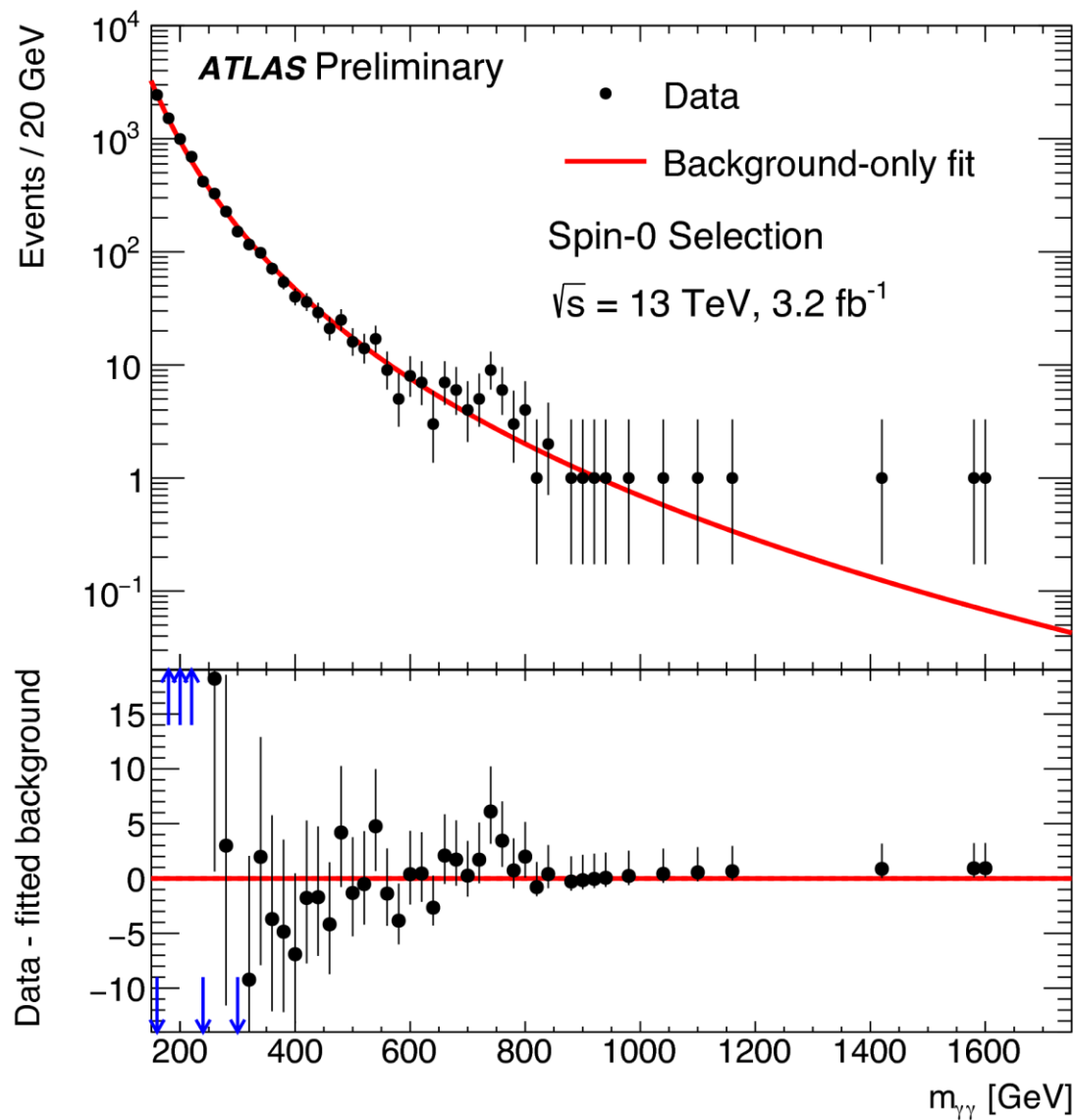
Analitzen col·lisions on es reconstrueixen 2 bosons Z, que es desintegren en parelles de electrons o de muons.



És realment el Higgs?

- Si no es confirmessin tots els detalls (que tardarà temps, probablement ens obligaria a trobar altres solucions; seria encara més interessant!...)
- Si es confirma, és molt probable que es trobin altres bosons de característiques similars
- També s'espera trobar altres partícules, com ara aquelles de les que parlaré més endavant
- (Partícules supersimètriques, que ens explicarien la matèria fosca de l'univers).
- De moment s'ha anunciat un candidat de 750 GeV que decau en dos fotons... Llegeixin els diaris a principis d'estiu

?  $\gamma\gamma$



Des de l'espai

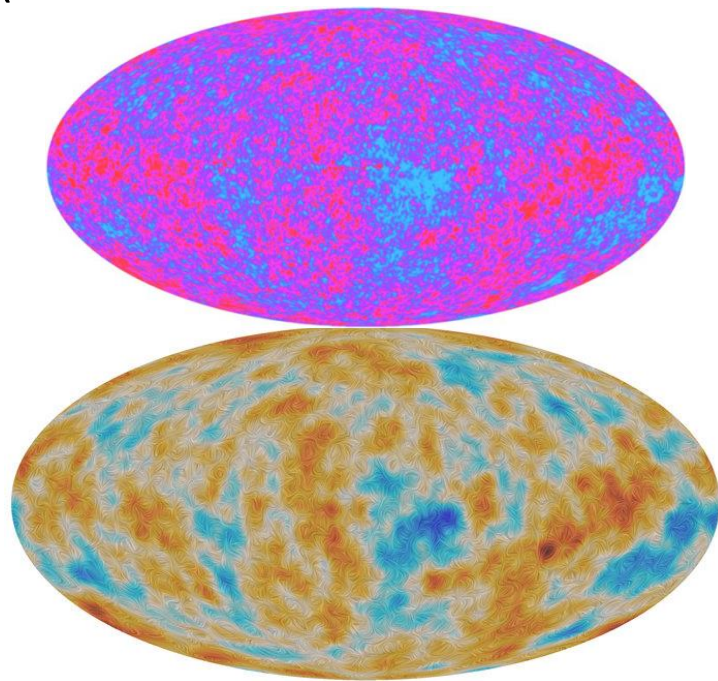
Les microondes: Les mesures de la **radiació de fons de microondes** (CMB) són unes de les observacions fonamentals (ja han tingut 2 premis Nobel), ja que ens donen una imatge de l'univers tal com era **380 000 anys després del Big Bang**

El Fons Còsmic de Microondes és un romanent de radiació que omple l'univers i que es pot detectar arreu que es miri. (És el 10% de la “neu” d'un televisor desintonitzat).

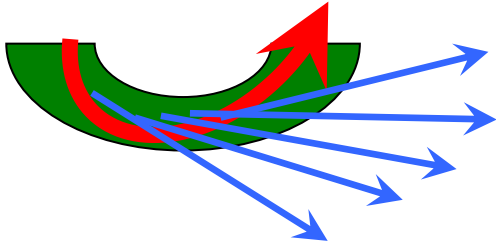
1992 Cosmic Background Explorer (**COBE**).

2003, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (**WMAP**)

14 May 2009, **Planck** (ESA) detecta variacions de temperatura d'unes milionéssimes de grau i medeix les **polaritzacions**



Fuentes de 1ª y 2ª generación: imanes dipolares



Fuentes de 3ª generación: wigglers y onduladores

