



**Physique quantique et particules
(Physique 30, unité D)**

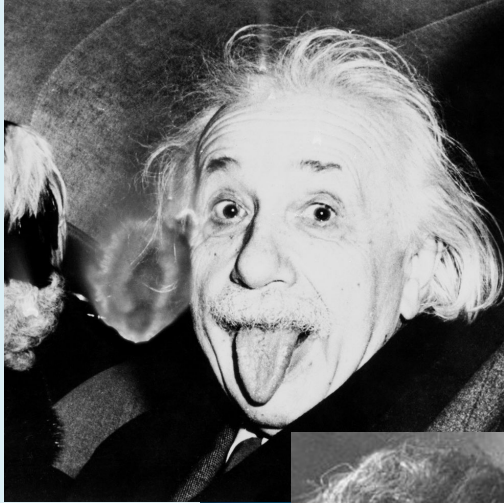
**Marc de Montigny, professeur de physique
Faculté Saint-Jean, University of Alberta**

École Maurice-Lavallée

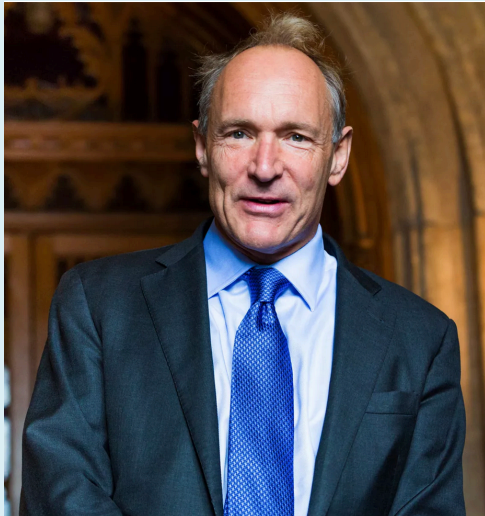
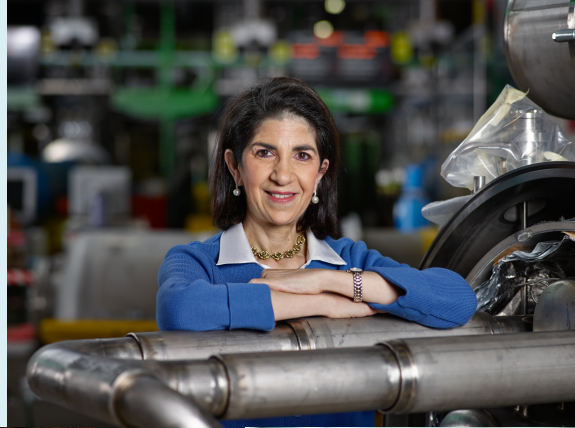
Physique 30 – enseignant: Stéphane Couillard

31 mai 2023

Pouvez-vous nommer ces célébrités de la physique?



Et ces leaders qui ont étudié la physique?



Nouvelle récente en physique des particules

FASER (ForwArd Search ExpeRiment), CERN, mars 2023

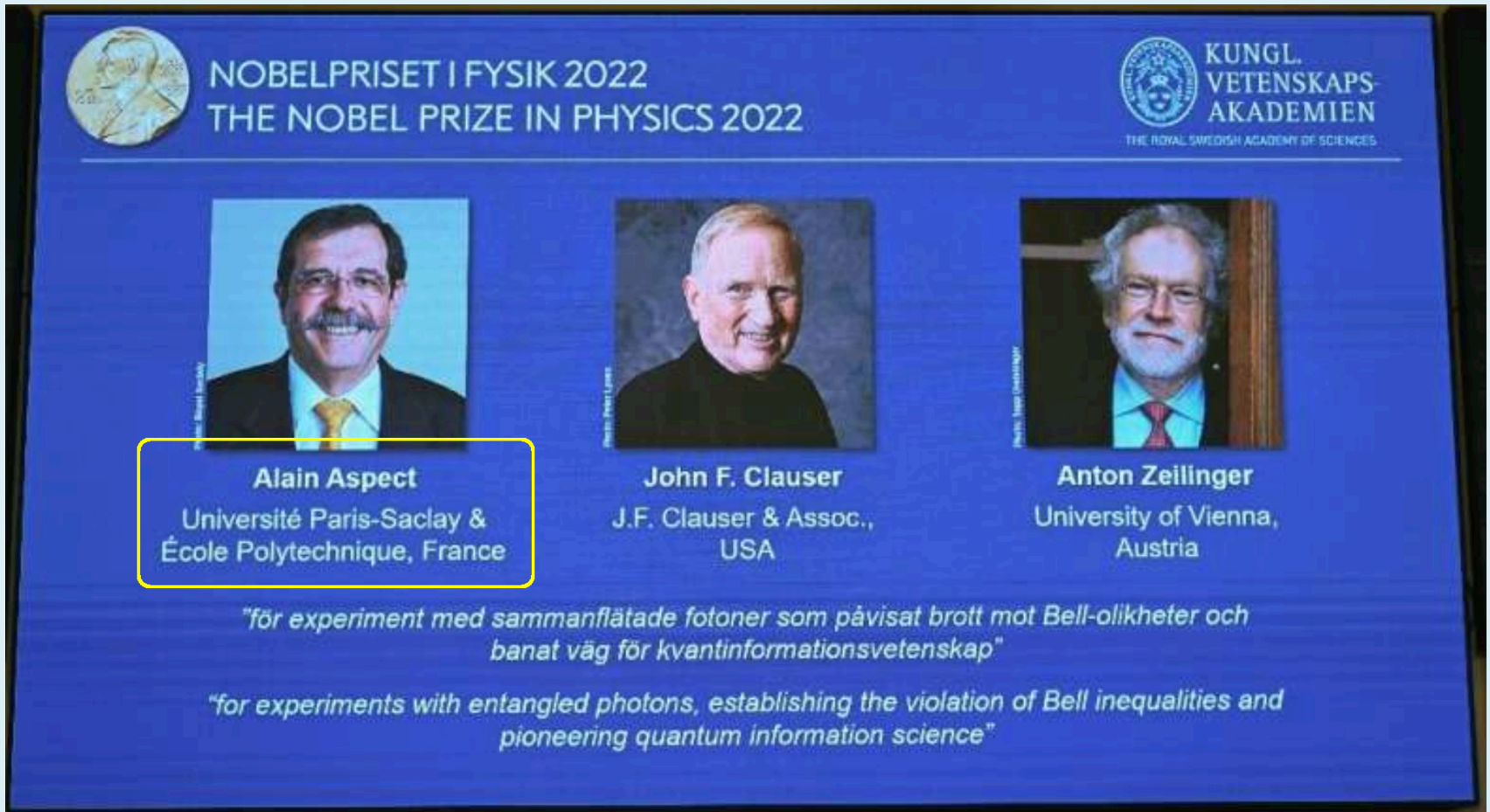
Première détection de neutrinos produits dans un accélérateur de particules.




<https://phys.org/news/2023-03-team-neutrinos-particle-collider.html>


CERN = *Organisation européenne pour la recherche nucléaire*


et dans le monde francophone...





The image shows a blue banner for the Nobel Prize in Physics 2022. At the top left is the Nobel Prize medal. To its right, the text reads "NOBELPRISET I FYSIK 2022" and "THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022". At the top right is the logo of the Royal Swedish Academy of Sciences, "KUNGL. VETENSKAPS-AKADEMIEN" and "THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES". Below this, three portraits of the laureates are shown. The first portrait is of Alain Aspect, with a yellow box around his name and affiliation. The second is of John F. Clauser, and the third is of Anton Zeilinger. Below the portraits, the award citation is written in Swedish and English.

 NOBELPRISET I FYSIK 2022
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022

 KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES


Alain Aspect
Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France


John F. Clauser
J.F. Clauser & Assoc.,
USA


Anton Zeilinger
University of Vienna,
Austria

"för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformationsvetenskap"

"for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

<https://phys.org/news/2022-10-scientists-nobel-prize-physics-quantum.html>

Physique expérimentale des particules à la U of A

LHC = Large Hadron Collider [ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), MoEDAL (Monopole and Exotics Detector At the LHC)]

SNOLAB [SNO+, PICO = fusion de PICASSO (Projet d'Identification de Candidats Supersymétriques Sombres) et COUPP (Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics), DEAP (Dark Matter Experiment using Argon Pulse-Shape Discrimination)]

IceCube [PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade)]

Matière sombre, neutrinos, Higgs, gravité quantique, rayons cosmiques, supersymétrie, mini trous noirs, etc.

Deux piliers de la physique moderne:

1. Relativité (restreinte: phénomènes à hautes énergies, générale: gravitation)

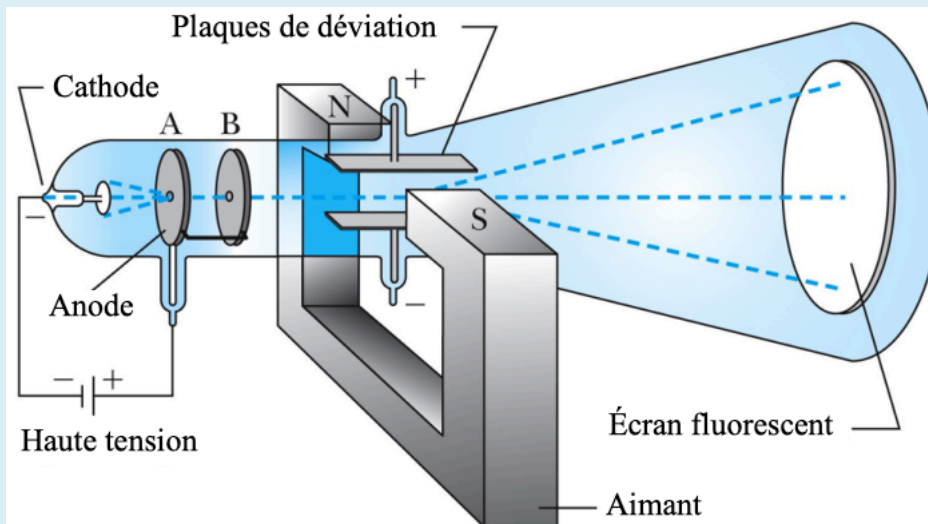
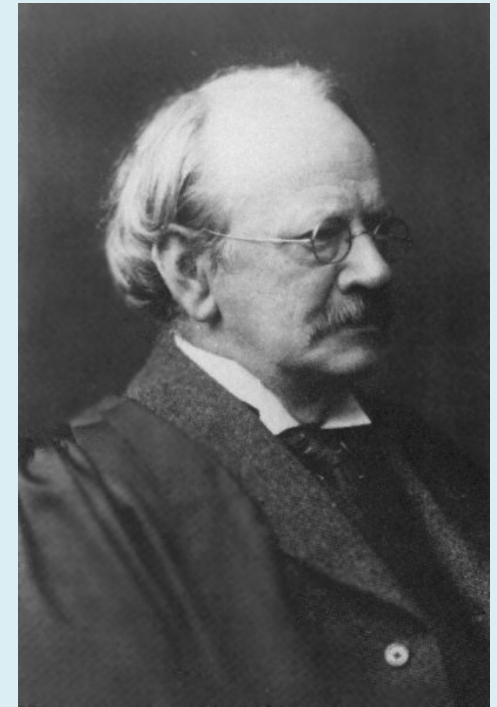
2. Physique quantique (phénomènes à l'échelle atomique et subatomique)

Ici, nous parlerons du #2 dans un ordre chronologique, en commençant en 1897.

Joseph John Thomson (1856-1940)

Prix Nobel (1906)

Rayons cathodiques, découverte de l'électron, sélecteur de vitesse, rapport e/m (1897) = naissance de la recherche sur les particules...



$$F_B = F_E \Rightarrow Bv = E$$

$$F_B = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow mv = qBr$$

Signe de la charge ?

Mouvement de la charge si $v <$ ou $> E/B$?

Recherche de particules un peu curieuse car, en fait,

- 1. (a) on les crée au moyen d'accélérateurs, ou
(b) elles proviennent de rayons cosmiques, puis**
- 2. on les observe, directement ou indirectement, avec des détecteurs de particules.**

Ainsi, avant de poursuivre avec l'histoire de la physique quantique et physique des particules, quelques mots sur les détecteurs/accélérateurs.

Exemple de détecteur: chambre à brouillard

Labo physique Descartes

<https://www.youtube.com/watch?v=06EMIGXYd6s>

US LHC

<https://www.youtube.com/watch?v=xky3flaSkB8>



Chambre à brouillard
Dept of Physics, U of A



Autres types de détecteurs:

chambres à bulles
chambres à étincelles
chambre à fils
chambre à silicone
chambre de dérive
compteur Geiger
détecteur Tcherenkov
détecteur à scintillation
etc.

Accélérateurs de particules

Accélérateur simple: plaques chargées

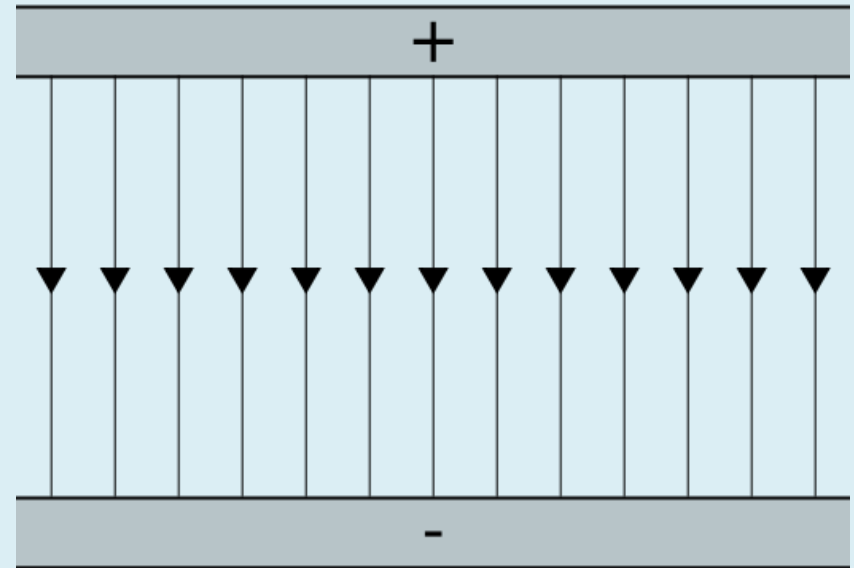
Vitesse finale donnée par

$$\frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

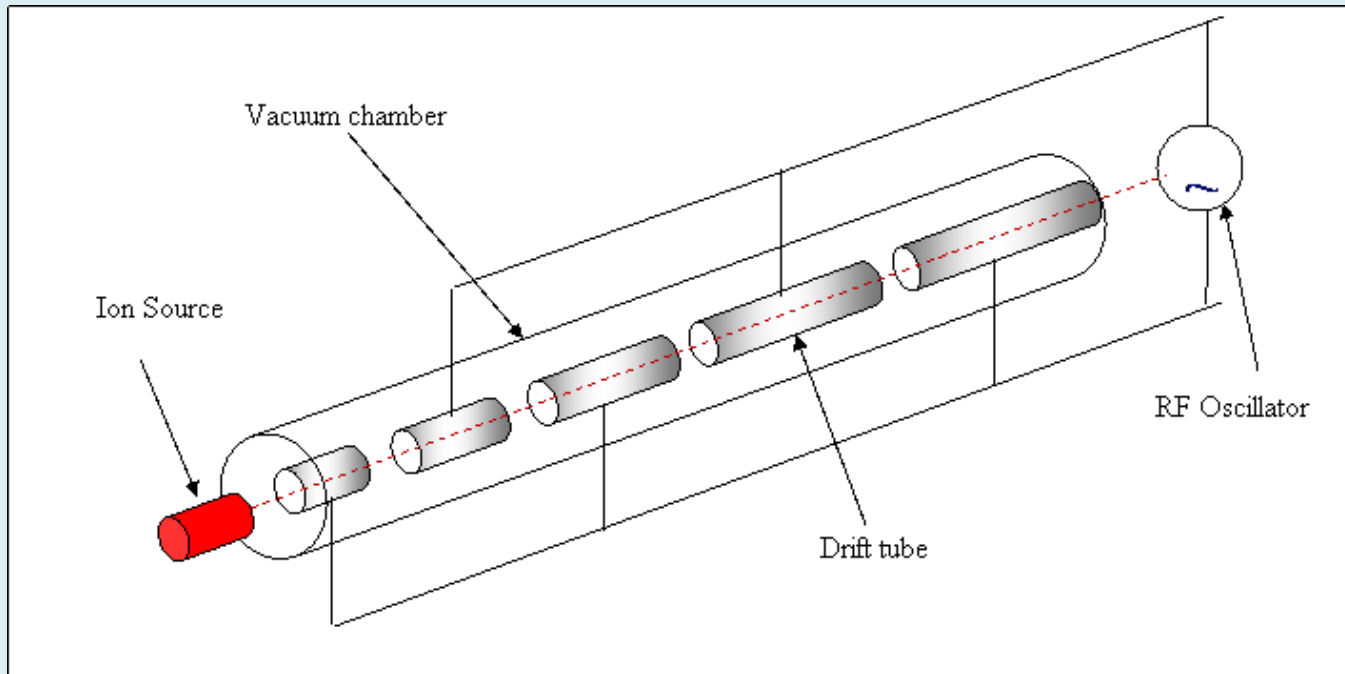
Unité d'énergie

$$1 \text{ électron - volt (eV)} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Énergie : 10 keV (télévision), 15 MeV (maximum)



LINear ACcelerator, inventé en 1928 (Utilisé dans certains traitements contre le cancer.)

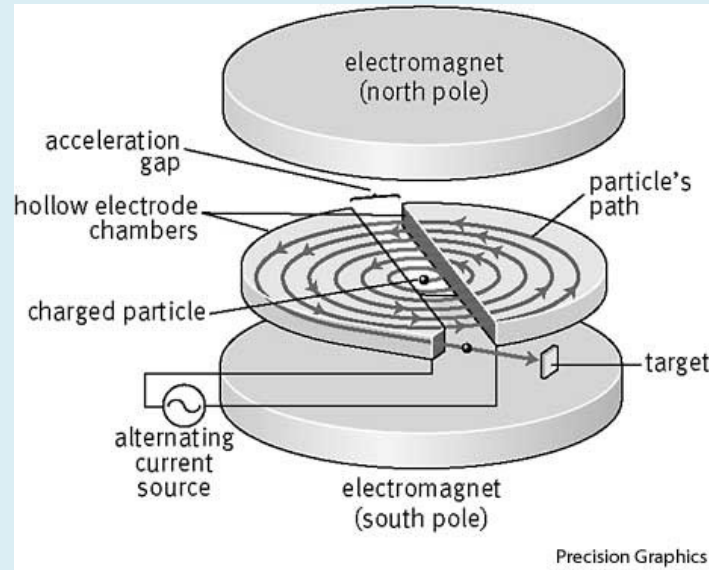


Le plus long linac (3.2 km) : SLAC (e^+e^- , Stanford CA)

Énergie max ≈ 50 GeV



Cyclotron



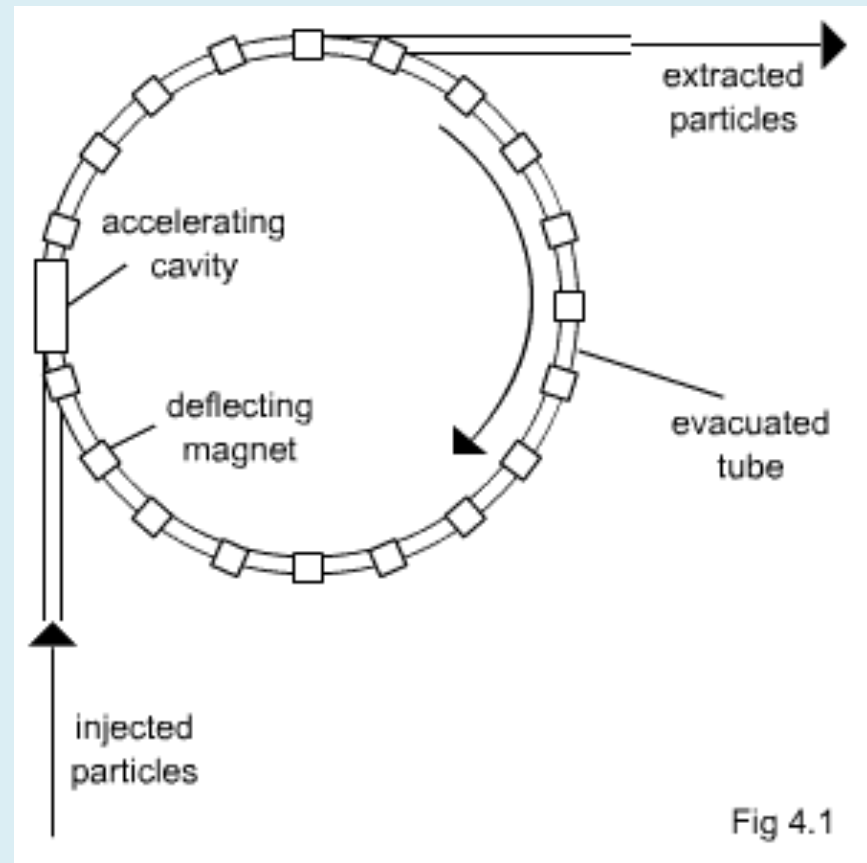
Fréquence cyclotron $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{p}{r} \frac{1}{2\pi m} = \frac{qB}{2\pi m}$

Rayon de courbure: $r = \frac{mv}{qB}$ r augmente avec v

Exemple: TRIUMF (Canada, 520 MeV, 1974)

Synchrotrons

$$B = \frac{mv}{qr}$$

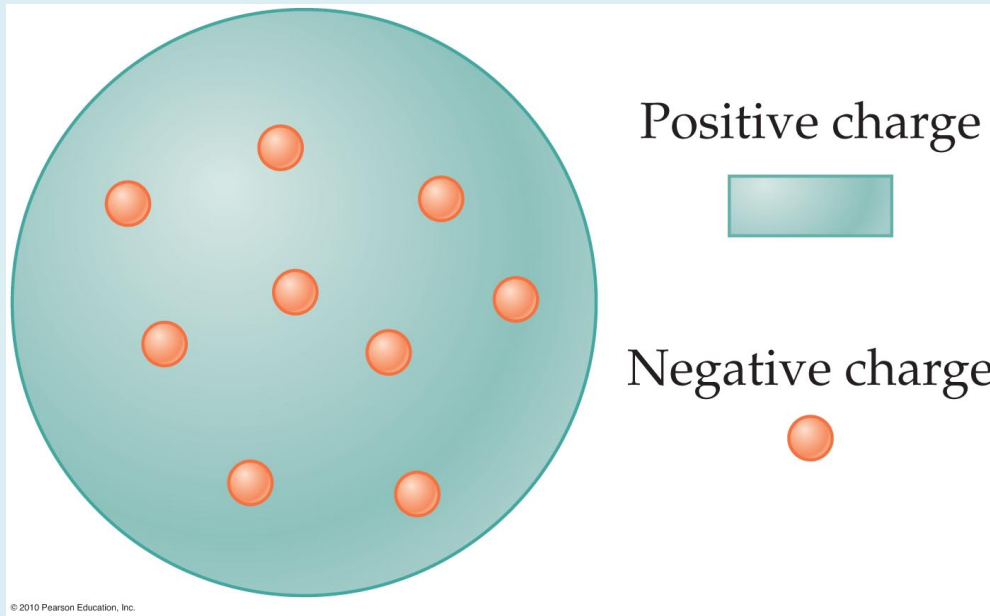


r fixe

Énergie max 7 TeV au Large Hadron Collider (LHC) du CERN
Rayonnement synchrotron dû à l'accélération de charges
Exemple: Canadian Light Source (Sask, 2004)

Modèle du plum pudding de Thomson (1904)

Atome neutre et électrons de charge négative

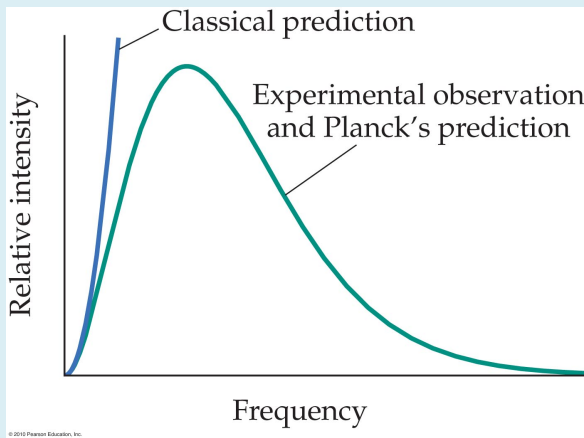
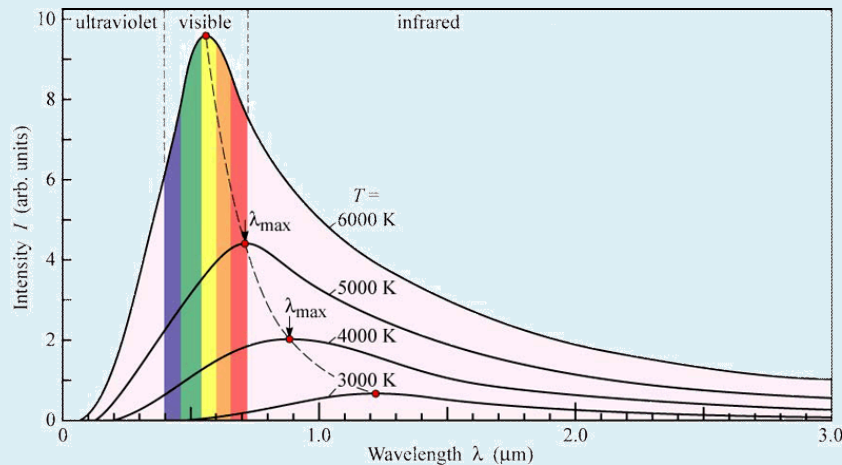
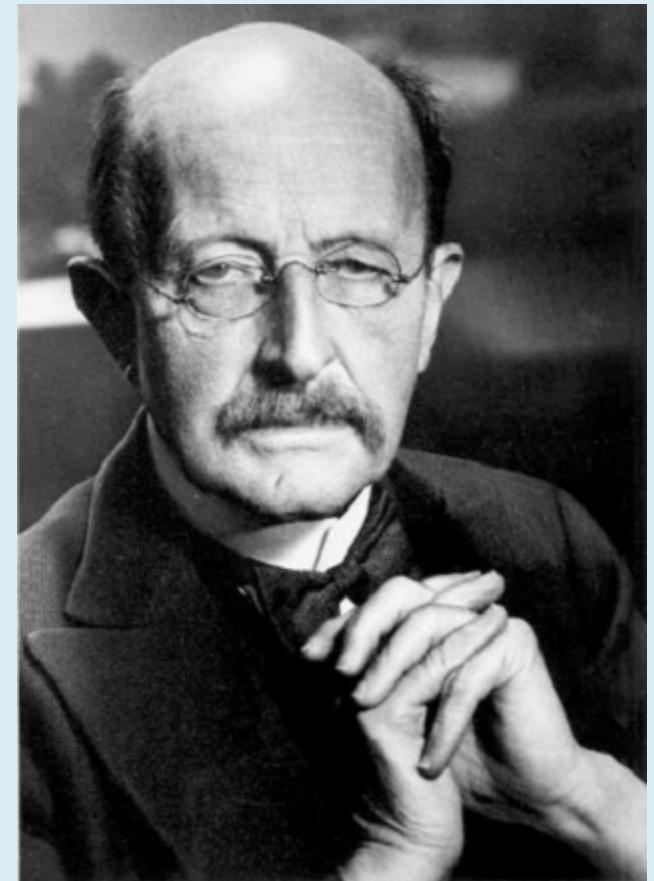


Incompatible avec l'expérience de Rutherford (1909), à laquelle nous reviendrons bientôt...

Max Planck (1858-1947)

Prix Nobel (1918)

Rayonnement corps noir, quantification de l'énergie (1900) PAS AU PROGRAMME!!!



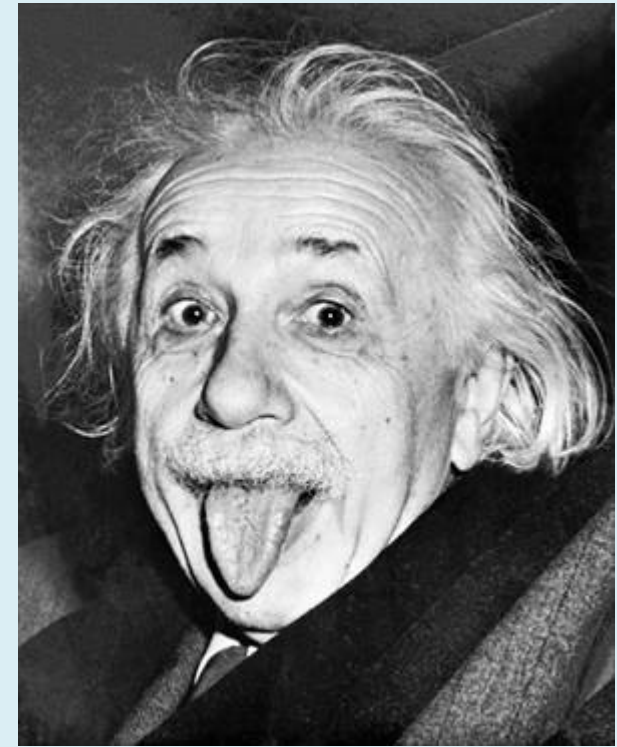
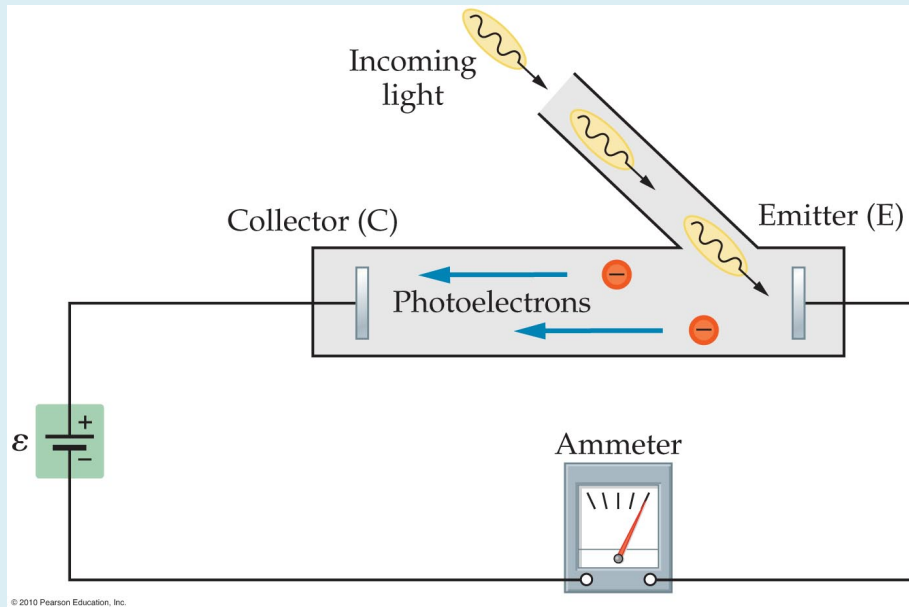
$$E = hf \quad \left(= \frac{hc}{\lambda} \right)$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

Albert Einstein (1879-1955)
Prix Nobel (1921)

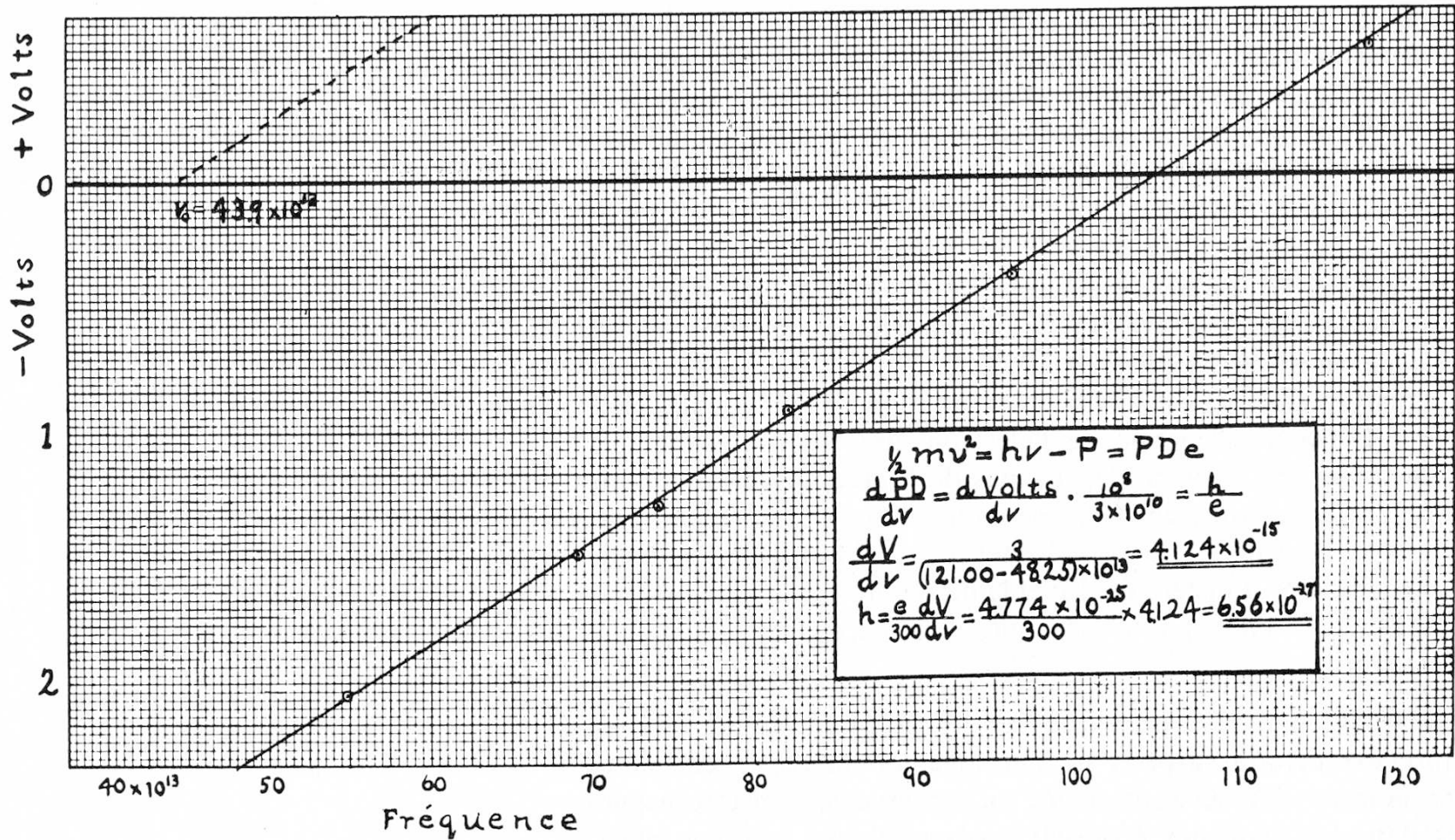
Effet photoélectrique, concept de
photon (1905), relativité (1905, 1916)



$$E_C = hf - W$$

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = qV_0$$

<https://applets.kcvs.ca/photoelectricEffect/PhotoElectric.html>

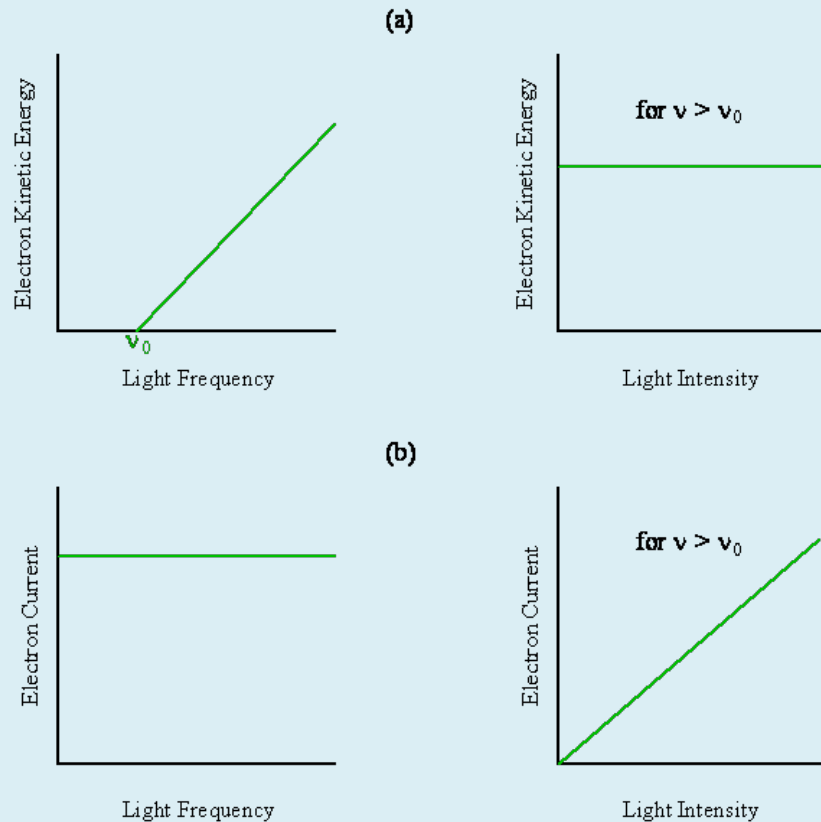


$V = (h/e)f - \phi/e$ implique
 pente: h/e
 ordonnée à l'origine: $-\phi/e$

R.A. Millikan, A direct photoelectric determination of Planck's h Physical Review vol. 7 (1916) p. 373

Courant mesuré: dépend de l'intensité et non de la fréquence

Potentiel retardateur = V_c dépend de la fréquence et non de l'intensité



[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Book%3A_Quantum_States_of_Atoms_and_Molecules_\(Zielinski_et_al\)/02%3A_Foundations_of_Quantum_Mechanics/2.03%3A_Photoelectric_Effect](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Book%3A_Quantum_States_of_Atoms_and_Molecules_(Zielinski_et_al)/02%3A_Foundations_of_Quantum_Mechanics/2.03%3A_Photoelectric_Effect)

Effet photoélectrique - analogie

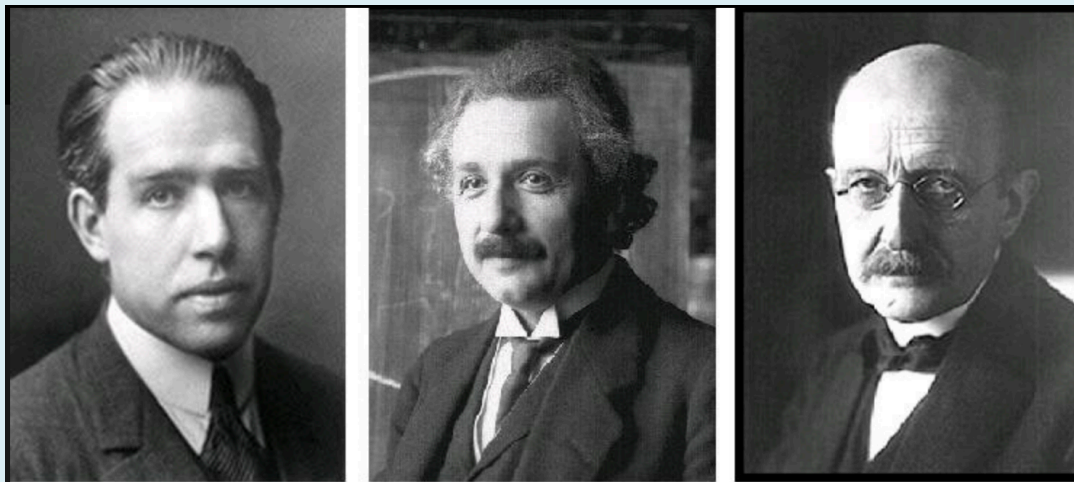
Niels, Albert et Max entrent dans un bar.

Il faut payer 10 \$ à l'entrée pour y voir un spectacle.

Albert a 100 \$, Max a 50 \$, et Niels a 20 \$.

Questions

1. Quel est l'analogue de l'énergie d'ionisation du métal?
2. Quel est l'analogue de l'énergie cinétique finale?
3. Qui serait le plus "bleu"?
4. Qui serait le plus "rouge"?

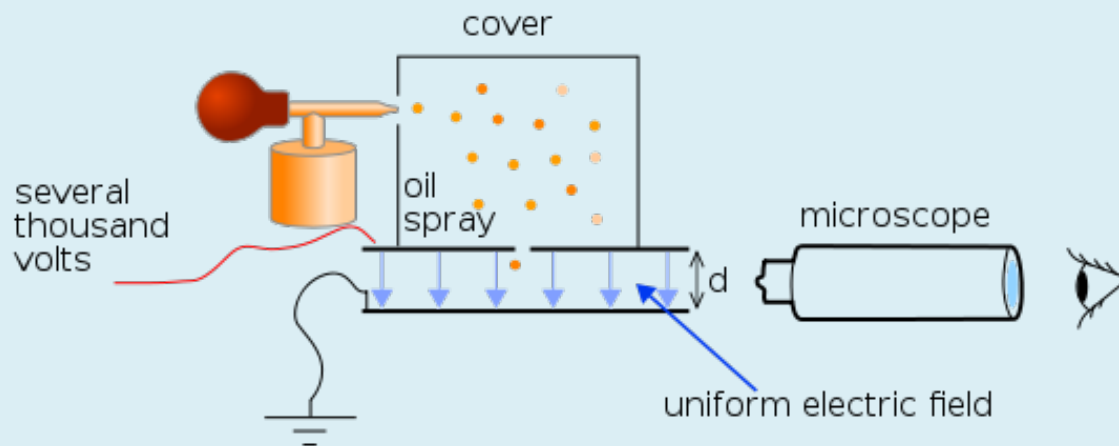


Robert Millikan (1868-1953)

Prix Nobel (1923)

Expérience de la goutte d'huile (1909)

Charge de l'électron, effet photoélectrique

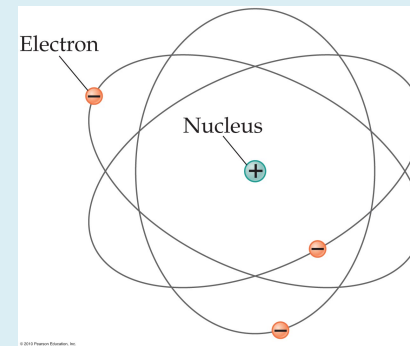
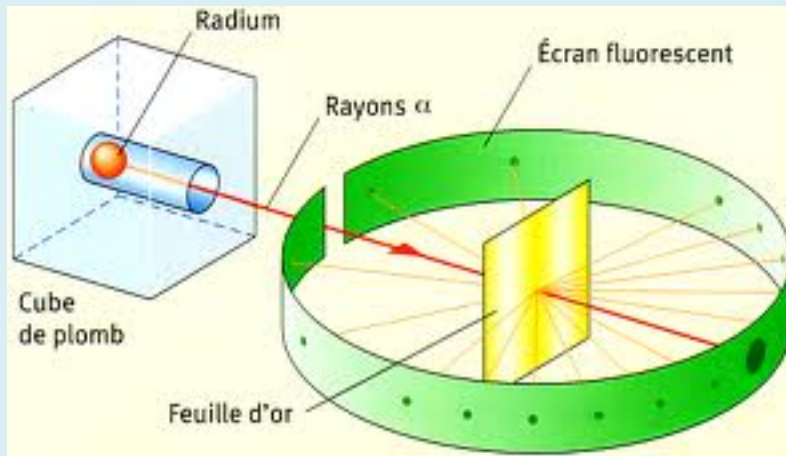
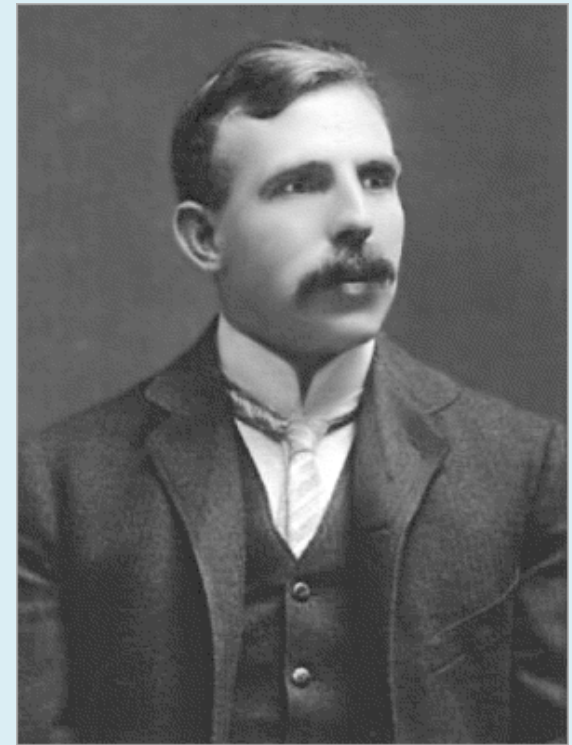


$$qE = mg \rightarrow \text{charge quantifiée: } q = nq_e$$

Depuis 2019 : $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ (exactement)

Ernest Rutherford (1871-1937)
Prix Nobel (1908)

Modèle nucléaire de l'atome (1911)
Rayons α , β (1903), radioactivité
et demi-vie

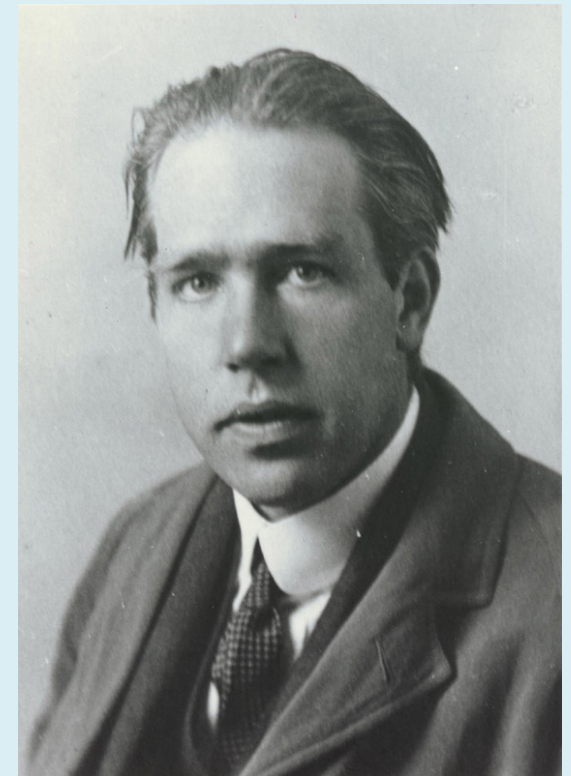
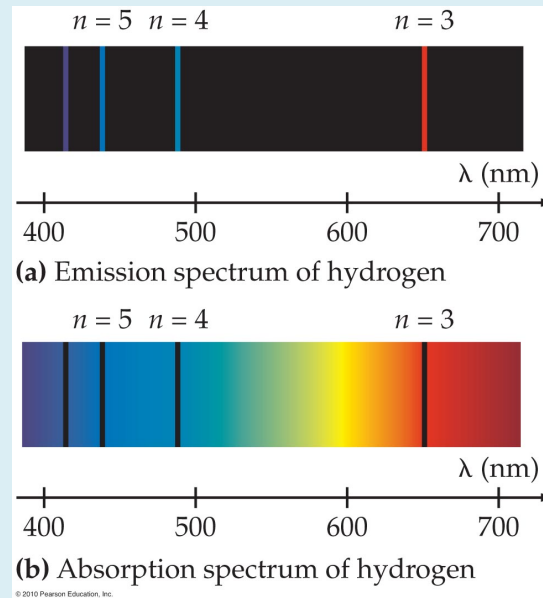
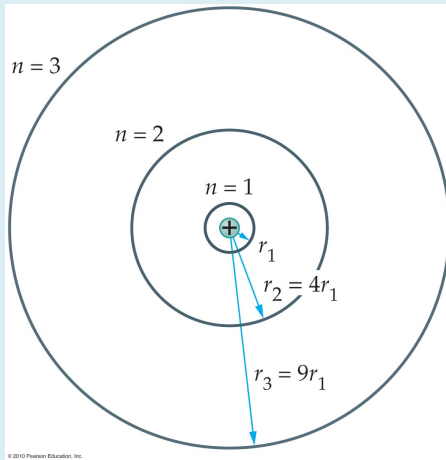


https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_en.html

Niels Bohr (1885-1962)

Prix Nobel (1922)

Modèle atomique quantifié (1913)



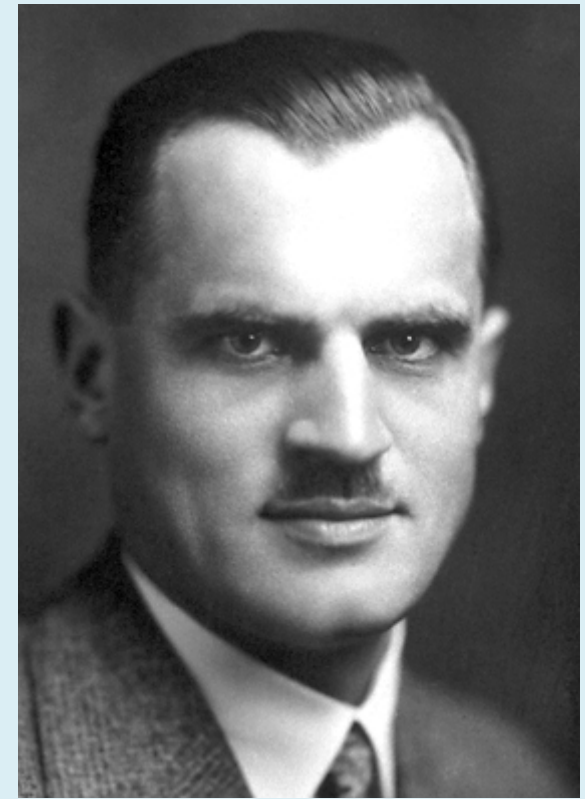
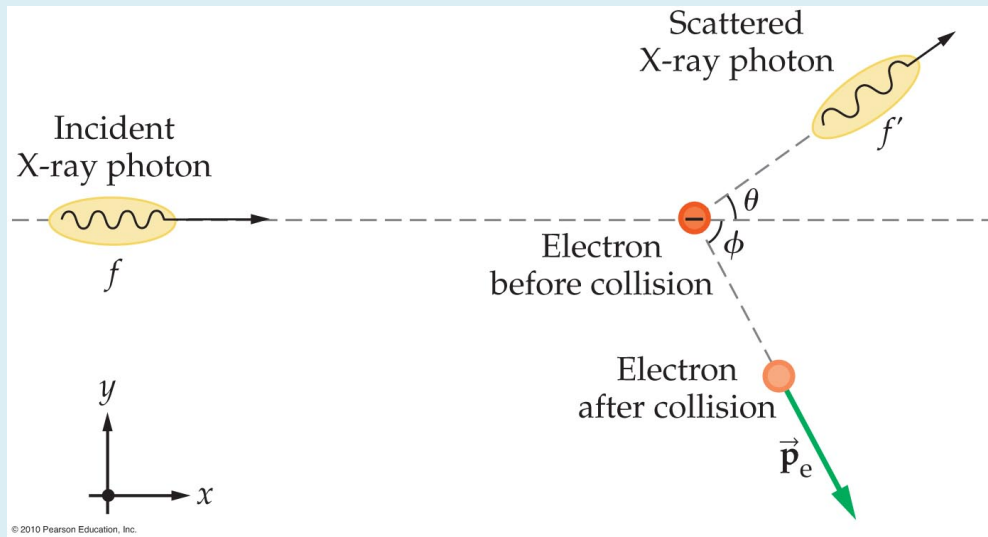
$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

https://www.walter-fendt.de/html5/phen/bohrmodel_en.htm

Arthur Compton (1892-1962)

Prix Nobel (1927)

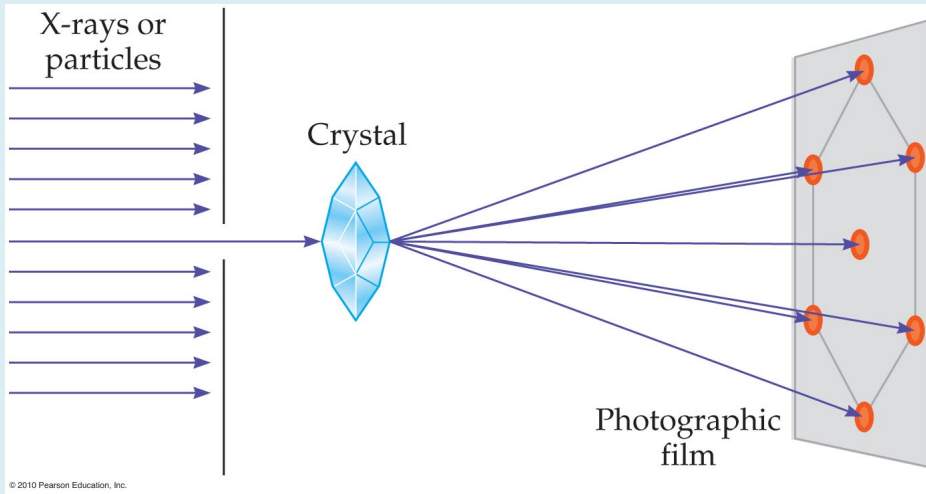
Effet Compton – diffusion de photons (1923)



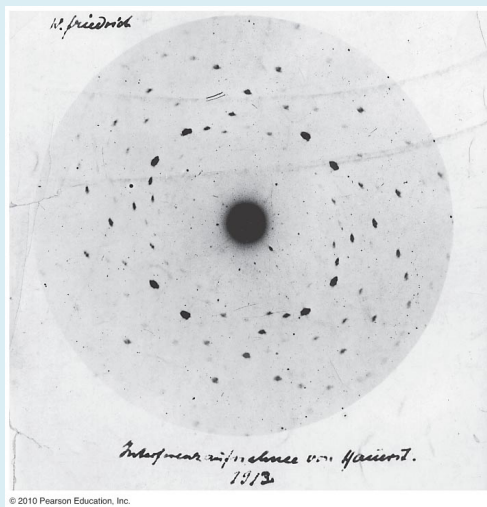
$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Commode d'utiliser hc/mc^2 , avec $hc = 1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$
et mc^2 en eV.

Louis de Broglie (1892-1987)
Prix Nobel (1929)
Ondes de matière (1924)



https://www.youtube.com/watch?v=stRrf4DB_3Y



$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Encore ici, hc/pc utile

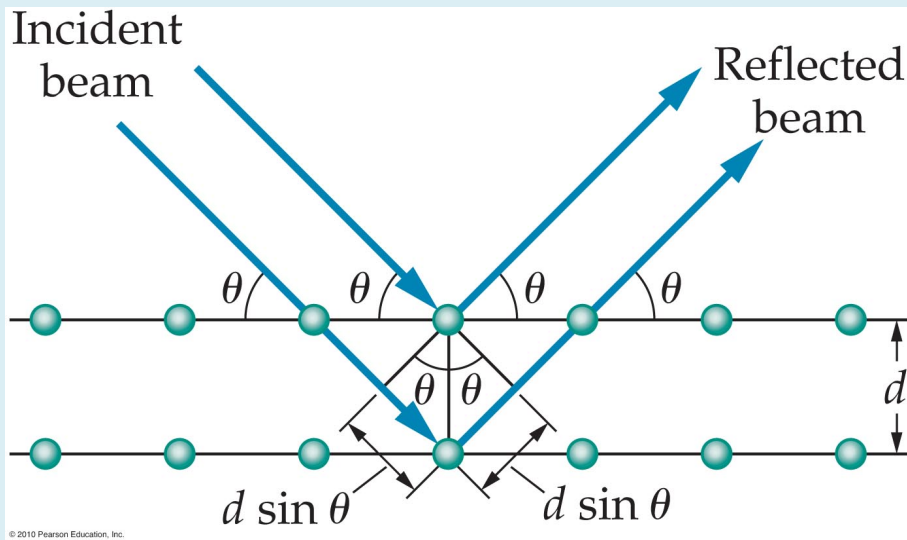


de Broglie

prononcé comme “oeil”

Famille d’aristocrates à laquelle appartenait le château de Chaumont-sur-Loire

George Paget Thomson (1892-1975)
Prix Nobel (1937)
Diffraction des électrons (années 1920)



$$2d \sin \theta = m\lambda$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Équation de Schrödinger – **PAS AU PROGRAMME!!!**

Énergie classique $E = \frac{1}{2}mv^2 + E_P = \frac{p^2}{2m} + E_P$

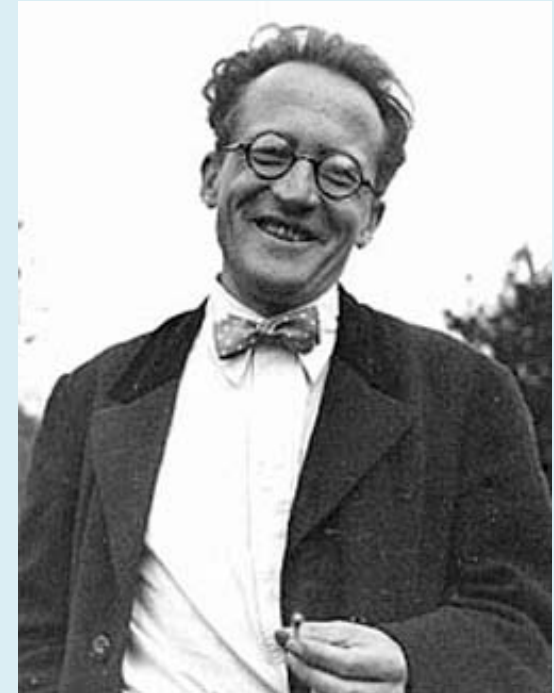
Opérateurs $E \rightarrow i\frac{\partial}{\partial t}$ $p \rightarrow -i\frac{\partial}{\partial x}$

Équation différentielle avec fonction d'onde Ψ

$$i\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{1}{2m}\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + E_P\Psi$$

Erwin Schrödinger (1887-1961)

Prix Nobel (1933)



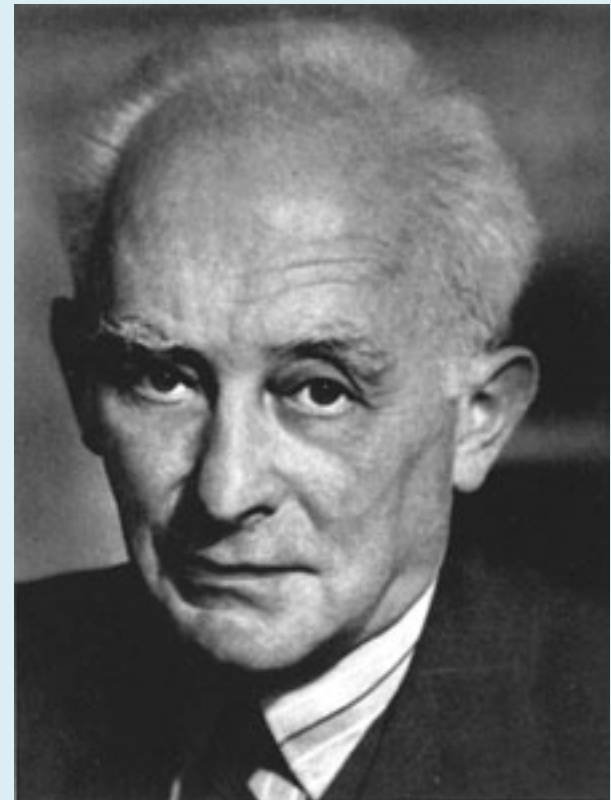
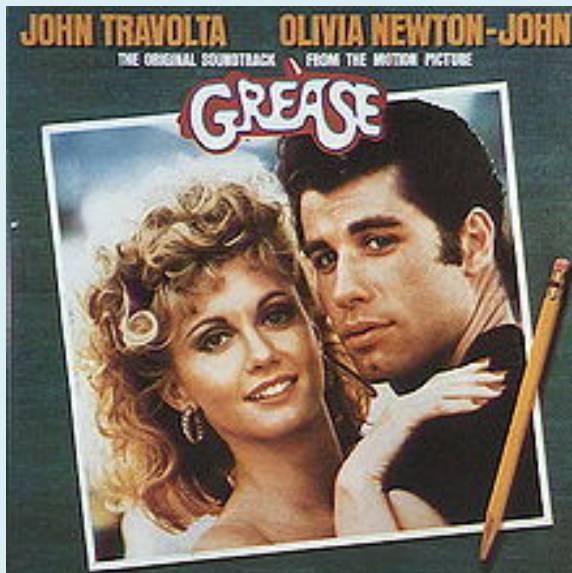
Max Born (1882-1970)

Prix Nobel (1954)

PAS AU PROGRAMME!!!

Ψ = onde de *probabilité* (1925)

$$P \propto |\Psi|^2$$



Werner Heisenberg (1901-1976)

Prix Nobel (1932)

Principe d'incertitude de Heisenberg

Il est impossible de déterminer exactement la position et la quantité de mouvement:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$$

Relié au *principe de complémentarité* car connaître p (et λ) \rightarrow onde sinusoïdale pure et connaître x \rightarrow corpuscule.

$$p = h/\lambda$$

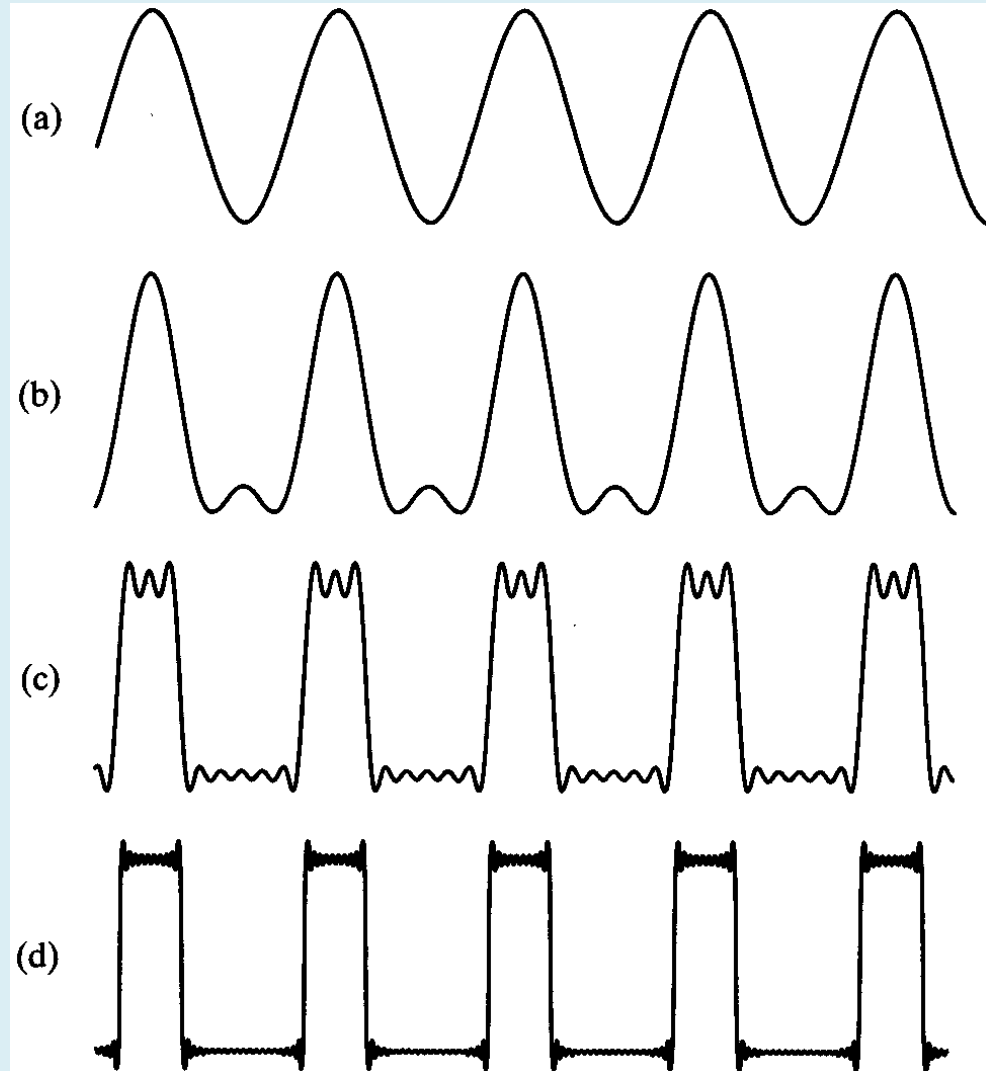
Pour voir un plus petit Δx , il faut de grands p et E .



Illustration d'une série de Fourier avec plusieurs fréquences

(a) fondamentale, (b) 3 fréq, (c) 8 fréq, (d) 30 fréq

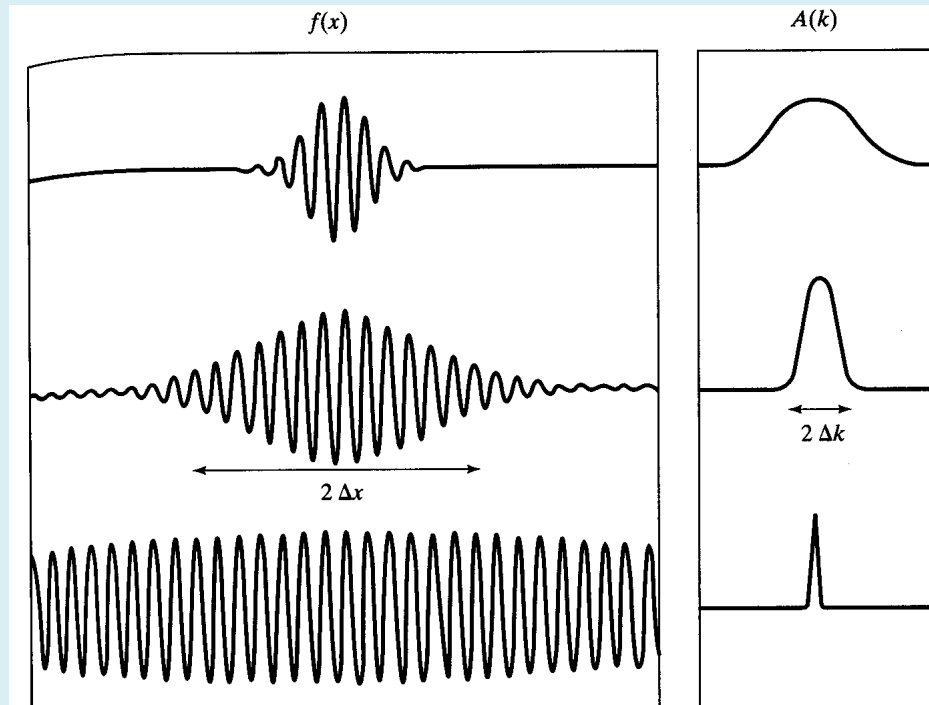
$$f(x) = \sum_n A_n \sin\left(\frac{n\pi x}{\lambda}\right)$$



Intégrales de Fourier

Cas discret \rightarrow cas continu: $\sum_n \rightarrow \int dk, \quad A_n \rightarrow A(k)$

Un paquet large dans l'espace x est étroit dans l'espace k , et vice versa; vers le principe d'incertitude...

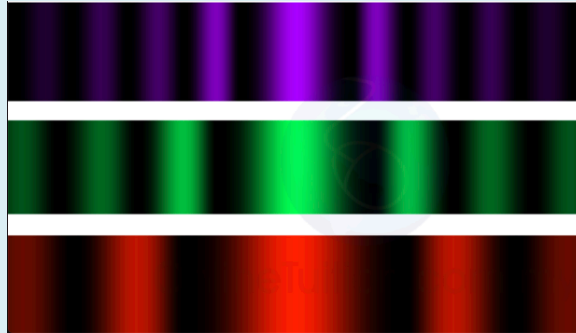


$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$ implique que si on veut une plus grande résolution (c.-à-d. Δx petit), il faut de grands Δp_x et p , d'où les accélérateurs à haute énergie.

Analogie à un microscope dont λ est semblable à la taille des objets observés. Exemple: diffraction par une ouverture et lumière vs. son.

Exemple:

$\lambda \propto$ angle de diffraction



Selon $p = h/\lambda$ de petits objets impliquent de grands p .

La mécanique quantique fonctionne à merveille. Questions philosophiques et d'interprétations: effondrement de la fonction d'onde et mesure, mondes multiples d'Everett, variables cachées de Bohm, etc.

Plusieurs physiciens l'utilisent sans se soucier de ces questions, un peu comme les téléphones...

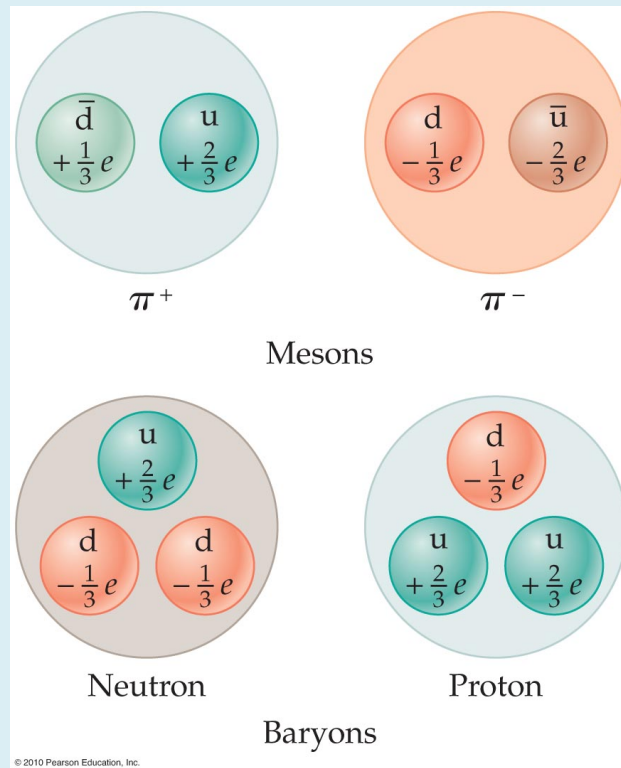


Peut-être aussi sommes nous biaisés (ex. concept de symétrie, charge élémentaire magnétique, etc.)

Murray Gell-Mann (1929-2019)
Prix Nobel (1969)

Modèle des quarks (1964)

George Zweig (1937) propose les quarks



Modèle standard de la physique des particules (1967)

Prix Nobel (1979)

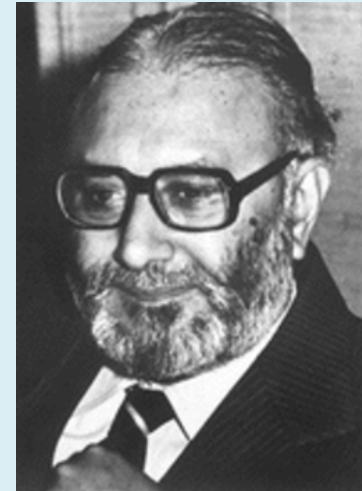
Steven Weinberg
(1933-2021)



Sheldon Glashow
(1932)



Abdus Salam
(1926-1996)



“Particules élémentaires” = champs quantiques

Voir <https://particleadventure.org/>

Modèle standard – fermions et bosons

Fermions (spin = entier + 1/2), fondamentaux = **quarks & leptons** (“matière”)

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom
	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

Hadrons

TABLE 32–9 Quark Composition of Some Hadrons

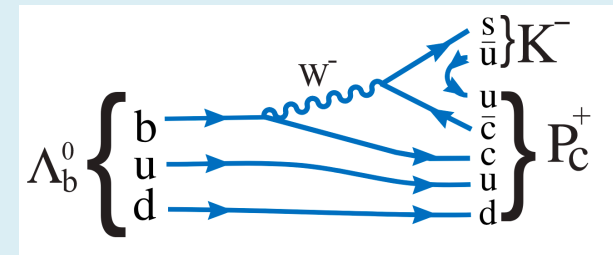
Particle	Quark Composition
MESONS	
π^+	$u\bar{d}$
π^-	$\bar{u}d$
K^+	$u\bar{s}$
K^-	$\bar{u}s$
K^0	$d\bar{s}$
BARYONS	
p	uud
n	udd
Σ^+	uus
Σ^0	uds
Σ^-	dds
Ξ^0	uss
Ξ^-	dss
Ω^-	sss

© 2010 Pearson Education, Inc.

Mésos : états liés à une paire quark-antiquark




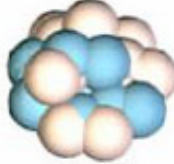

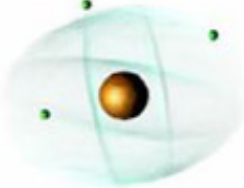


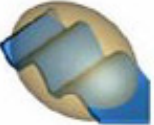
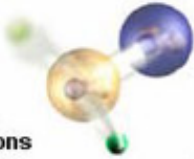
Baryons : états liés à trois quarks (ou plus)

Pentaquarks : états liés à quatre quarks et un antiquark observés au LHCb en 2015:



Bosons (spin = entier), fondamentaux (interaction dans la matière)

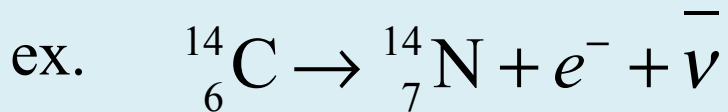
Forces

Strong	Electromagnetic
<p>Gluons (8)</p>  <p>Quarks</p>  <p>Mesons Baryons</p>  <p>Nucléi</p> 	<p>Photon</p>  <p>Atoms Light Chemistry Electronics</p> 
Gravitational	Weak
<p>Graviton ?</p>  <p>Solar system Galaxies Black holes</p> 	<p>Bosons (W,Z)</p>  <p>Neutron decay Beta radioactivity Neutrino Interactions Burning of the sun</p> 

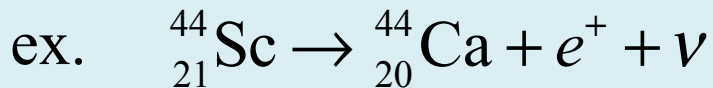
The particle drawings are simple artistic representations

Interaction = échange d'un boson
 “diagrammes de Feynman” \approx blocs lego

Désintégration β^- : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$



Désintégration β^+ : $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

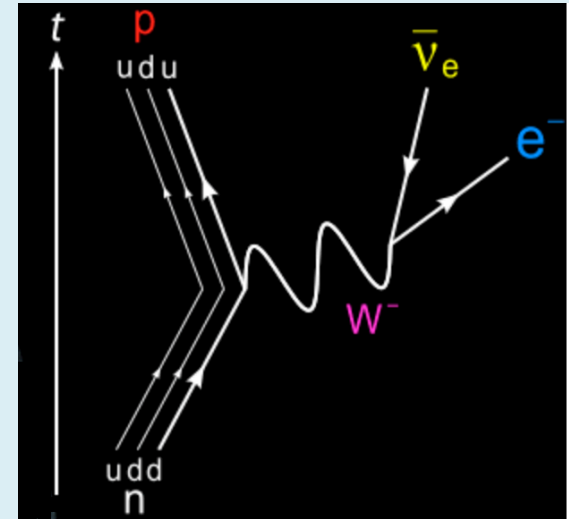


Conservation de la charge électrique et du
 “nombre leptonique” :

$L_e = +1$ pour e^- et ν ,

$L_e = -1$ pour e^+ et anti- ν ou

$L_e = 0$ pour les autres.



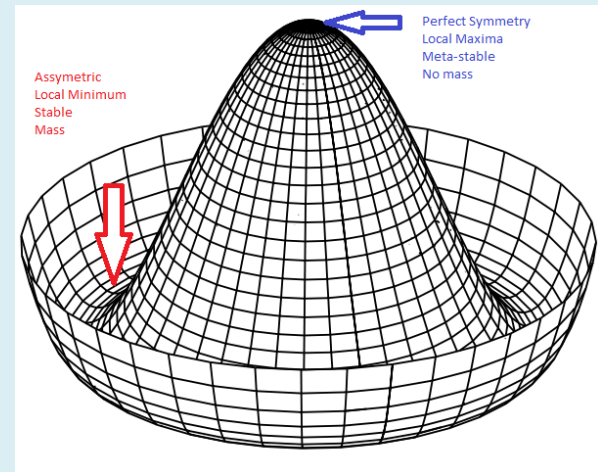
Dernier ingrédient du modèle standard découvert en décembre 2011

Boson de Higgs = source des masses

Annonce le 4 juillet 2012

Masse de $126 \text{ GeV}/c^2$
(environ $2.2 \times 10^{-25} \text{ kg}$)

Proposé dans les années 1960 par
Kibble, Brout, Englert*, Higgs*,
Guralnick, Hagen
* Prix Nobel 2013



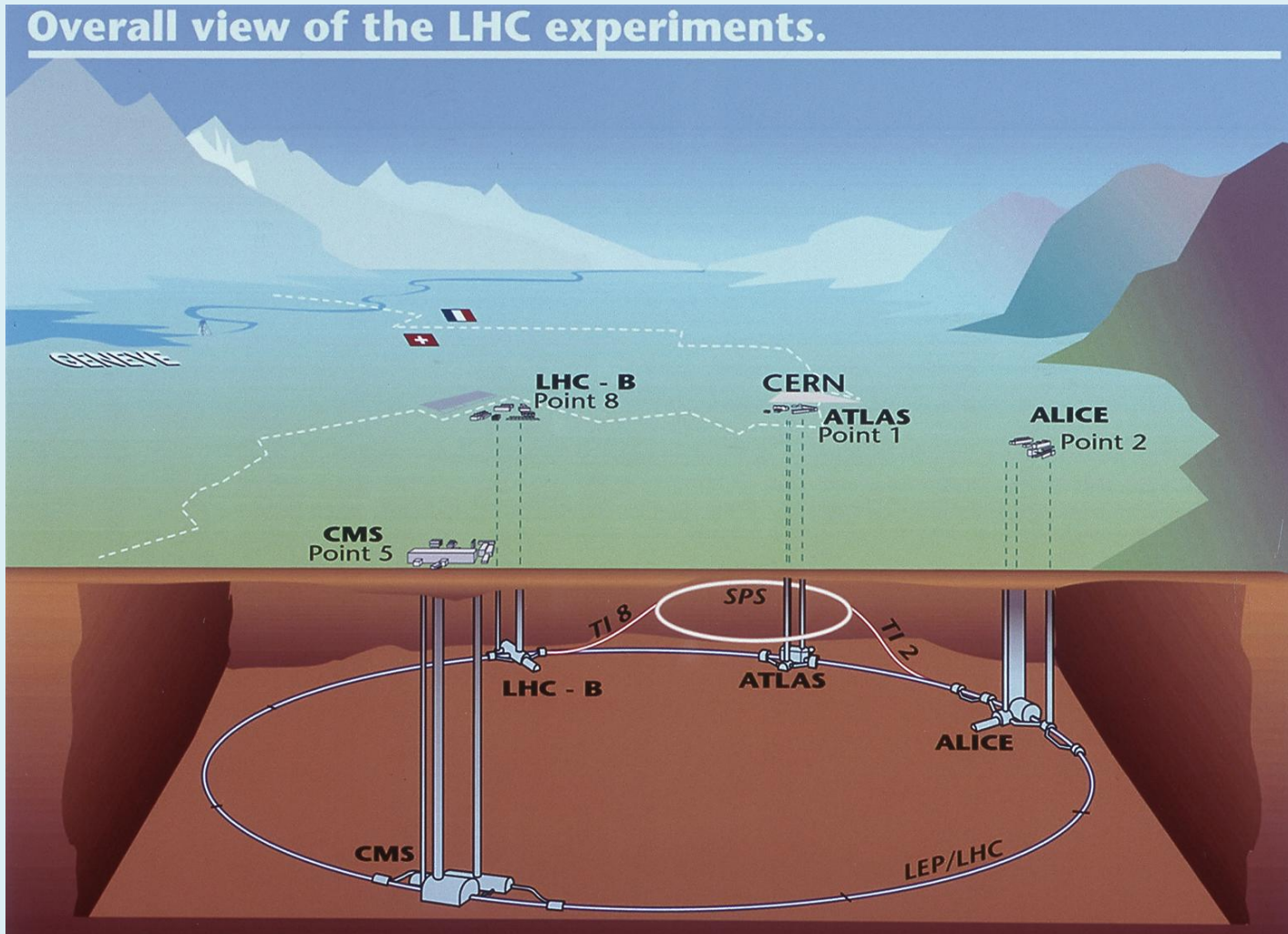
<https://home.cern/news/news/physics/cern-congratulates-englert-and-higgs-nobel-physics>

Large Hadron Collider = Grand collisionneur de hadrons

- Plus grande machine jamais construite
- Ensemble de synchrotrons
- Coût approx. 10 G\$
- 10000 employé.es
- Proton 99.999999% de c
- 6000 tonnes d'aimants
- Aimants à 1.9 K ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Démarrage et accident en septembre 2008
- Redémarrage en novembre 2009
- Boson de Higgs découvert en 2012
- Longues périodes d'arrêt et mise au point
- Run 3 entre juillet 2022 à 2026

Circonférence 27 km

Tunnel à 100 m sous le sol



http://www.atlas.ch/photos/atlas_photos/selected-photos/detector-site/surface/9906026-A4-at-144-dpi.jpg

MoEDAL – leadership albertain!
Responsable : James Pinfold

Pour découvrir les monopôles magnétiques
et autres particules exotiques

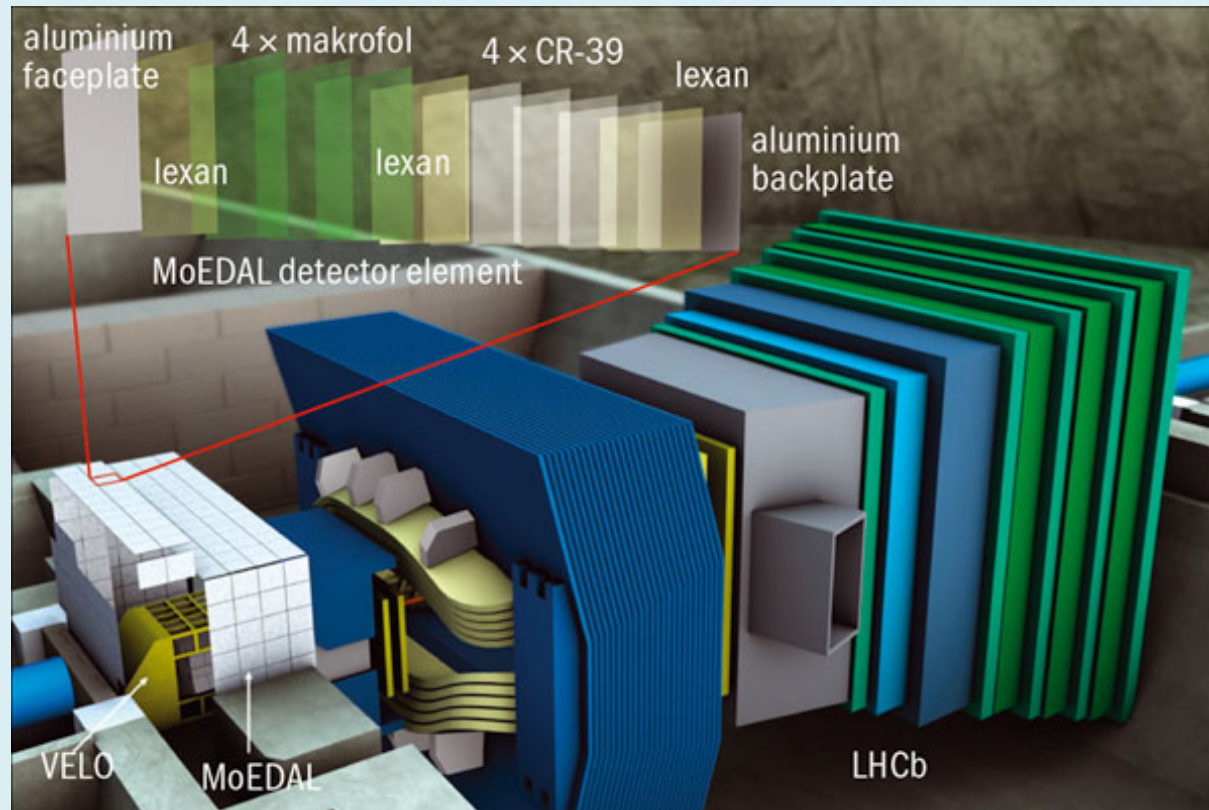


LHC b
Quark b

<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>

MoEDAL: Entourer le détecteur LHCb pour quelques 100 000 \$.
Nuclear Track Detectors ajoutés à LHCb.

But: monopôles magnétiques, dyons, ou particules massives stables



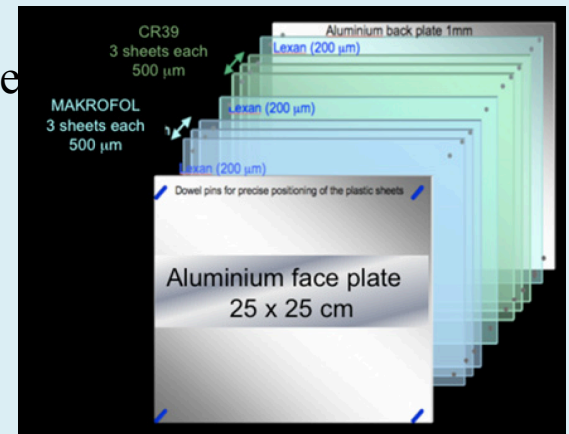
https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.moedal

MoEDAL contient trois composantes: (1) *nuclear track detectors* (NTD) en plastique, (2) piège de monopôle (*magnetic monopole trapper* MMT), et (3) TimePix, et une future composante: MoEDAL Apparatus for Penetrating Particles (MAPP)

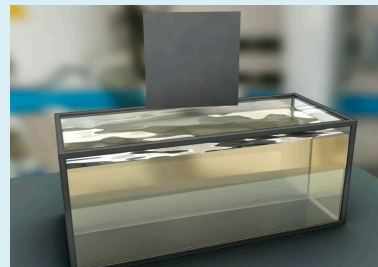
(1) “DéTECTEURS de trace nucléaire” (NTD) : environ 300 piles de feuilles de plastiques (CR39, Makrofol).

Le passage d’une particule grandement ionisante laisse une marque qui est révélée par une dislocation en forme de cône quand les feuilles sont plongées dans une solution puis balayées par un scanner optique.

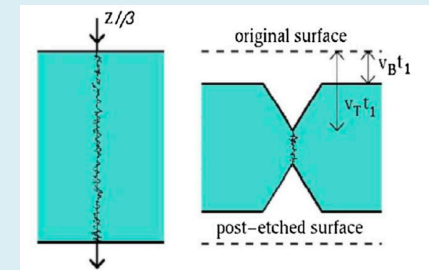
DéTECTEUR passif, sans électronique, ni trigger, etc.



Pinfold, Trento Conf (2010)



Pinfold, EPJ Web Conf (2017)



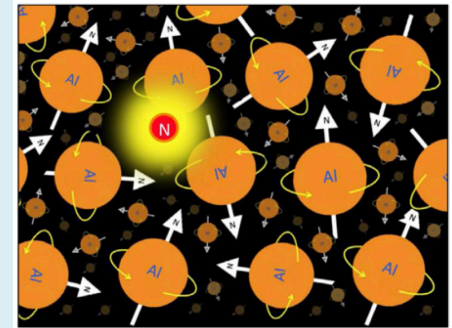
(2) MMT: 1 tonne de volumes paramagnétique d'aluminium placés à trois endroits. Al a un grand moment magnétique nucléaire.

Une fraction des particules massives grandement ionisantes sera captée par le MMT (figure de droite)

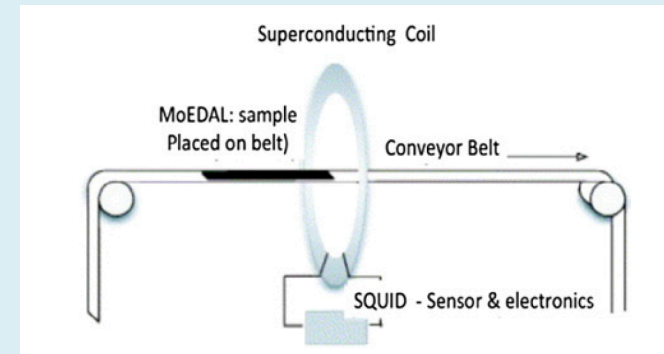
Volumes testés par des SQUIDs (Superconducting QUantum Interference Device), magnétomètres sensibles à des champs magnétiques extrêmement faibles.

Échantillon expédié À SNOLAB pour analyser la désintégration de particules électriquement chargées à longue vie (plus de 10^7 s)

Détecteur passif.



Pinfold, EPJ Web Conf (2017)



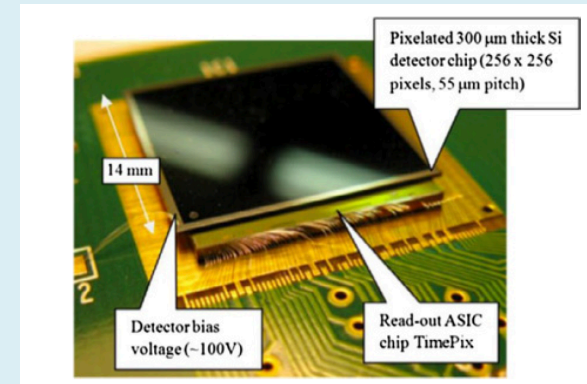
(3) TimePix: système de contrôle de radiation

Rangée de six détecteurs à pixel TimePix 2 pour surveiller le fond du faisceau grandement ionisant à basse énergie.

Offre une mesure de l'énergie de la radiation.

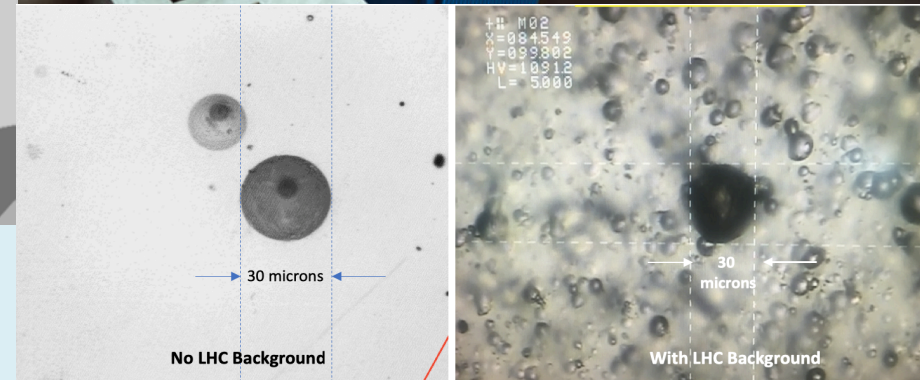
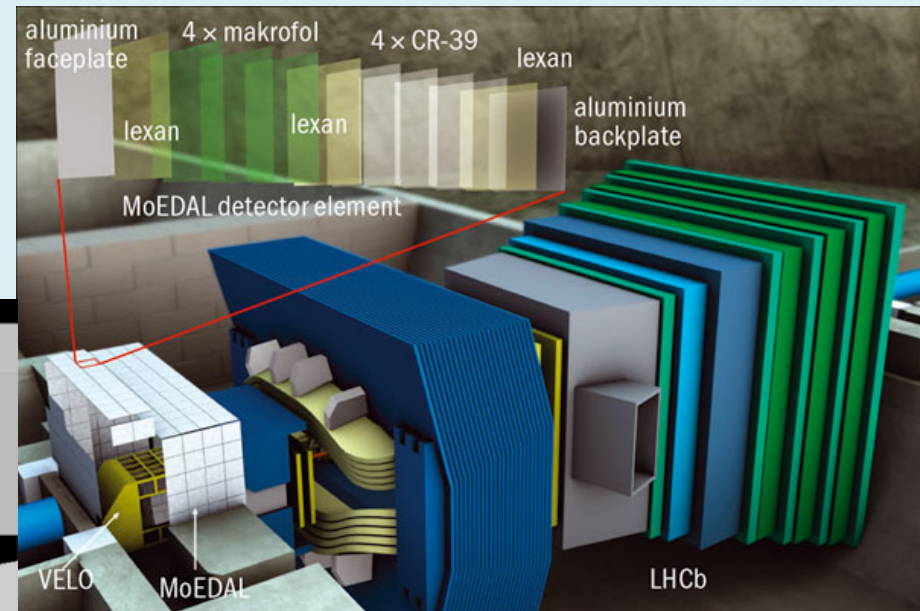
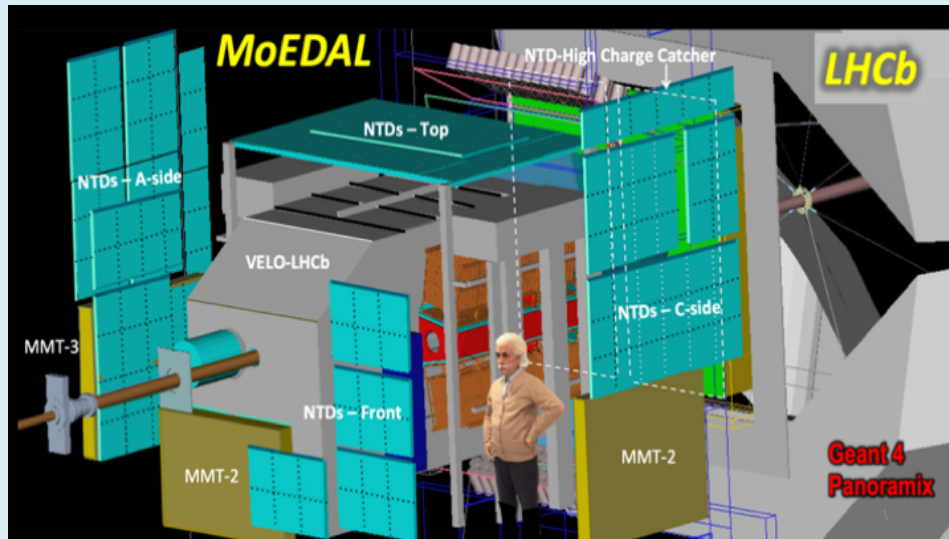
Ce détecteur peut fournir une image en couleurs d'événements de spallation complète dans un volume de 300 microns d'épaisseur, avec l'énergie représentée par la couleur.

Les résultats du détecteur TimePix disponibles via le web.



Pinfold, EPJ Web Conf (2017)

Déploiement de MoEDAL au LHCb





<http://discovermagazine.com/2018/dec/a-magnetic-quest>

MoEDAL Apparatus for Penetrating Particles (MAPP)

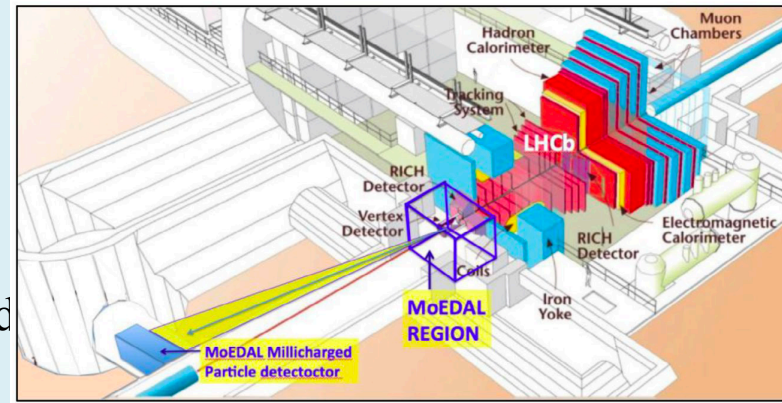
Détecter des particules de charge $q < e$, dites “mini-chargées”.

Placé dans un tunnel masqué par 30 à 50 m de rocher et de ciment, de façon à filtrer le rayonnement de fond par des processus du modèle standard.

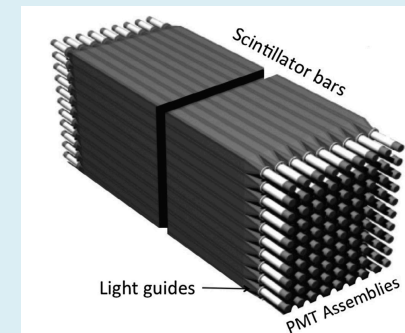
Détecteur mobile, donc l’angle est variable.

Détecteurs semblables à Stanford et au CMS/CERN.

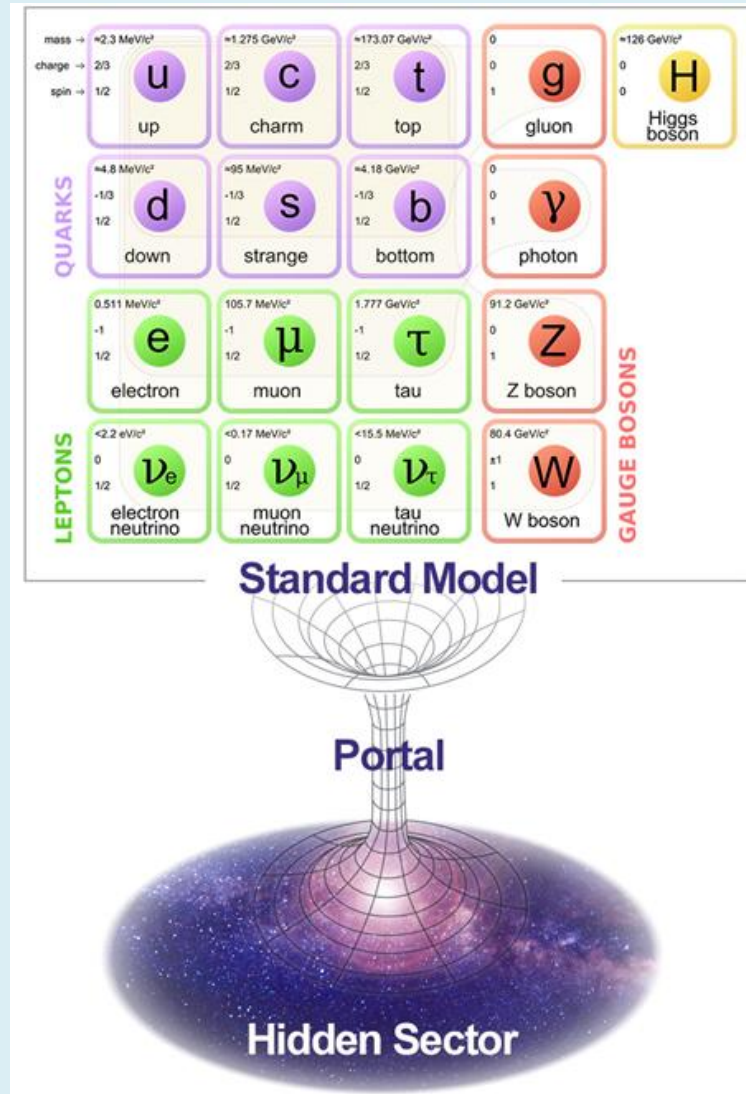
Assemblage de tiges de matériau scintillateur de tubes photomultiplicateurs (PMT).



Fairbairn, Pinfold, Cont Phys (2016)

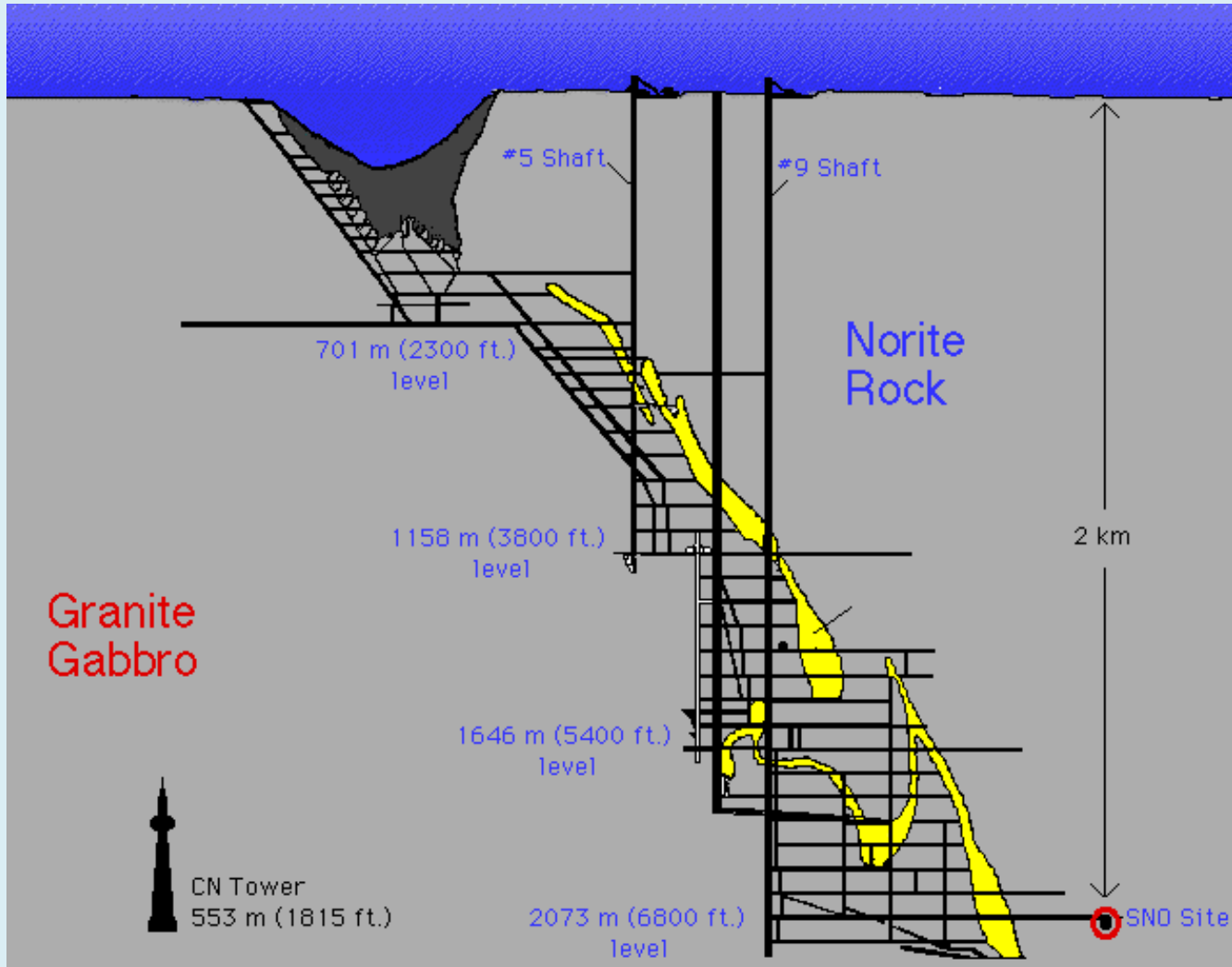


Un objectif: interaction entre le modèle standard et la matière sombre



<https://www.ge.com/news/reports/theoretical-physicists-suggest-theres-portal-linking-standard-model-dark-physics>

SNOLAB (Sudbury, Ontario)

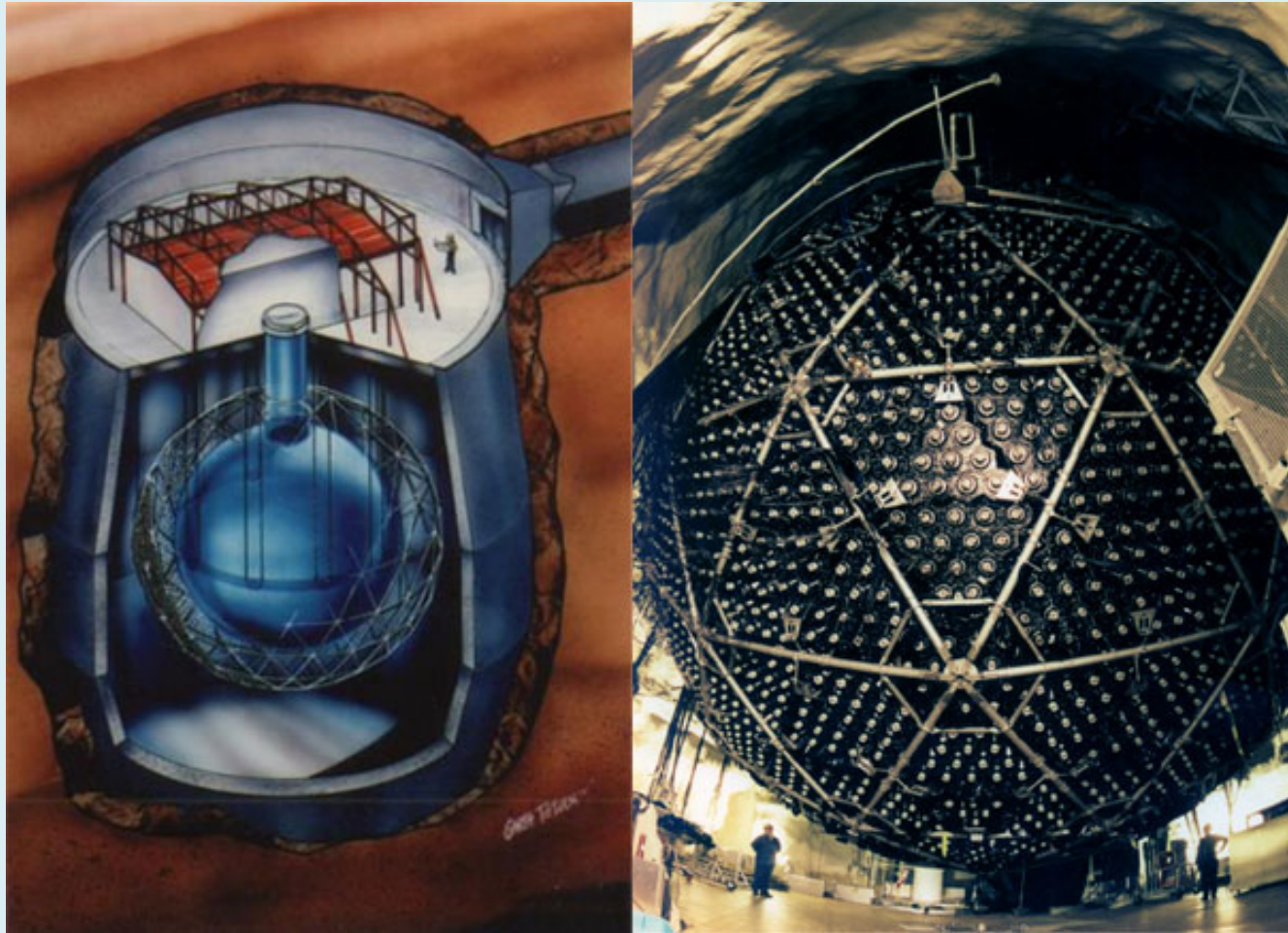


<https://www.snolab.ca/science>

SNOLAB



SNOLAB (diamètre 12 m)



<http://www.cool-science.ca/article/1945>