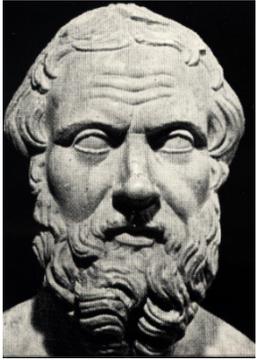


# Introduction à la Physique des particules

- Particules “élémentaires” : De Démocrite à la fin du 19<sup>ième</sup> siècle.  
La lente évolution d’une grande idée...
- Physique des particules : l’épopée d’une invisible vérité
- Les particules de Matière
- Les (particules de) Forces
- Questions ouvertes...

V<sup>e</sup> siècle av J-C

Genèse du  
concept



**Grec :**

Leucippe et son élève Démocrite

Notion d'atome "indivisible"

**Atomisme** : Courant philosophique  
et Théorie physique proposant une  
conception d'un univers discontinu,  
composé de matière et de vide

V<sup>e</sup> siècle av J-C

IV<sup>e</sup> siècle av J-C

Genèse du concept

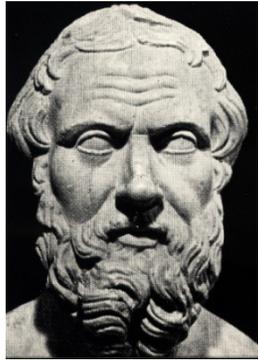
Oui mais...

Un autre grec...

Aristote :

Matière constituée de quatre éléments

☐ Atomisme abandonnée

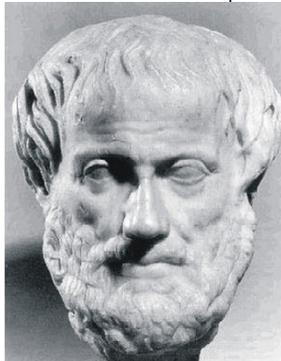


Grec :

Leucippe et son élève Démocrite

Notion d'atome "indivisible"

**Atomisme** : Courant philosophique et Théorie physique proposant une conception d'un univers discontinu, composé de matière et de vide



Nombre de "particules" élémentaires "connues"

V<sup>e</sup> siècle av J-C

IV<sup>e</sup> siècle av J-C

XVIII<sup>e</sup> siècle

Genèse du concept

Oui mais...

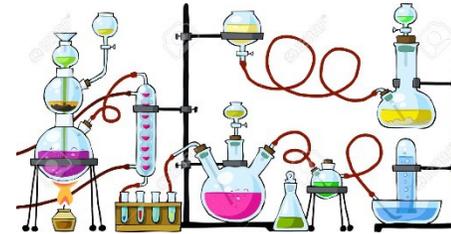
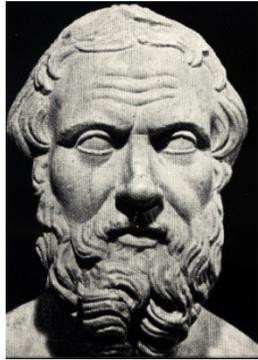
De l'alchimie à la Chimie

Un autre grec...

Aristote :

Matière constituée de quatre éléments

☐ Atomisme abandonnée

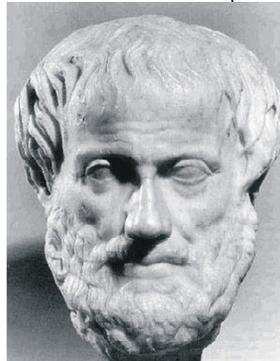


Grec :

Leucippe et son élève Démocrite

Notion d'atome "indivisible"

Atomisme : Courant philosophique et Théorie physique proposant une conception d'un univers discontinu, composé de matière et de vide



Nombre de "particules" élémentaires "connues"

V<sup>e</sup> siècle av J-C

IV<sup>e</sup> siècle av J-C

XVIII<sup>e</sup> siècle

1803

Genèse du concept

Oui mais...

De l'alchimie à la Chimie

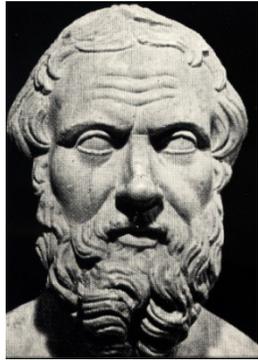
Atome, Particule élémentaire:  
Le retour !

Un autre grec...

Aristote :

Matière constituée de quatre éléments

☐ Atomisme abandonnée

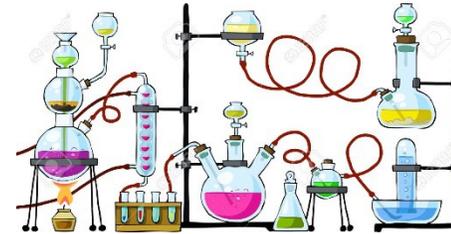
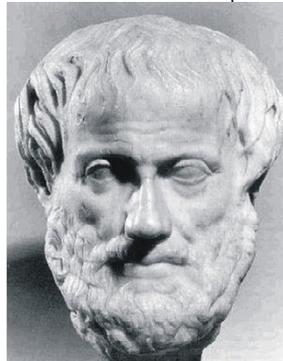


Grec :

Leucippe et son élève Démocrite

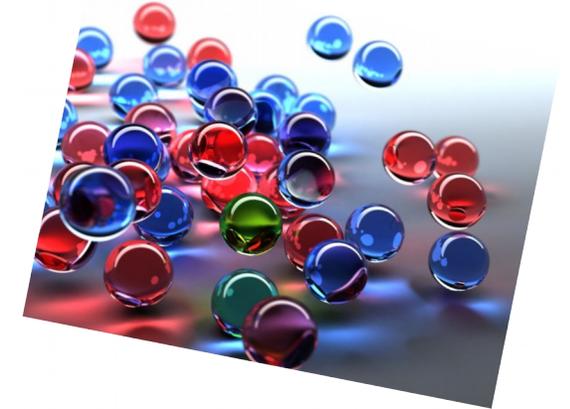
Notion d'atome "indivisible"

**Atomisme** : Courant philosophique et Théorie physique proposant une conception d'un univers discontinu, composé de matière et de vide



Dalton :

Chaque corps pur doit être formé d'atomes identiques : sphère simple et indivisible



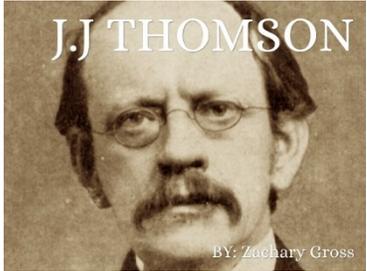
Nombre de "particules" élémentaires "connues"

4

> 40

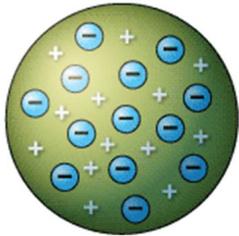
1897

J.J. Thomson  
Découverte de l'e<sup>-</sup>



### J.j. Thomson Atomic Model

- Plum Pudding Model or Blueberry Muffin Model
- Proposed in 1904
- Negatively charged electrons (raisins or blueberries) are surrounded by a positively charged “pudding” (or muffin)



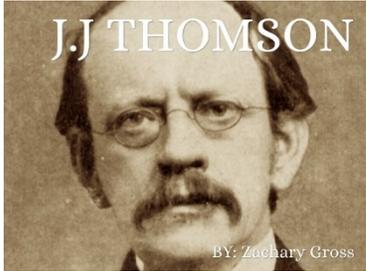
- Atome composé d'électrons chargés – dans un “pudding” de charge +
- L'atome n'est plus une particule élémentaire !

Nombre de “particules”  
élémentaires “connues”

2? (électron + pudding positif)

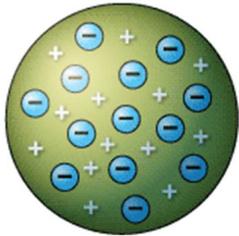
1897

J.J. Thomson  
Découverte de l'e<sup>-</sup>

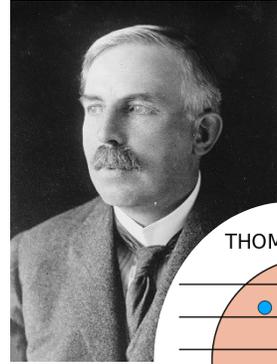


### J.j. Thomson Atomic Model

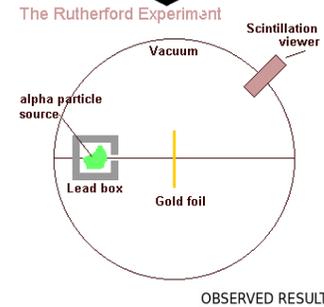
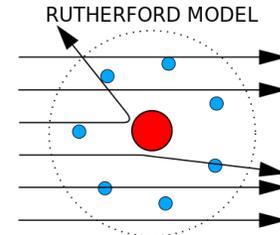
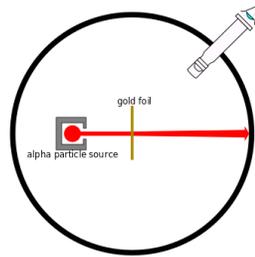
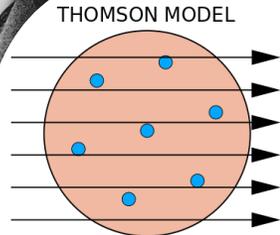
- Plum Pudding Model or Blueberry Muffin Model
- Proposed in 1904
- Negatively charged electrons (raisins or blueberries) are surrounded by a positively charged "pudding" (or muffin)



1909



Expérience de Rutherford



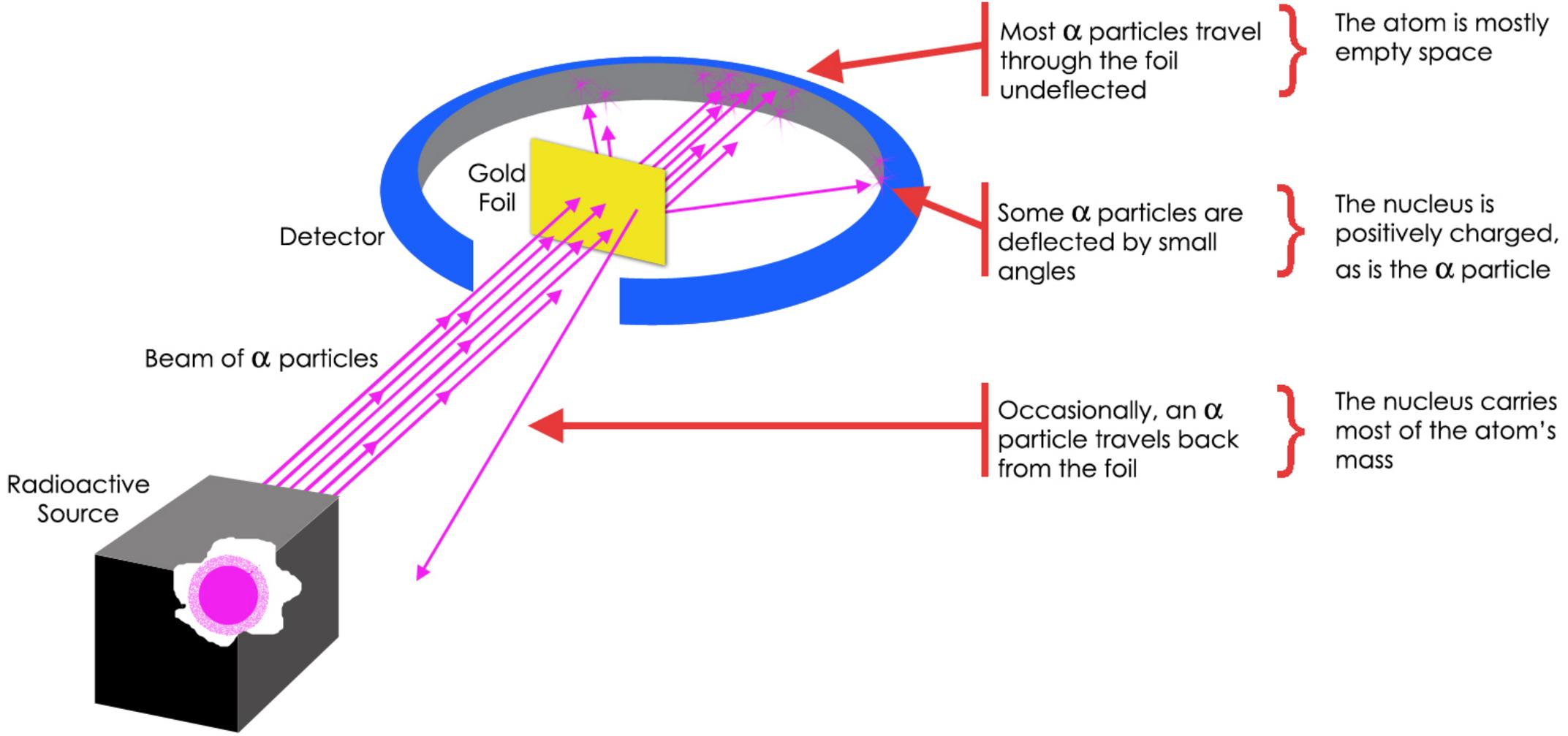
- Atome composé d'électrons chargés - dans un pudding de charge +
- L'atome n'est plus une particule élémentaire !

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2? (électron + pudding positif)

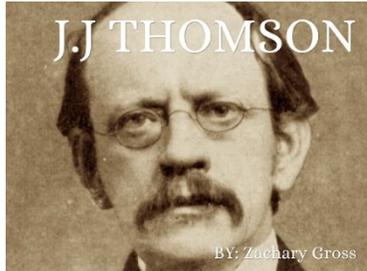
2 (électron + noyau)

# Rutherford's Gold Foil Experiment



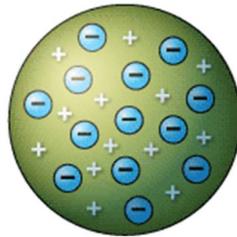
1897

J.J. Thomson  
Découverte de l'e<sup>-</sup>



### J.j. Thomson Atomic Model

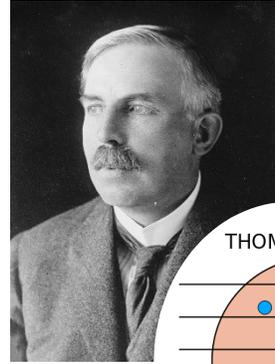
- Plum Pudding Model or Blueberry Muffin Model
- Proposed in 1904
- Negatively charged electrons (raisins or blueberries) are surrounded by a positively charged "pudding" (or muffin)



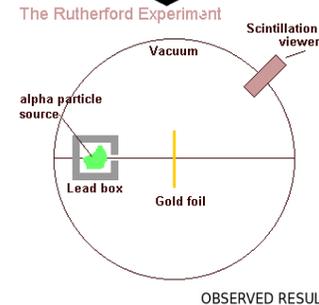
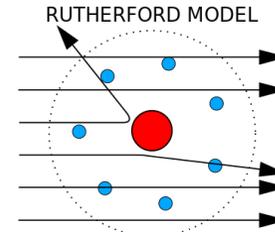
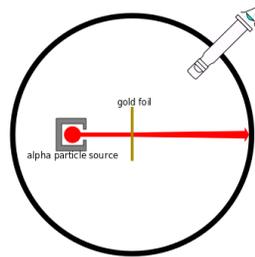
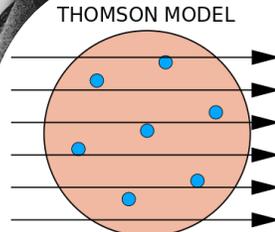
- ☐ Atome composé d'électrons chargés - dans un pudding de charge +
- ☐ L'atome n'est plus une particule élémentaire !

2? (électron + pudding positif)

1909



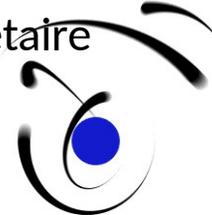
Expérience de Rutherford



OBSERVED RESULT

➔ Atome = électron + noyau  
+ **99,99% de vide**

➔ Modèle Planétaire

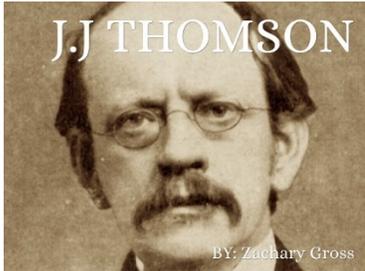


2 (électron + noyau)

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

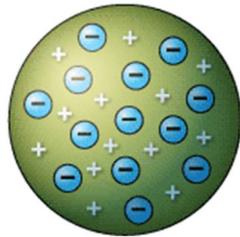
1897

J.J. Thomson  
Découverte de l'e<sup>-</sup>



### J.j. Thomson Atomic Model

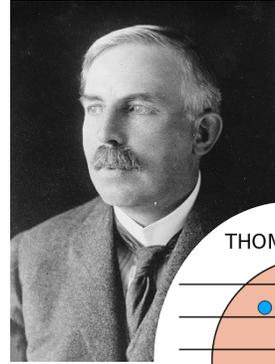
- Plum Pudding Model or Blueberry Muffin Model
- Proposed in 1904
- Negatively charged electrons (raisins or blueberries) are surrounded by a positively charged "pudding" (or muffin)



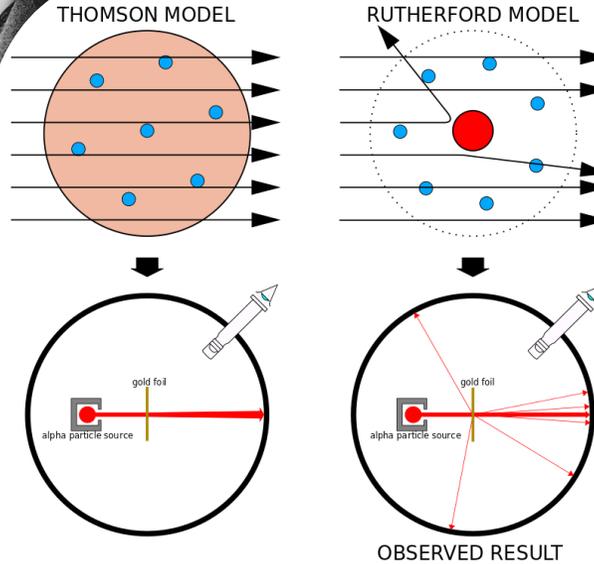
- ☐ Atome composé d'électrons chargés - dans un pudding de charge +
- ☐ L'atome n'est plus une particule élémentaire !

2? (électron + pudding positif)

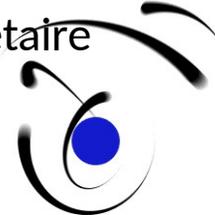
1909



Expérience de Rutherford



- ➔ Atome = électron + noyau + **99,99% de vide**
- ➔ Modèle Planétaire



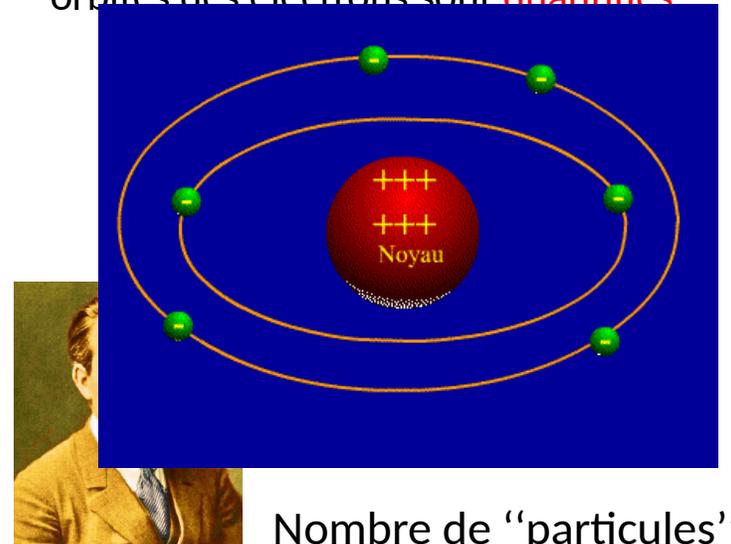
2 (électron + noyau)

1913

Niels Bohr  
Modèle de l'atome Quantique

Dans le modèle de Rutherford, les électrons perdent de l'énergie en tournant autour du noyau (et finissent par tomber dans le noyau... (Oups...))

Pour Bohr : les niveaux d'énergies des orbites des électrons sont **quantifiés** !



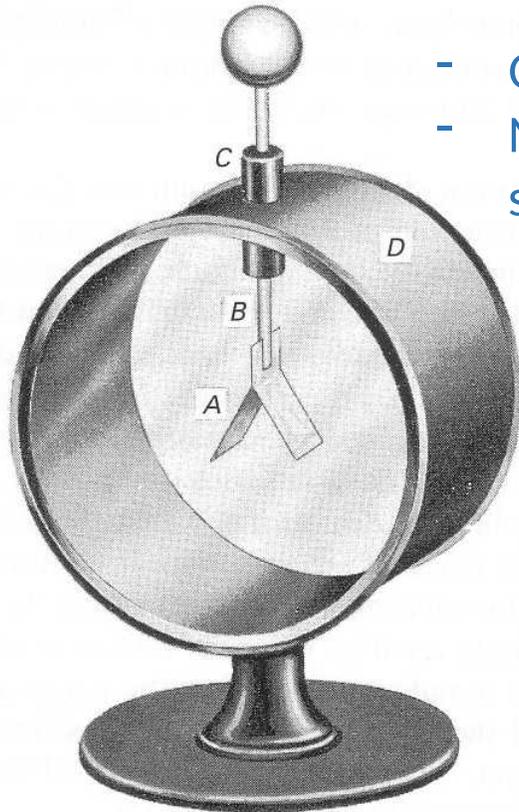
Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2 (e<sup>-</sup> + noyau)

1912

Découverte des  
rayons cosmiques

Les premières expériences de radioactivité utilisaient des électroscopes



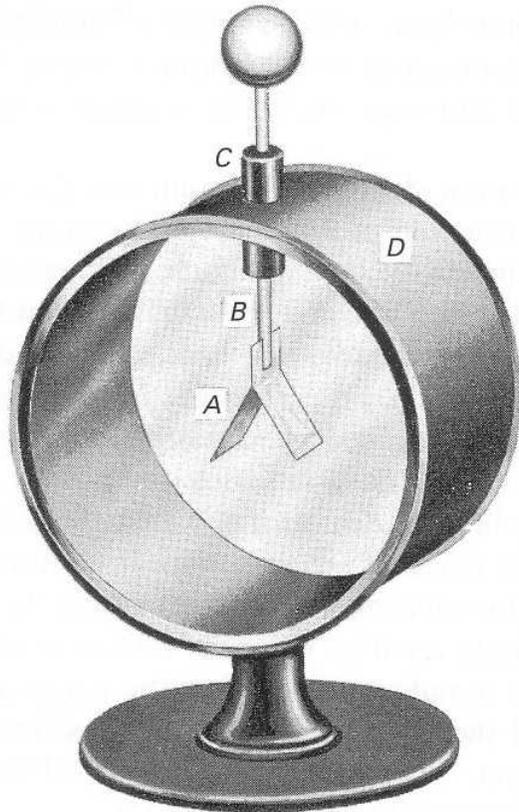
- Quand l'électroscope est chargé, les feuilles(A) s'écartent
- Normalement, aucune raison qu'elles se rapprochent si le système est bien isolé...

- **Mais on observe systématiquement une décharge spontanée des électroscopes**  
**??? pourquoi ! ???**

1912

Découverte des  
rayons cosmiques

Les premières expériences de radioactivité utilisaient des électroscopes



1901 Rutherford montre que la  
décharge  
est dû à la radioactivité  
naturelle

- ✓ L'ionisation du gaz à l'intérieur décharge l'électroscope et les feuilles se rapprochent l'une de l'autre
- ✓ La vitesse de rapprochement des feuilles mesure la quantité d'ionisation

1912

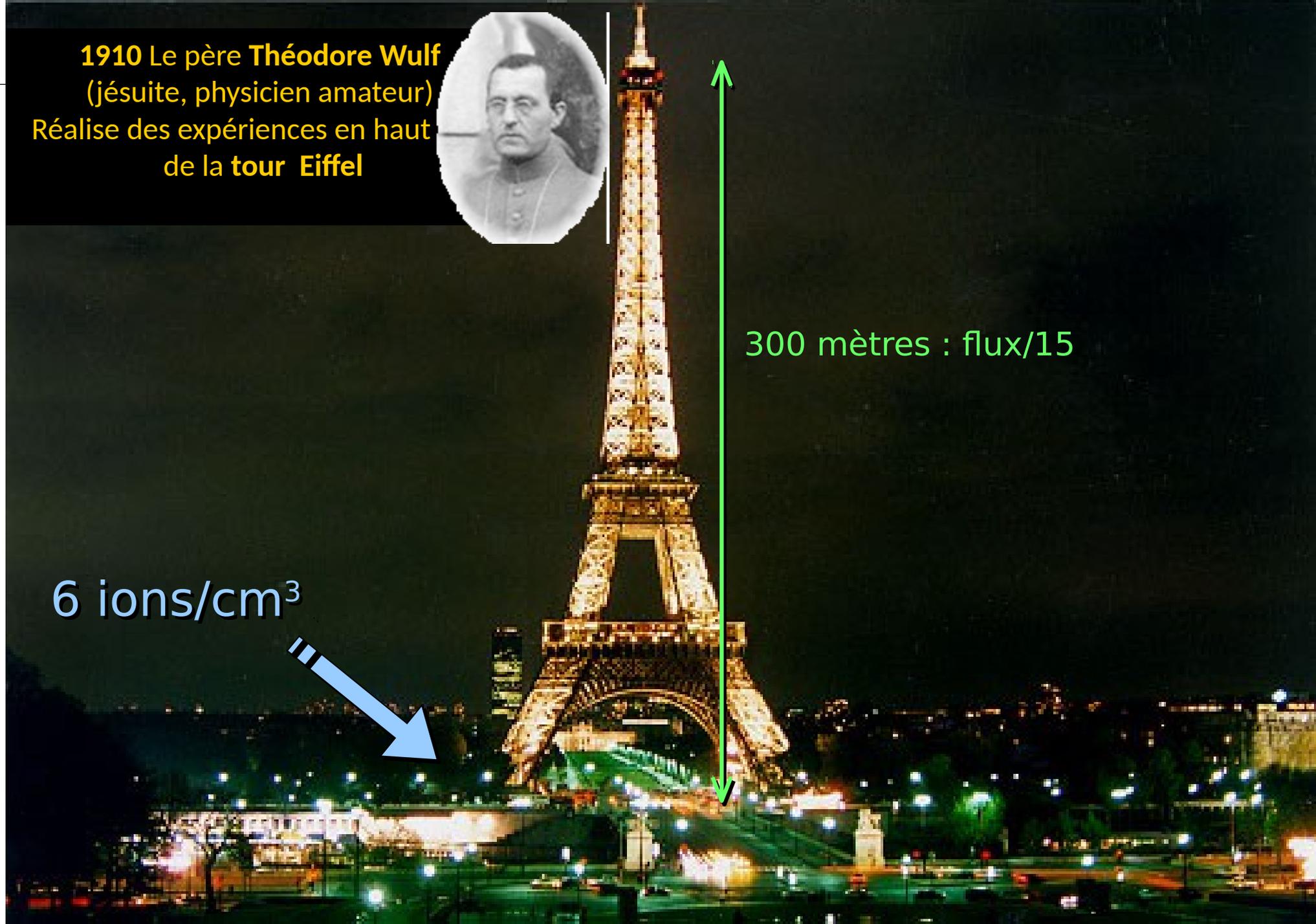
Découverte des  
rayons cosmiques

1910 Le père **Théodore Wulf**  
(jésuite, physicien amateur)  
Réalise des expériences en haut  
de la **tour Eiffel**



300 mètres : flux/15

6 ions/cm<sup>3</sup>



1912

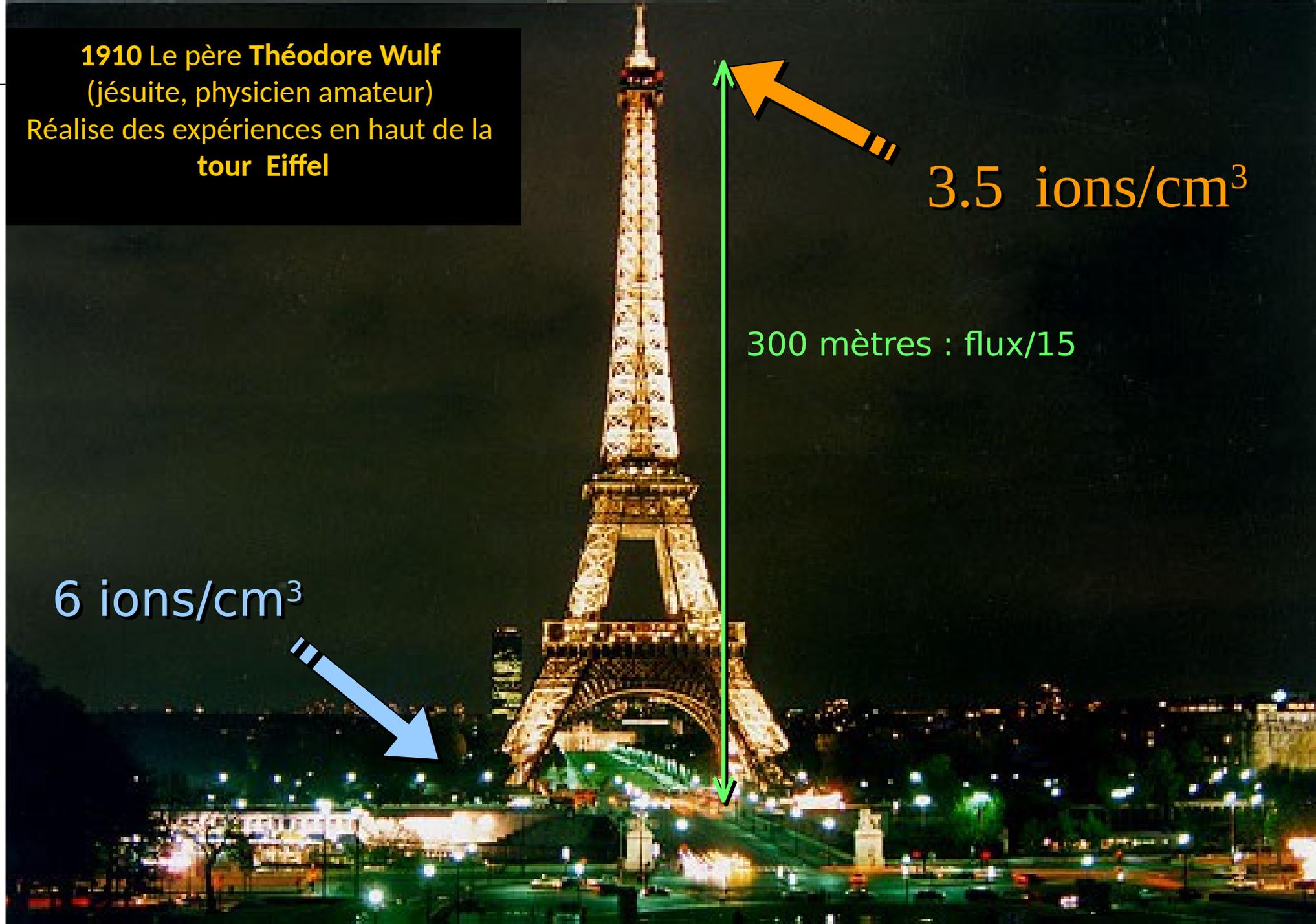
Découverte des  
rayons cosmiques

**1910** Le père **Théodore Wulf**  
(jésuite, physicien amateur)  
Réalise des expériences en haut de la  
**tour Eiffel**

3.5 ions/cm<sup>3</sup>

300 mètres : flux/15

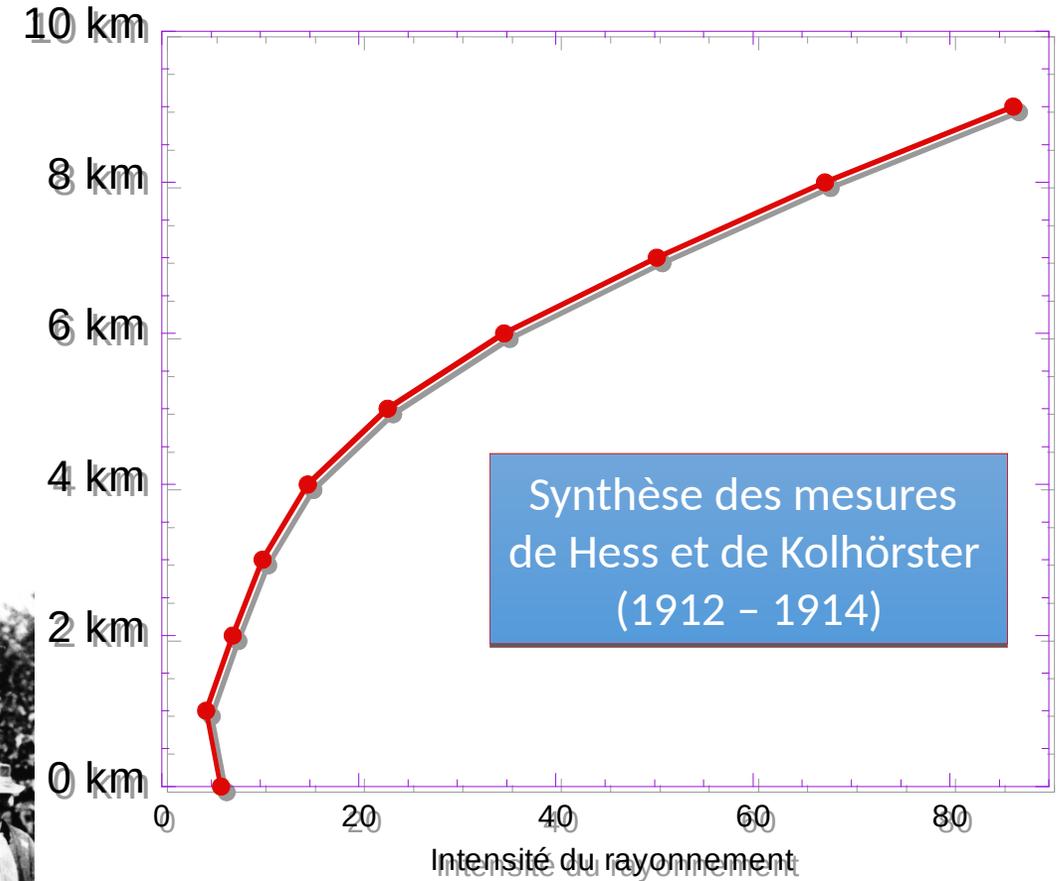
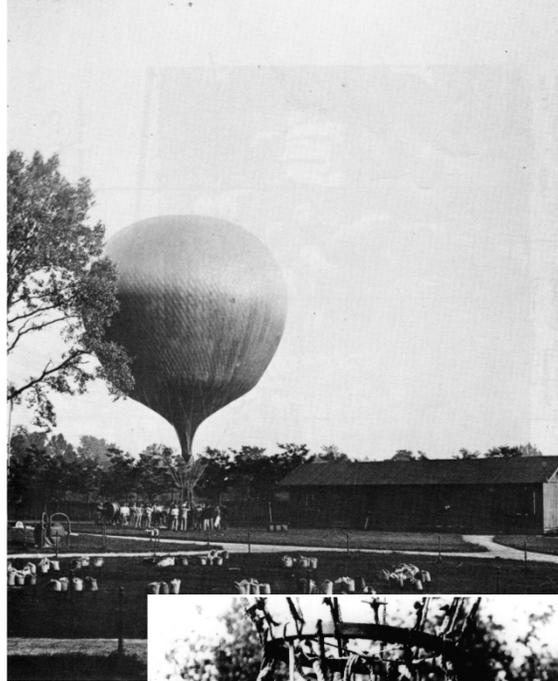
6 ions/cm<sup>3</sup>



1912

Découverte des rayons cosmiques

1912 et 1913 : Hess and Kolhörster mesurent lors de vols en ballon le taux d'ionisation de l'atmosphère en fonction de l'altitude Jusqu'à 10 000 m (sans Oxygène !)



Le taux d'ionisation moyen augmente avec l'altitude !



Victor Franz Hess

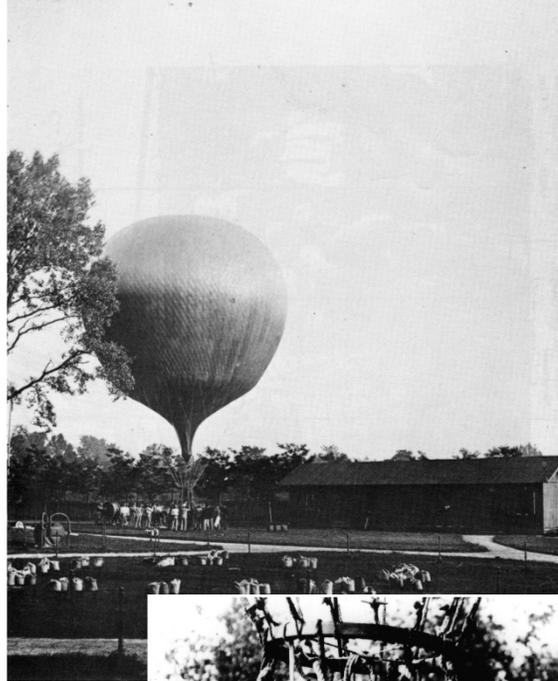


Werner Kolhörster

1912

Découverte des  
rayons cosmiques

**1912 et 1913 : Hess and Kolhörster**  
mesurent lors de vols en ballon le  
taux d'ionisation de l'atmosphère  
en fonction de l'altitude  
Jusqu'à 10 000 m (sans Oxygène !)



Victor Franz  
Hess



Werner  
Kolhörster

Le taux d'ionisation moyen augmente avec  
l'altitude

- La source d'ionisation doit être au delà de  
l'atmosphère terrestre!

Mais quelle source ????

Prix Nobel en 1936

1912

1919

Découverte des  
rayons cosmiques

**Rutherford** prouve que le noyau  
de l'atome d'hydrogène est  
présent dans les autres noyaux.  
Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec  
« premier », πρῶτον*

Nombre de "particules"  
élémentaires "connues"

2 (électron, Proton) + ?

1912

1919

1917 - 1926

Découverte des  
rayons cosmiques

Découverte du  
**Photon  $\gamma$** .  
A. Einstein, A. Compton  
and Co...

**Rutherford** prouve que le noyau  
de l'atome d'hydrogène est  
présent dans les autres noyaux.  
Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec  
« premier », πρῶτον*

Nombre de "particules"  
élémentaires "connues"

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

2 (électron, Proton) + ?

1912

1919

1917 - 1926

1927

Découverte des rayons cosmiques

Découverte de la désintégration  $\beta$ .

Découverte du **Photon  $\gamma$** .  
A. Einstein, A. Compton and Co...

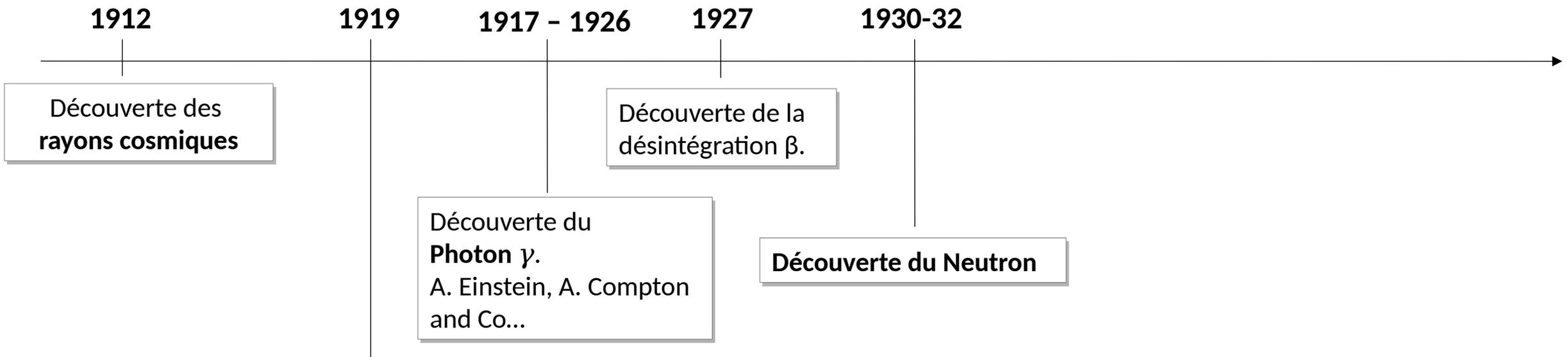
**Rutherford** prouve que le noyau de l'atome d'hydrogène est présent dans les autres noyaux. Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec « premier », πρῶτον*

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

2 (électron, Proton) + ?



**Rutherford** prouve que le noyau de l'atome d'hydrogène est présent dans les autres noyaux. Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec « premier », πρῶτον*

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2 (électron, Proton) + ?

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

4 ( $e^-$ , Proton, neutron,  $\gamma$ ) + ?

1912

1919

1917 - 1926

1927

1930-32

1932

Découverte des rayons cosmiques

Découverte de la désintégration  $\beta$ .

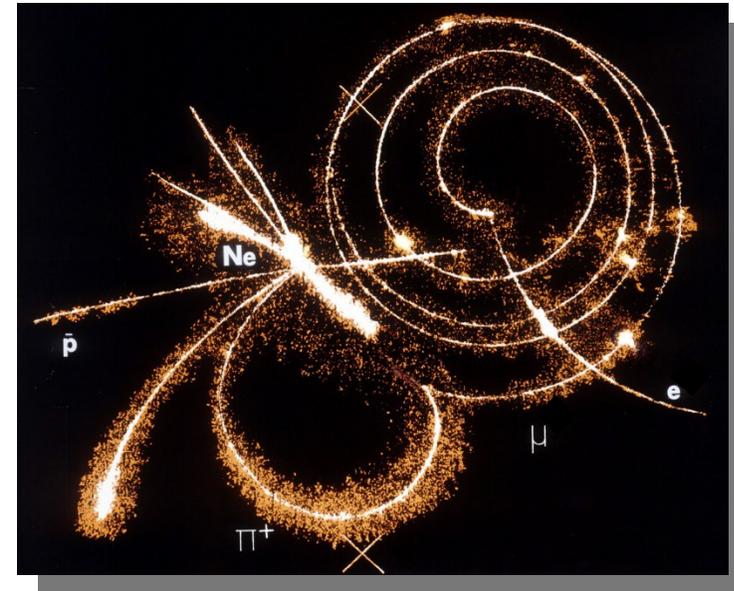
Découverte du Photon  $\gamma$ .  
A. Einstein, A. Compton and Co...

Découverte du Neutron

Problème lors de l'observation de la désintégration  $\beta$  :  $\mu \rightarrow e^-$

Rutherford prouve que le noyau de l'atome d'hydrogène est présent dans les autres noyaux. Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec « premier », πρῶτον*



Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2 (électron, Proton) + ?

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

4 ( $e^-$ , Proton, neutron,  $\gamma$ ) + ?

1912

1919

1917 - 1926

1927

1930-32

1932

Découverte des rayons cosmiques

Découverte de la désintégration  $\beta$ .

Découverte du Photon  $\gamma$ .  
A. Einstein, A. Compton and Co...

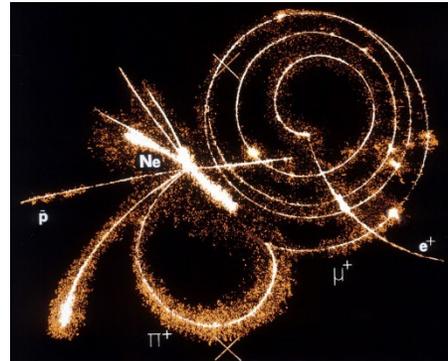
Découverte du Neutron

**Rutherford** prouve que le noyau de l'atome d'hydrogène est présent dans les autres noyaux. Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec « premier », πρώτον*

**Pauli** suggère l'existence d'une nouvelle particule invisible, afin d'interpréter la non conservation de l'impulsion dans la désintégration  $\beta$ .

**Edoardo Amaldi** propose le nom de **neutrino** (petit neutron en Italien)



Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2 (électron, Proton) + ?

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

4 ( $e^-$ , Proton, neutron,  $\gamma$ ) + ?

5

1912

1919

1917 - 1926

1927

1930-32

1932

1937

Découverte des rayons cosmiques

Découverte de la désintégration  $\beta$ .

Découverte du Photon  $\gamma$ .  
A. Einstein, A. Compton and Co...

Découverte du Neutron

découverte du Muon ( $\mu$ ) par **Carl David Anderson** et son assistant **Seth Neddermeyer**, Alors qu'ils travaillaient sur les rayons cosmiques

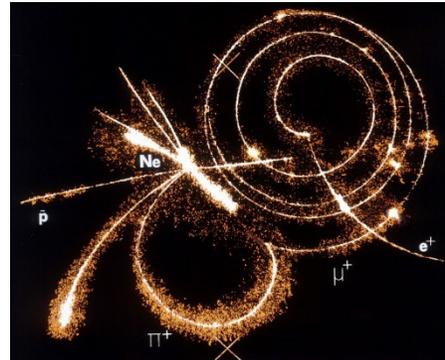
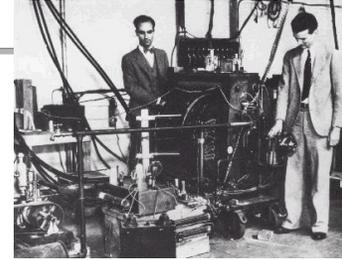
**Rutherford** prouve que le noyau de l'atome d'hydrogène est présent dans les autres noyaux. Il appelle cette particule **Proton**

*Proton neutre singulier du mot grec « premier », πρῶτον*



**Pauli** suggère l'existence d'une nouvelle particule invisible, afin d'interpréter la non conservation de l'impulsion dans la désintégration  $\beta$ .

**Edoardo Amaldi** propose le nom de **neutrino** (petit neutron en Italien)



Nombre de "particules" élémentaires "connues"

2 (électron, Proton) + ?

3 ( $e^-$ , Proton, Photon) + ?

4 ( $e^-$ , Proton, neutron,  $\gamma$ ) + ?

5

De 1937 à 1970

Découverte d'une  
centaine de nouvelles  
particules :

**Mésons**  
**Baryons** } **Les Hadrons**

State	Baryon	Measured Mass (GeV/c <sup>2</sup> )
$J^P = 1/2^+$	$\Lambda$	1.1116
$J^P = 1/2^+$	$p$	0.9383
	$n$	0.9396
	$\Sigma^+$	1.1894
	$\Sigma^0$	1.1926
	$\Sigma^-$	1.1974
	$\Xi^0$	1.3149
	$\Xi^-$	1.3213
$J^P = 3/2^+$	$\Delta^{++}$	1.2310
	$\Delta^+$	1.2315
	$\Delta^0$	1.2338
	$\Delta^-$	1.2348
	$\Sigma^{*+}$	1.3828
	$\Sigma^{*0}$	1.3837
	$\Sigma^{*-}$	1.3872
	$\Xi^{*0}$	1.5318
	$\Xi^{*-}$	1.5350
	$\Omega^-$	1.6724

Nombre de "particules"  
élémentaires "connues"

Trop !

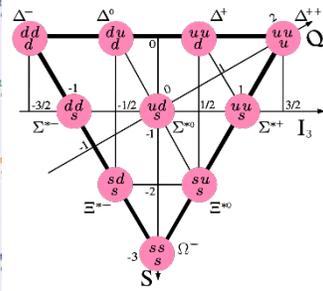
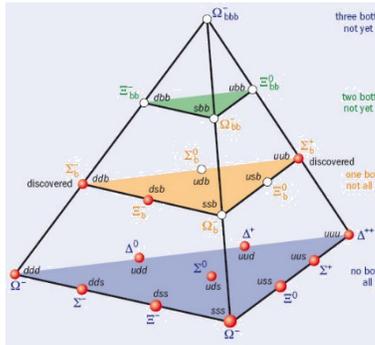
De 1937 à 1970

1961

Découverte d'une  
centaine de nouvelles  
particules :

**Mésons**  
**Baryons** } **Les Hadrons**

**Murray Gell-Mann** propose de  
classer ces nouvelles particules  
par symétrie 3 (SU(3)). Ainsi né la  
notion de Quark (simple astuce  
mathématique !)



6 (e<sup>-</sup>, μ, 3 quarks, γ)

Nombre de "particules"  
élémentaires "connues"

Trop !

7 (e<sup>-</sup>, μ, 4 quarks, γ)



De 1937 à 1970

1961

1964

1974

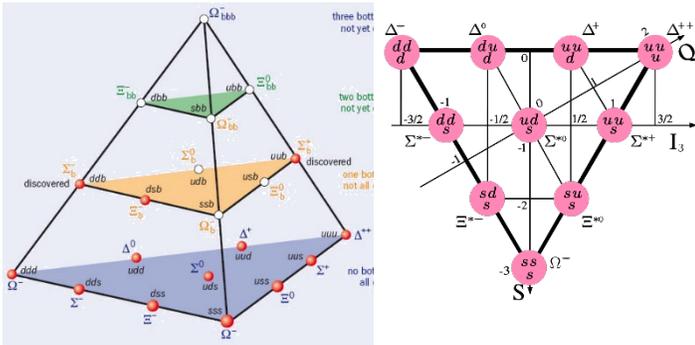
Découverte d'une centaine de nouvelles particules :

Mésons } Les Hadrons  
Baryons }

Mise en évidence des quarks u, d et s on suggéré l'existence du quarks c

Découverte du quarks c. contenu dans la particule J/ψ

Murray Gell-Mann propose de classer ces nouvelles particules par symétrie 3 (SU(3)). Ainsi né la notion de Quark (simple astuce mathématique !)



6 (e<sup>-</sup>, μ, 3 quarks, γ)

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

Trop !

7 (e<sup>-</sup>, μ, 4 quarks, γ)

De 1937 à 1970

1961

1964

1974

De nos jours

Découverte d'une centaine de nouvelles particules :

Mésons } Les Hadrons  
Baryons }

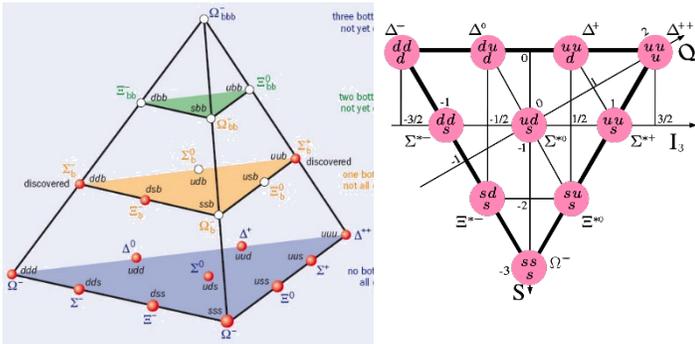
Mise en évidence des quarks u, d et s on suggéré l'existence du quarks c

Découverte du quarks c. contenu dans la particule J/ψ

•••••

Murray Gell-Mann propose de classer ces nouvelles particules par symétrie 3 (SU(3)). Ainsi né la notion de Quark (simple astuce mathématique !)

••• Bon ok ! On en est où aujourd'hui !



6 (e<sup>-</sup>, μ, 3 quarks, γ)

Nombre de "particules" élémentaires "connues"

Trop !

7 (e<sup>-</sup>, μ, 4 quarks, γ)

# FERMIONS

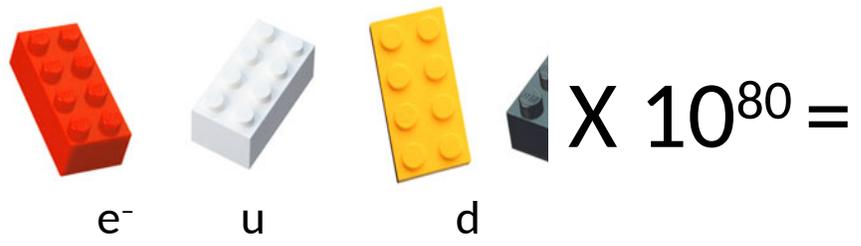
matter constituents

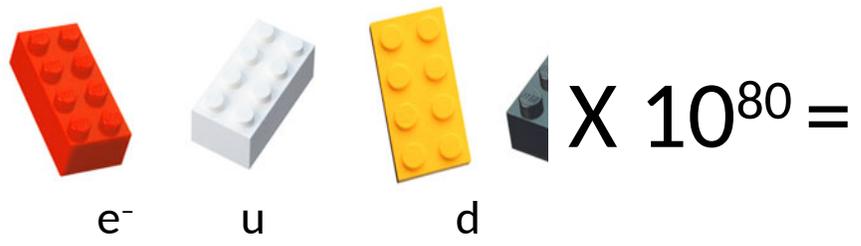
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0	<b>t</b> top	175	2/3
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

Première famille

Deuxième famille

Troisième famille





$\times 10^{80} =$



**Et les forces dans tout ça ?**



**You must feel the force around you.**

# 4 forces élémentaires !

## Particules associées

- Force électromagnétique

$\gamma$  Photon. Charge 0, masse = 0

- Force Faible

$W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  masse  $\neq 0$

- Force Forte

$g$  gluons (x8). Charge 0, masse = 0

- Gravitation

$(G)$  graviton. Charge 0?, masse  $\neq 0$

# 4 forces élémentaires !

## Particules associées

### Bosons

- Force électromagnétique

$\gamma$  Photon. Charge 0, masse = 0

- Force Faible

$W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  masse  $\neq 0$

- Force Forte

$g$  gluons (x8). Charge 0, masse = 0

- Gravitation

$(G)$  graviton. Charge 0?, masse  $\neq 0$

- Le bosons de Higgs

$H$  graviton. Charge = 0, masse  $\neq 0$

# Le MMORPIG\* de notre Univers !

(\*Massively Multi Object Physical Interaction Game)

**Strong**

Gluons (8)



Quarks

Mesons

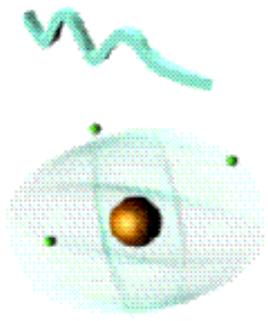
Baryons

Nuclei

1

**Electromagnetic**

Photon



Atoms

Light

Chemistry

Electronics

$10^{-2}$

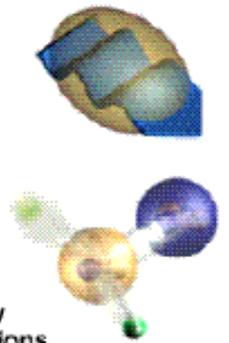
		Matière Fermions			Forces Bosons	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
	charge	2/3	2/3	2/3	0	0
	spin	1/2	1/2	1/2	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
		d down	s strange	b bottom	$\gamma$ photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	-1	-1	-1	0	
	spin	1/2	1/2	1/2	1	
		e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	Z Z boson	
		$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	W W boson	
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	$\pm 1$	
		1/2	1/2	1/2	1	

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS

**Weak**

Bosons (W,Z)



Neutron decay

Beta radioactivity

Neutrino interactions

Burning of the sun

$10^{-13}$

**Gravitational**

Graviton ?



Solar system

Galaxies

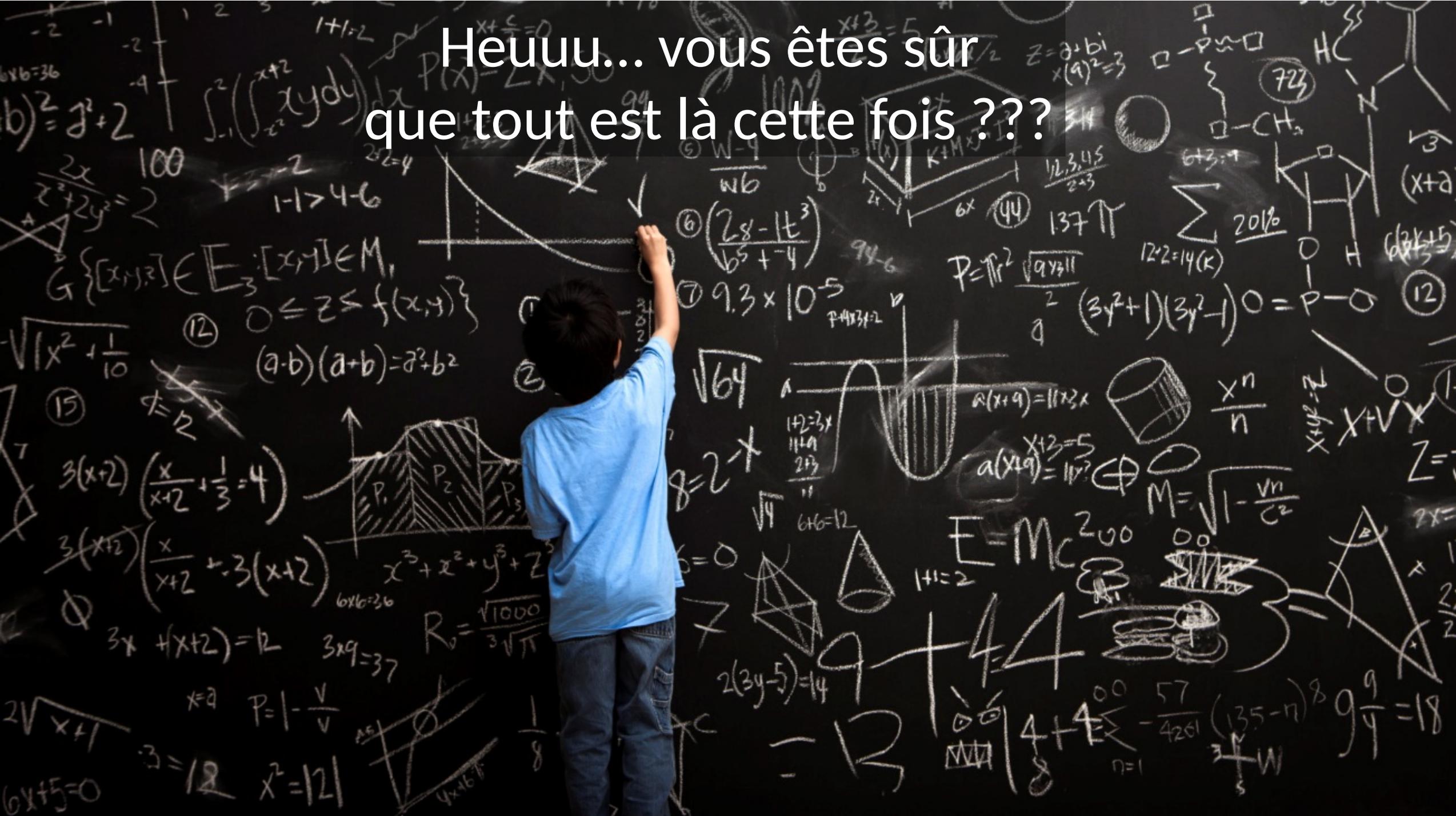
Black holes

$10^{-38}$

+ antiparticules

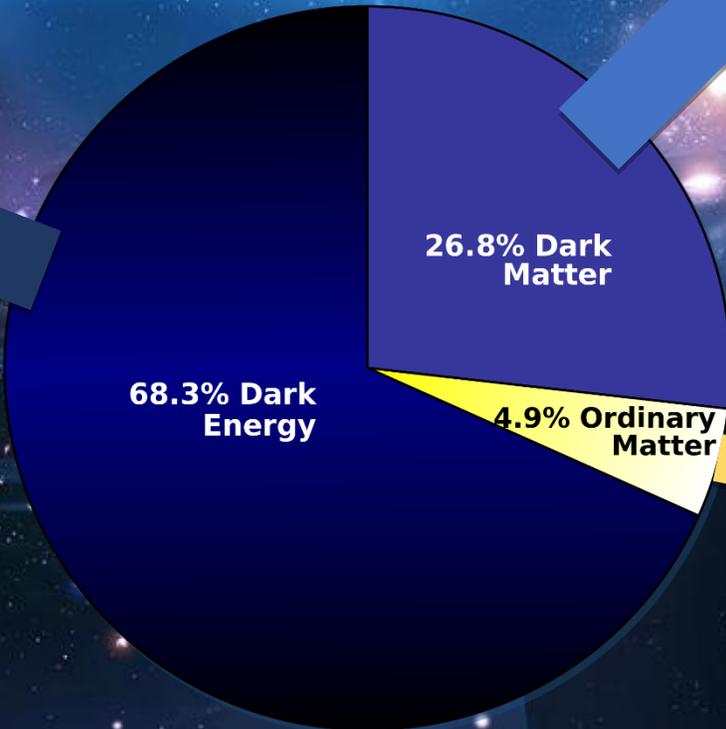
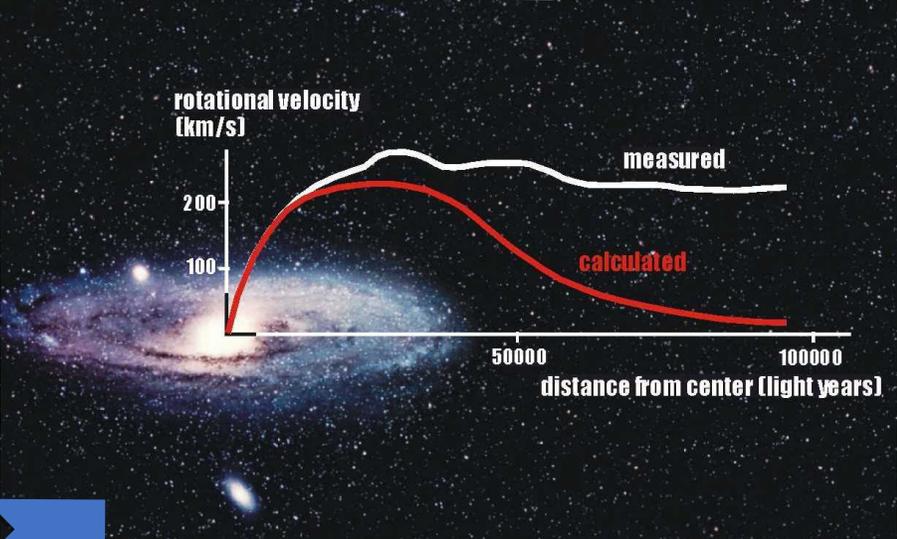


Heuuu... vous êtes sûr  
que tout est là cette fois ???





En fait, c'est presque....  
**RIEN !**

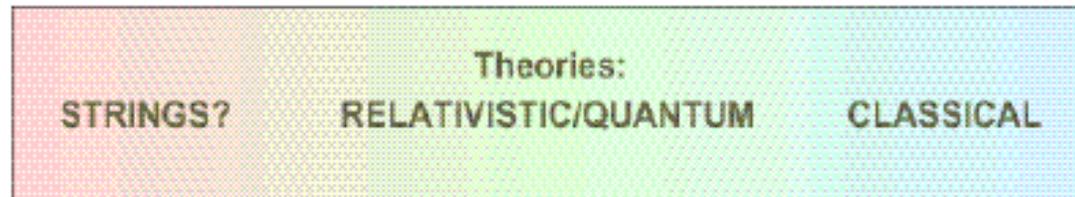
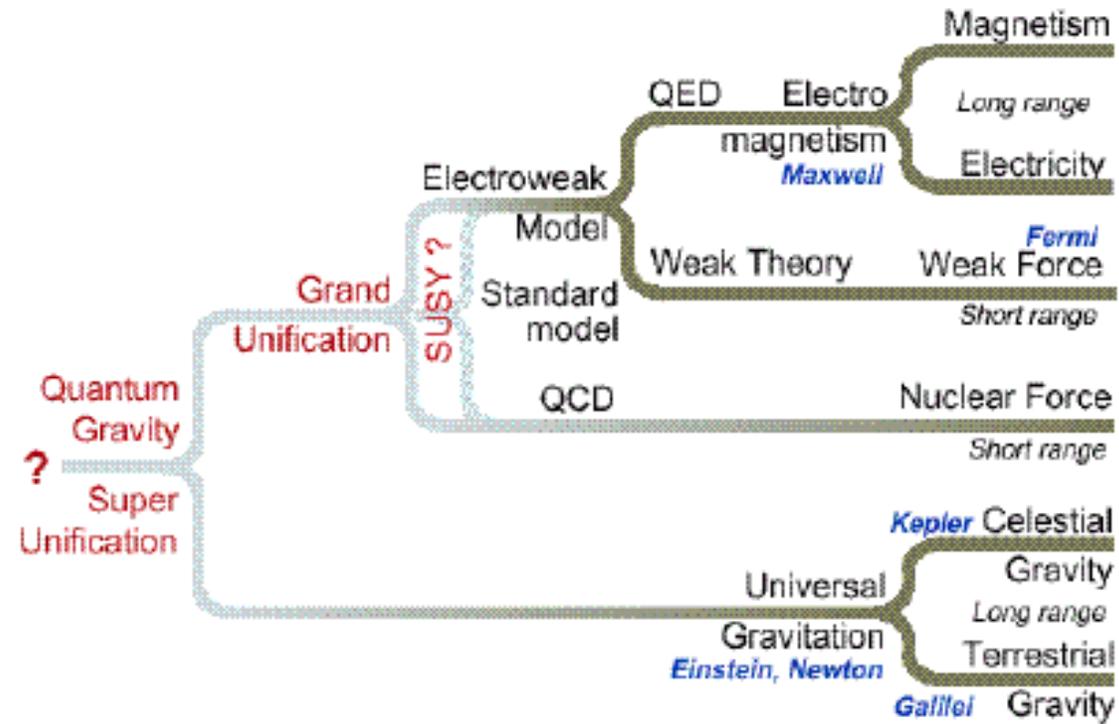
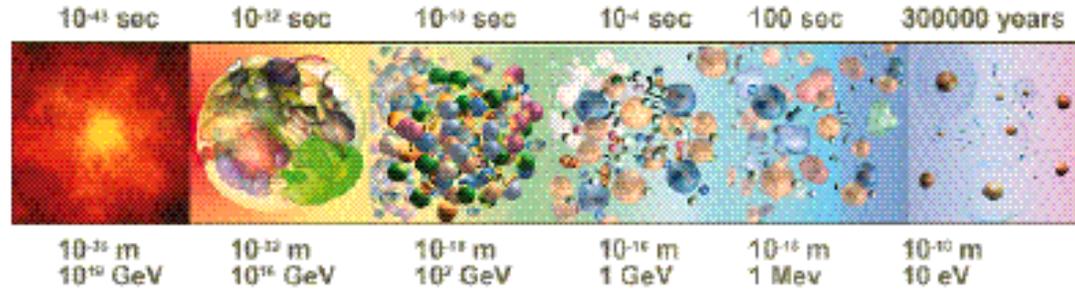


**STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES**

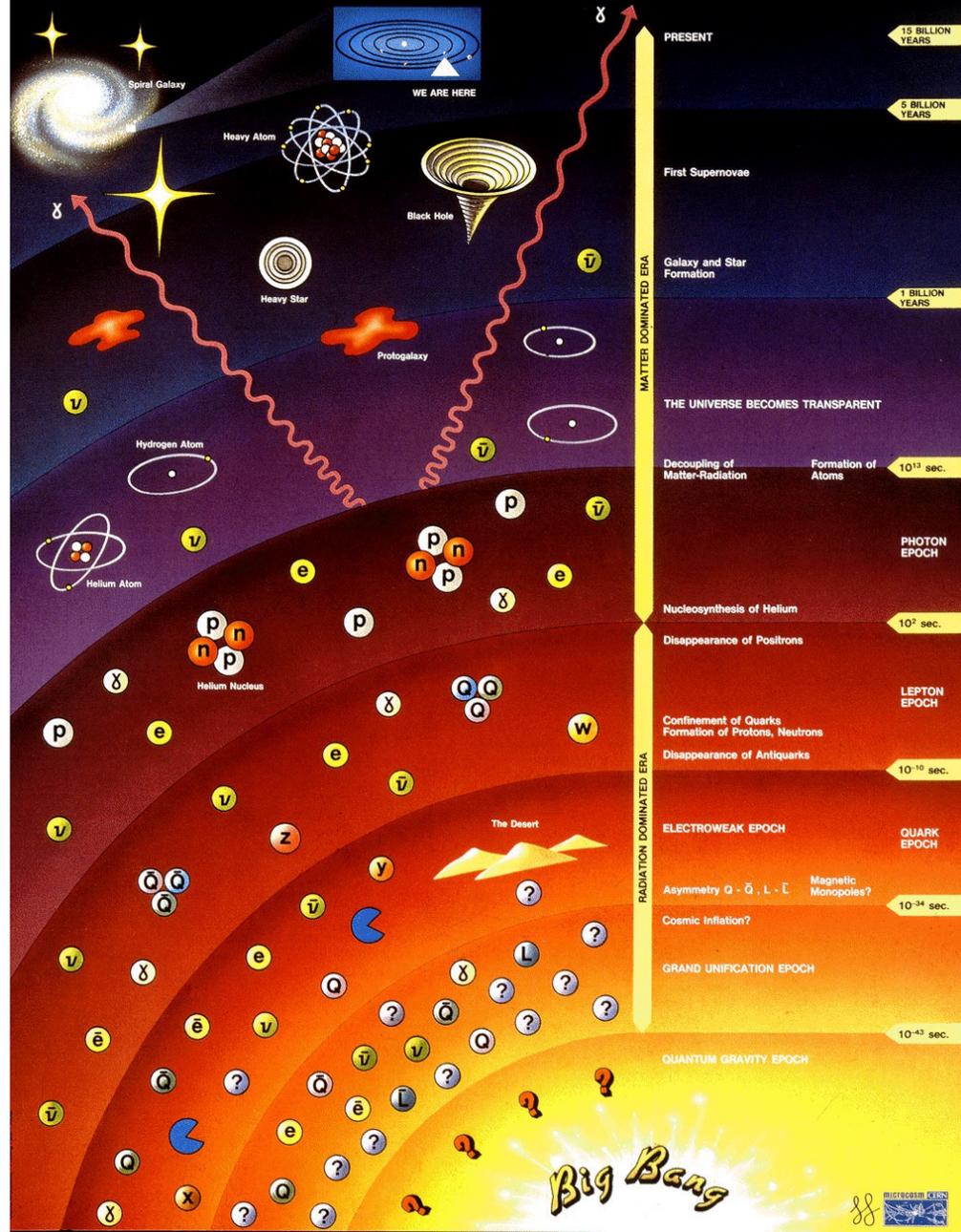
QUARKS	UP mass: 2.3 MeV/c <sup>2</sup> charge: 2/3 spin: 1/2	CHARM 1.275 GeV/c <sup>2</sup> 2/3	TOP 173.07 GeV/c <sup>2</sup> 2/3	GLUON 0 0 1	HIGGS BOSON 126 GeV/c <sup>2</sup> 0 0
	DOWN 4.8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3	STRANGE 95 MeV/c <sup>2</sup> -1/3	BOTTOM 4.18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3	PHOTON 0 0 1	
	ELECTRON 0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	MUON 105.6 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	TAU 1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2	Z BOSON 91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1	
ELECTRON NEUTRINO ~0.1 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2	MUON NEUTRINO ~0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2	TAU NEUTRINO ~1.75 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2	W BOSON 80.4 MeV/c <sup>2</sup> ±1 1		



# Unification des interactions



# History of the Universe





Des Étoiles et des Hommes





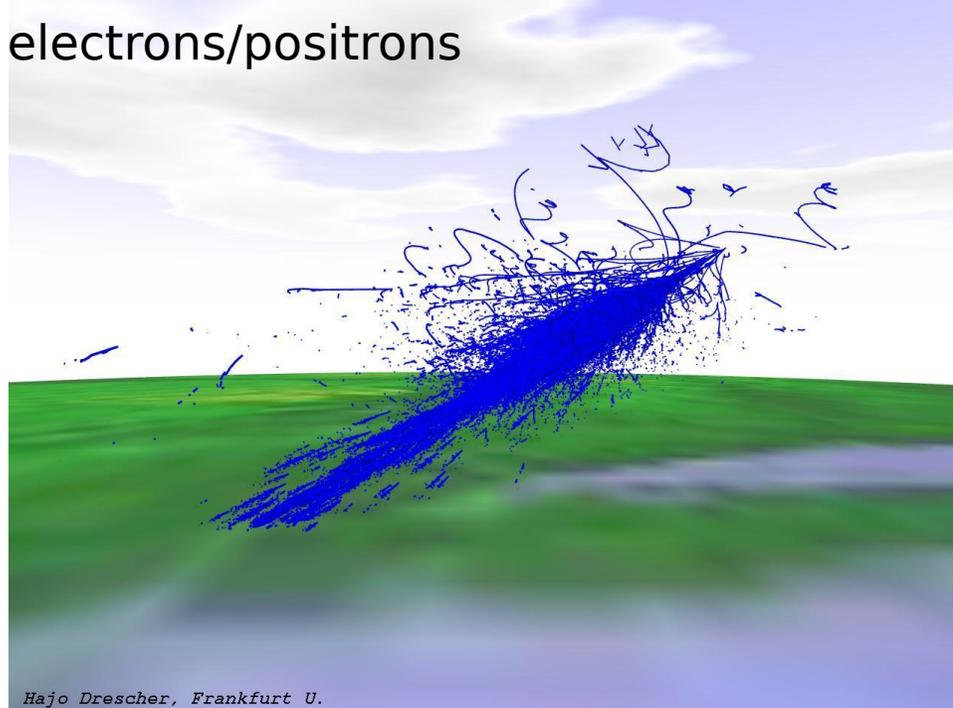






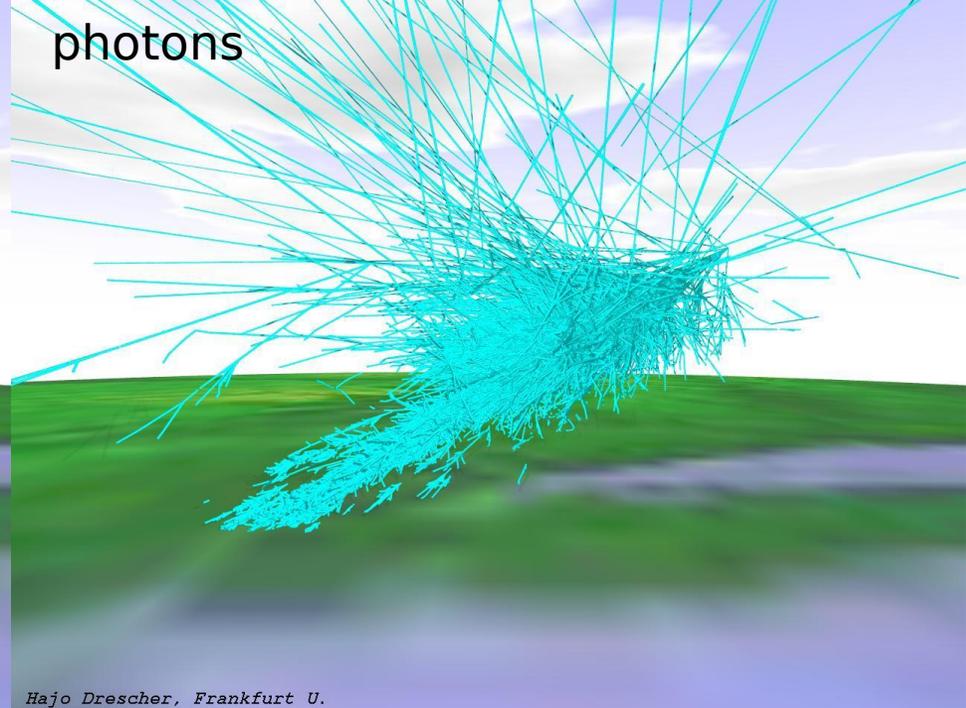


electrons/positrons



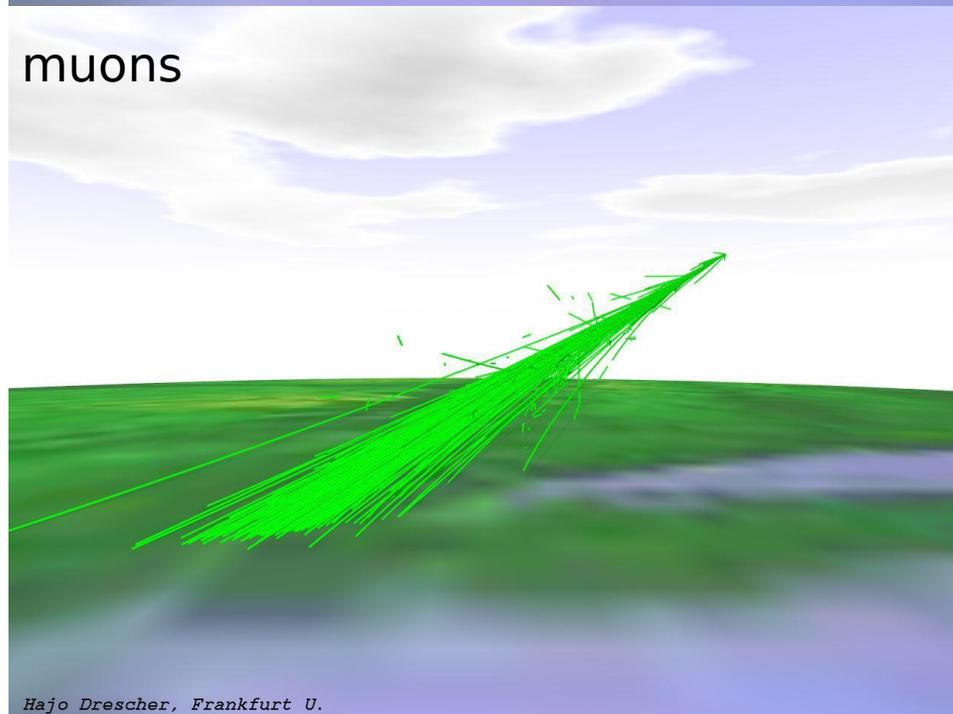
*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

photons



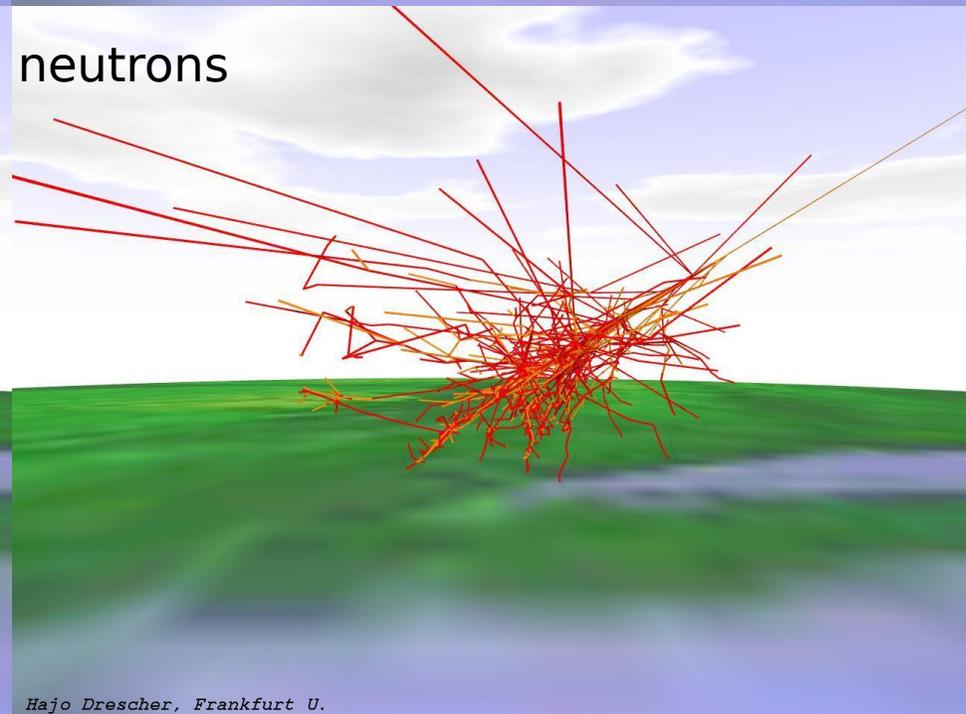
*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

muons



*Hajo Drescher, Frankfurt U.*

neutrons



*Hajo Drescher, Frankfurt U.*