Une expérience de physique des particules comment ça marche ?

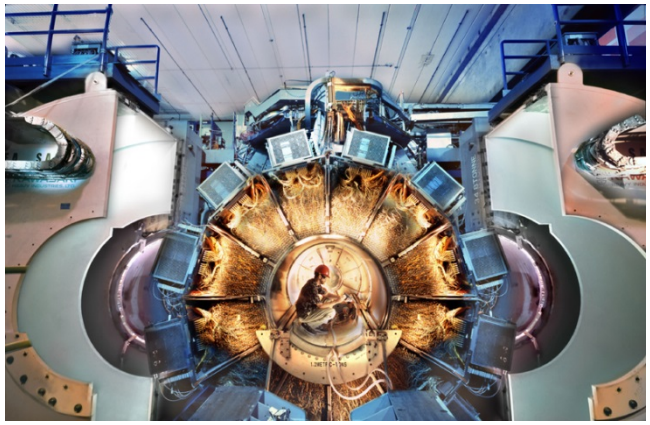
11 mai 2017

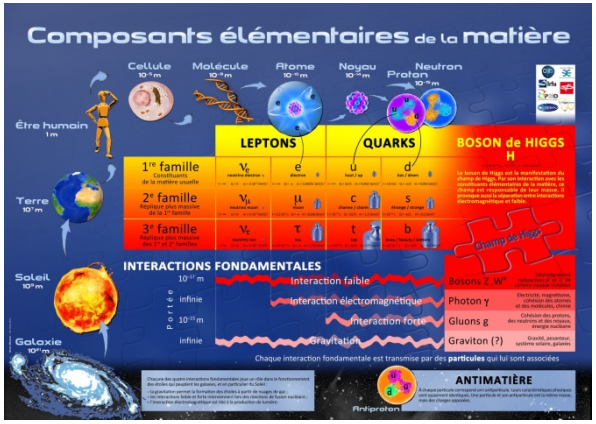
Stage Cosmos à l'Ecole – CPPM

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)

European Gravitational Observatory (Consortium CNRS & INFN)





EGO EUROPEAN GRAVITATIONAL OBSERVATORY

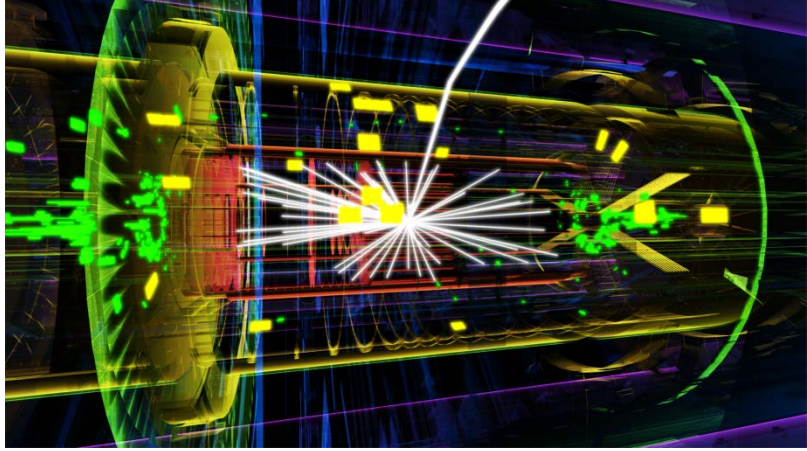
cnrs

LAL LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE

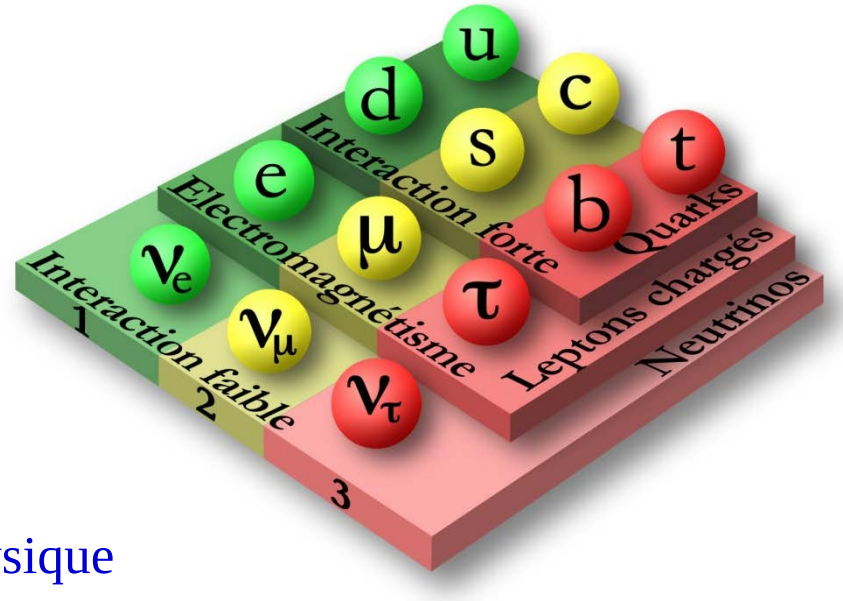
UNIVERSITÉ PARIS SUD

université PARIS-SACLAY

Plan



- Introduction
- Accélérateurs
  - Accélérateurs linéaires
  - Collisionneurs
  - Le SLAC et le CERN : deux complexes accélérateurs
- Détecteurs
  - Généralités
  - Expériences sur cible fixe & spectromètres
    → A Beamline for schools
    → Projet SHIP
  - Détecteurs sur collisionneurs
    → LHC
- Une expérience vue de l'intérieur
  - De la prise des données aux analyses de physique
- Et pour les neutrinos ?
- Conclusions



Introduction

Des particules à étudier

- Comment obtenir les particules que l'on veut étudier ?
  - Sources naturelles : radioactivité, rayonnement cosmique
  - Sources artificielles : complexes accélérateurs
    → Expériences sur cible fixe ou sur collisionneur

  Centrales nucléaires
  → Neutrinos

- Particule stable / instable … du point de vue de l'expérimentateur
  - Effets relativistes à prendre en compte
  - Accélérateurs / détecteurs

  → Electron, muon, pion, kaon, proton, photon, [neutrino]

- Particule de matière (disponible) / d'antimatière (à fabriquer)

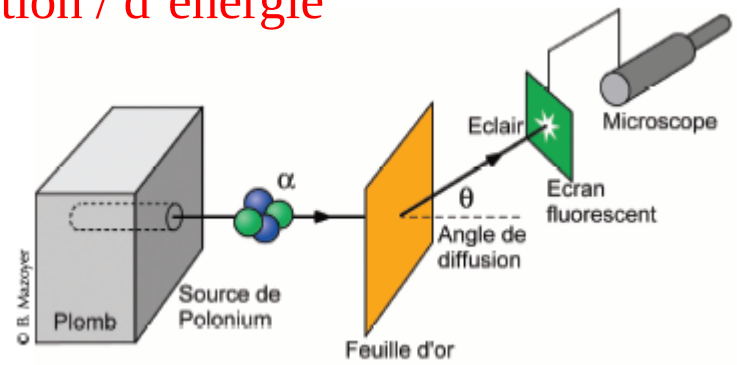
  → Coût, rendement, qualité du faisceau produit

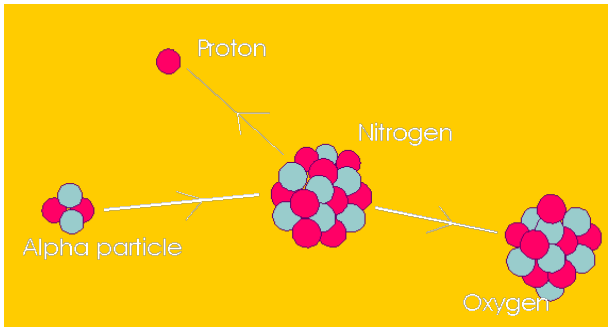
- Trois grands types d'expériences
  - Production directe de nouvelles particules
    → « Frontière en énergie »
  - Recherche de processus « interdits » ou très rares
  - Étude d'effets indirects liés à la présence de particules « virtuelles »
    → Mécanique quantique

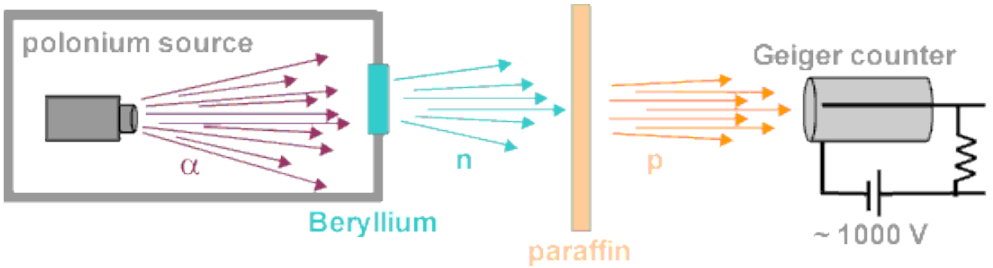
  } « Frontière » en intensité

Radioactivité naturelle

- Radioactivité = émission spontanée de radiation / d'énergie
  - Becquerel : 1896
  - Curie : 1898
- Découverte du noyau : 1909-1911
  - Rutherford, Geiger, Mardsen
- Découverte du proton : 1918
  - Rutherford
- Découverte du neutron : 1932
  - Chadwick
- Radioactivité artificielle : 1934
  - Joliot-Curie

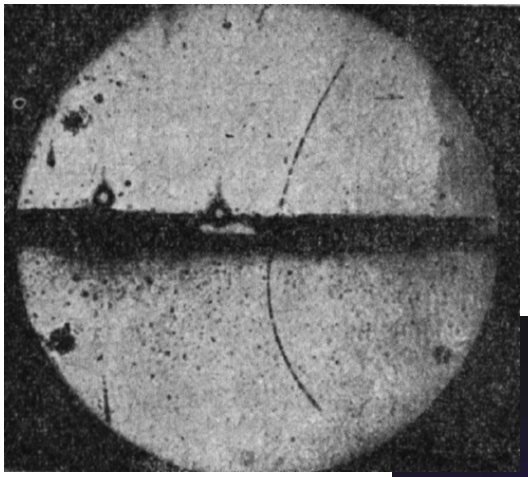






Rayonnement cosmique

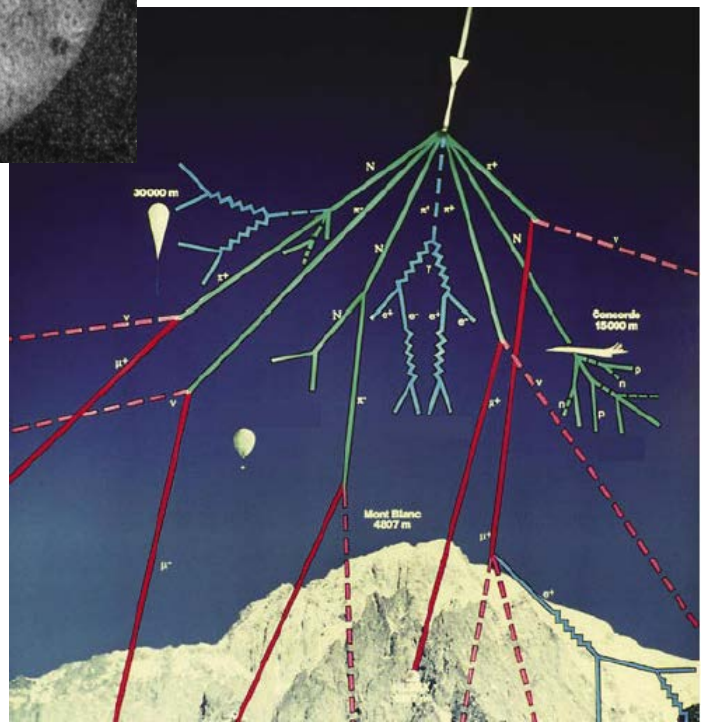
- Particules chargées en provenance du cosmos qui interagissent avec l'atmosphère



- Découverte « officielle » : 1912
  - Hess

- Découverte du positron : 1932
  - Anderson

- Découverte du muon : 1936
  - Anderson et Nedermeyer



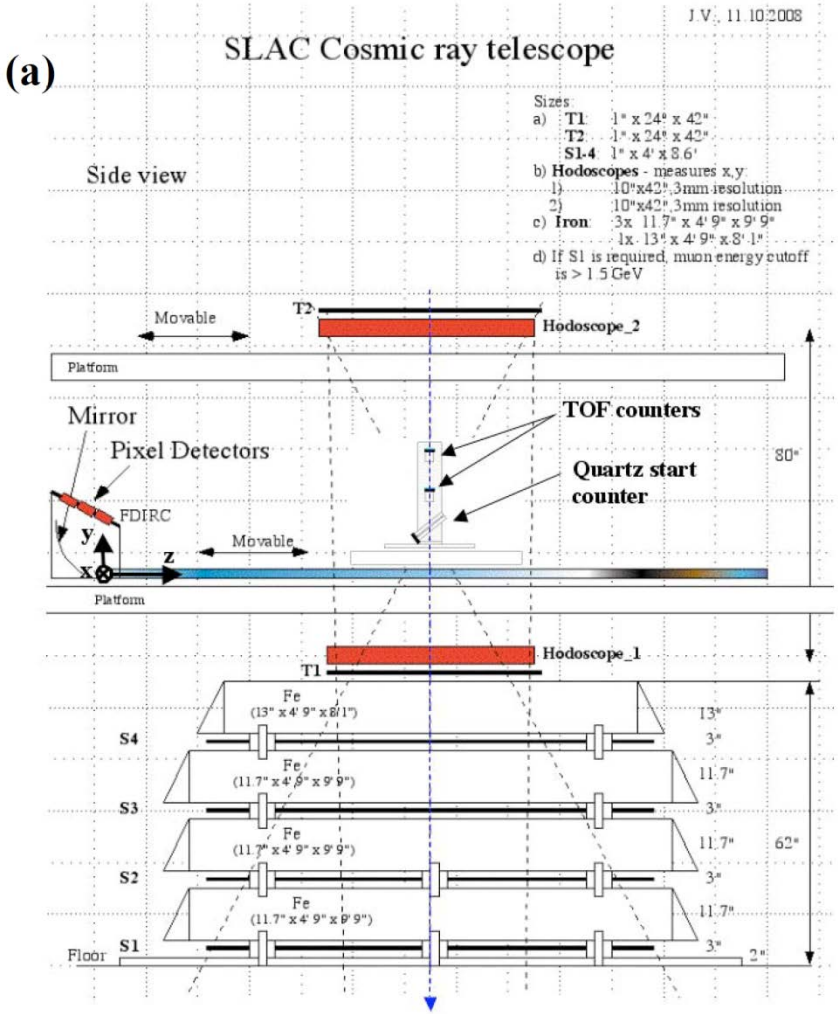
- Découverte des particules étranges : 1948-1950

(…)

- Aujourd'hui
  - Etude des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie
  - Tests et calibration de détecteurs
  - Détecteurs pédagogiques de muons cosmiques

Exemple de télescope à muons

- On en utilise (toujours) aujourd'hui en physique des particules



- Il y en a certainement dans des labos IN2P3

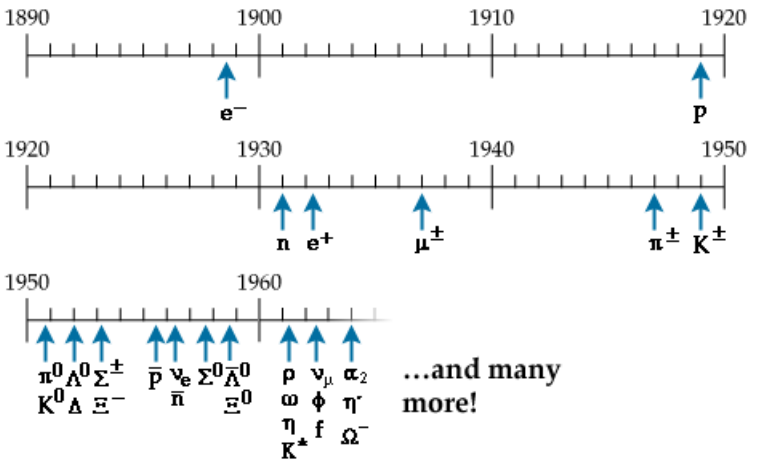
Expériences sur cible fixe

- Faisceau de particules projeté sur une cible
  - Etude des particules secondaires produites par la collision faisceau → cible

- Découverte de l'antiproton : 1955
  - Segré et Chamberlain
  - Découverte de l'antineutron l'année suivante

  → Production d'antimatière

- « Zoo de particules » dans les années 1950-1960



- Structure du proton en terme de quarks : 1968
  - Friedman, Kendall, Taylor

- Co-découverte du quark charmé : 1974
  - Ting (Brookhaven)

- Seule une fraction de l'énergie disponible peut être convertie en masse (particules)
  - Le reste part en énergie cinétique des produits de la collision

Collisionneurs

- Annihilations matière – antimatière
  - Electron – positron : ACO (Orsay), SLAC, LEP, KEK (Japon), DAFNE (Italie), etc.
  - Proton – antiproton : TeVatron (Fermilab)

  → Production suffisante d'antimatière ?
    - LHC : proton – proton
  - Electron – proton : HERA (Allemagne)
- 100% de la masse-énergie de l'annihilation disponible pour l'état final
- Anneau de stockage
  - Particules – antiparticules : champ magnétique unique
- Anneau AdA (Frascati, Italie) alimenté par l'accélérateur linéaire du LAL : 1963
- Co-découverte du quark charmé : 1974 à SLAC (Richter)
- Découverte du lepton tau : 1976 à SLAC
- Découverte du quark bottom (1977) et du quark top (1995) à Fermilab
- Médiateurs de l'interaction faible : 1983 au CERN
- Boson de Higgs : 2012 au CERN

Accélérateurs

L'électron-volt et ses multiples

L'électron-volt

L'électron-volt (noté eV) est l'énergie acquise par une particule de charge élémentaire soumise à une différence de potentiel de 1 volt. C'est une unité très petite (1 eV = 1,6 10^{-19} Joule) mais dont les multiples sont bien adaptés à l'infiniment petit.

1 000 eV : 1 kiloélectron-volt (symbole keV)
1 000 keV : 1 mégaélectron-volt (MeV)
1 000 MeV : 1 gigaélectron-volt (GeV)
1 000 GeV : 1 téraélectron-volt (TeV)

CNRS-IN2P3 / Bruno Mazoyer - LAL Orsay

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires (α, β, γ)	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

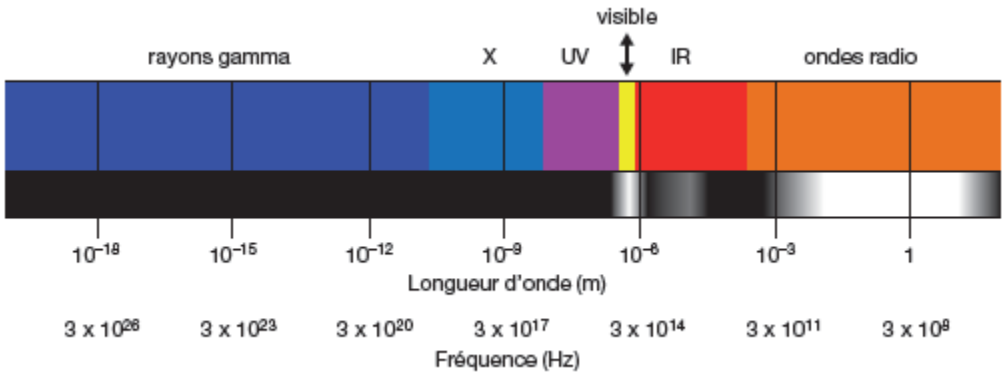
© ***Sébastien Descotes-Genon***

Unités naturelles: Cte de Planck $\hbar =$ vitesse de la lumière $c = 1$:

$$\Longrightarrow 1 \text{ eV} = 1/(0.2\ \mu m) = 10^{-36} kg = 1/(0.7\ fs)$$

Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie
  → Exemple des ondes électromagnétiques : énergie $\propto$ 1 / (longueur d'onde)



- La plupart des particules sont instables $\Rightarrow$ elles n'existent pas dans la Nature
  → Il faut les produire artificiellement
  → En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité
  → Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée
  → Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

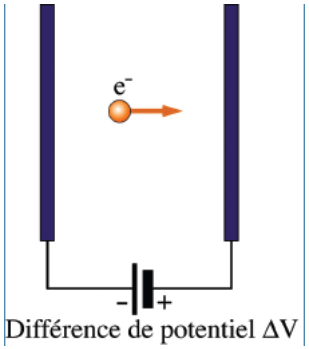
- Moyens :
  - la force électromagnétique
  - la relativité restreinte

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}\right)$$

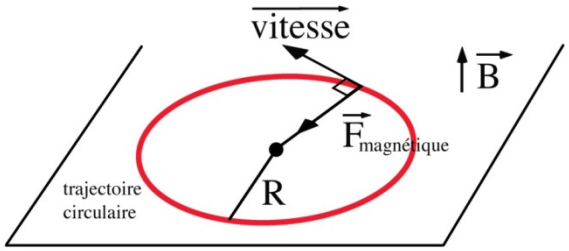
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

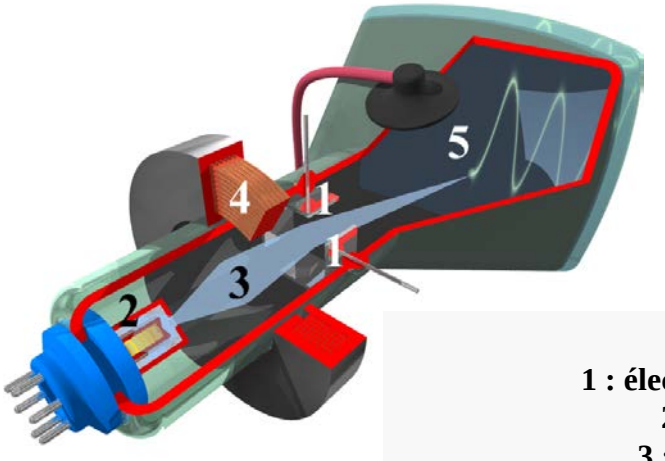
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



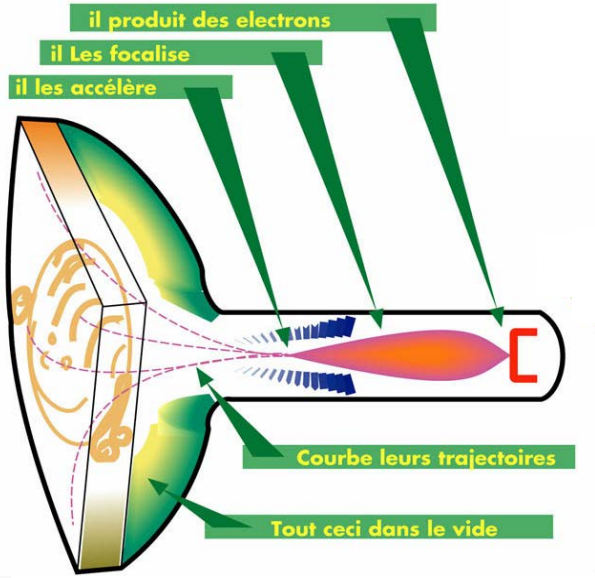
- On les pilote avec des champs magnétiques



→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

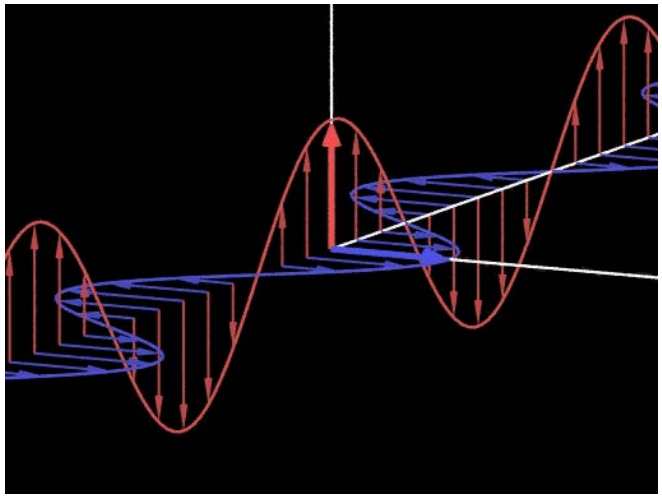


Tube d'oscilloscope
1 : électrodes déviant le faisceau
2 : canon à électrons
3 : faisceaux d'électrons
4 : bobine pour faire converger le faisceau
5 : face intérieur de l'écran recouverte de phosphore

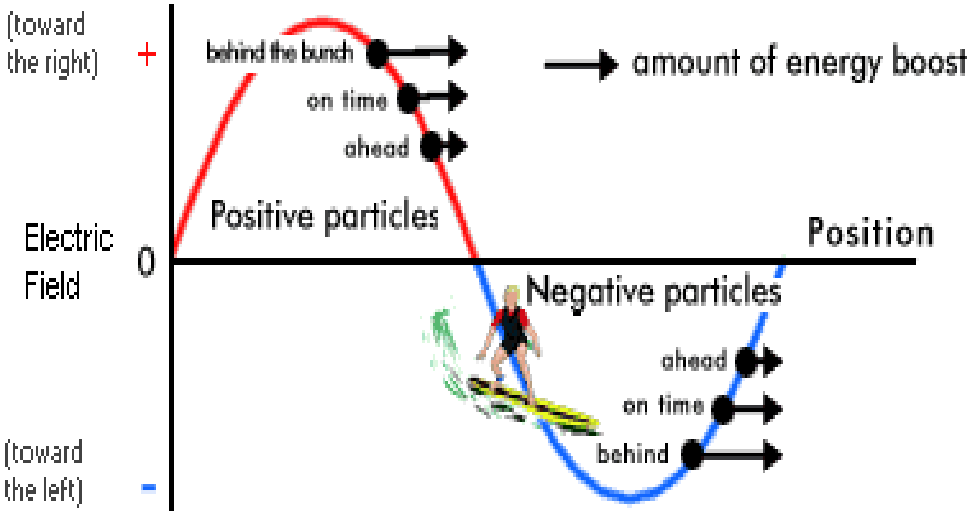


Accélération de particules chargées

- Les particules « surfent » sur une onde électromagnétique de très haute fréquence (~400 MHz)

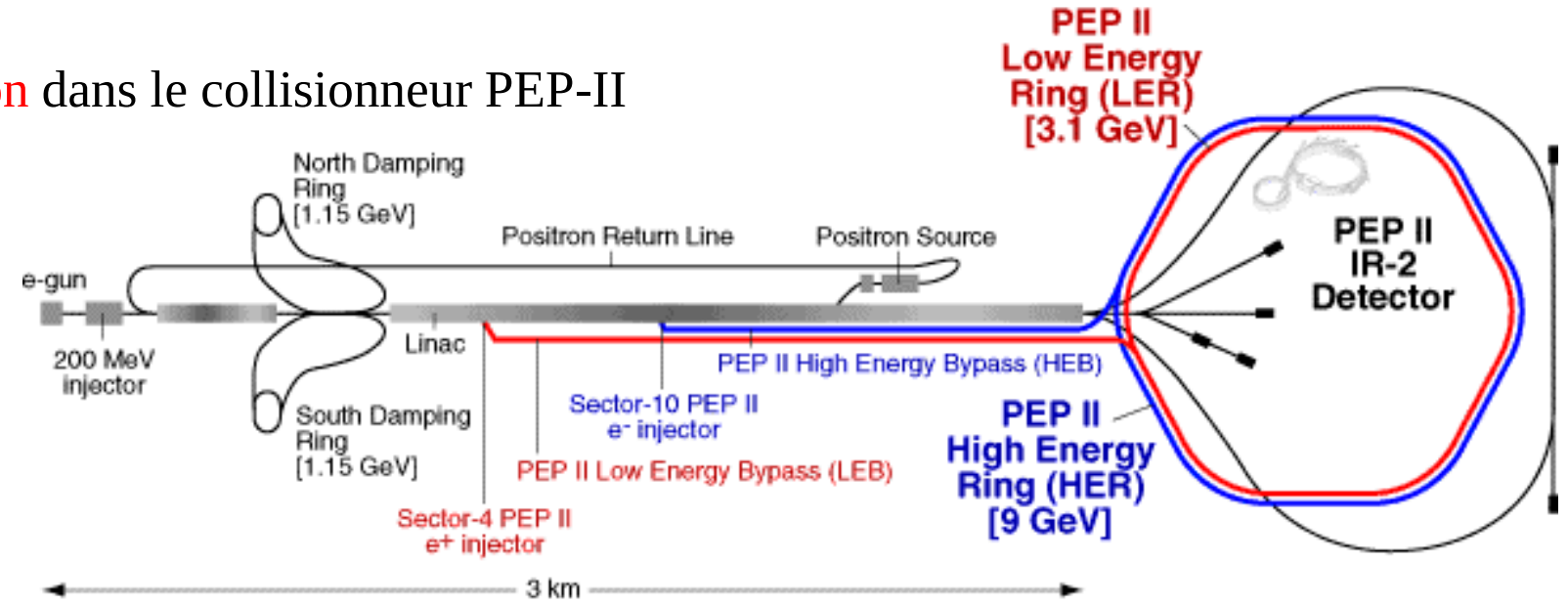


L'accélérateur linéaire de SLAC (Californie) : 2 miles (3,2 km) de long



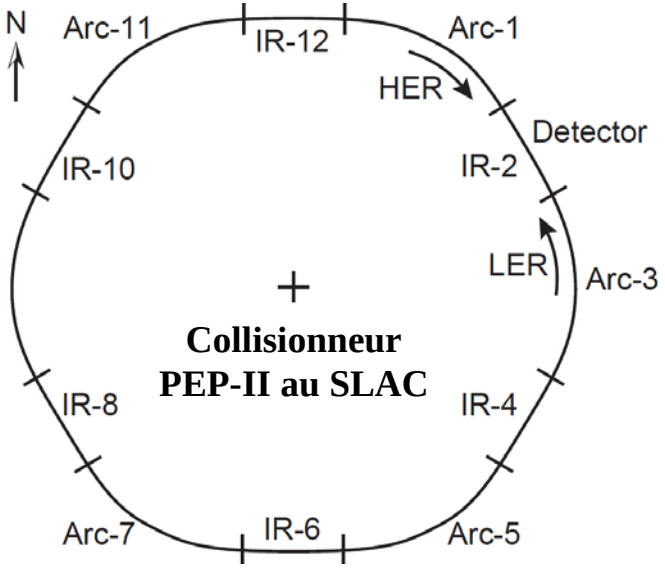
Un exemple d'accélérateur linéaire (SLAC)

- Electrons produits par chauffage d'une cathode
- Positrons produits par collision d'un faisceau d'électrons de 20 GeV sur une cible fixe
- Mise en paquets des deux faisceaux, injection dans le LINAC, puis mise en forme dans des « anneaux d'amortissement »
- Accélération par onde électromagnétique très haute fréquence
  - Les particules quittent le LINAC une fois leur énergie nominale atteinte
- Injection dans le collisionneur PEP-II

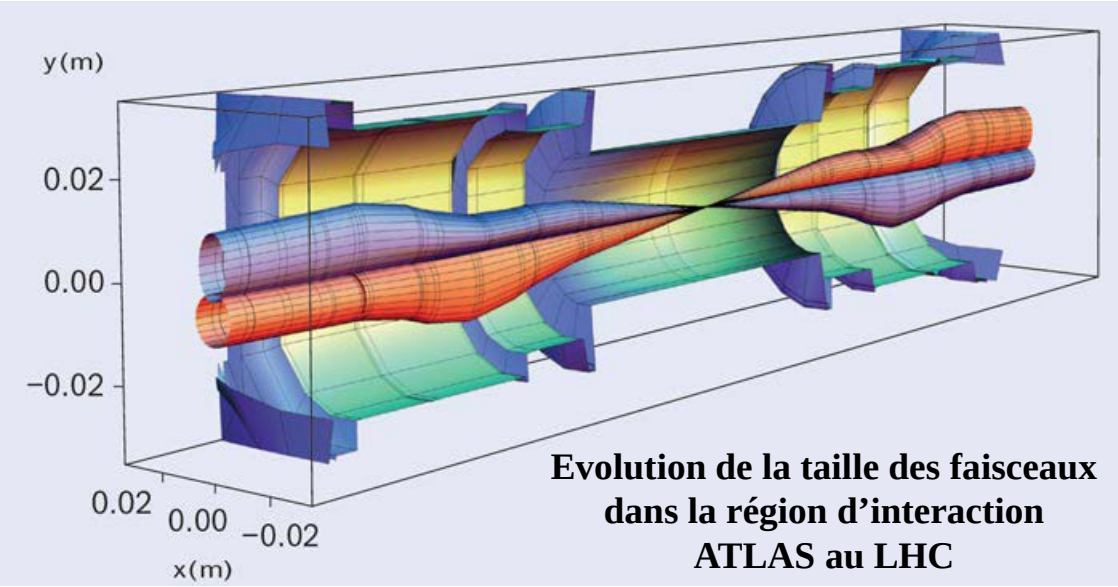


Pilotage des particules chargées

- Dipoles pour courber les trajectoires des particules
  - Maintien sur une orbite (quasi-)circulaire
    → Alternance de sections droites (accélération) et d'arcs de cercle (lumière synchrotron

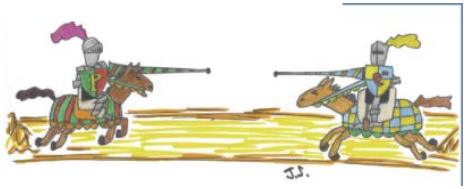


- Actions sur la forme du faisceau :
  - Quadrupoles, sextupoles, etc.
    → Taille transverse (minimale au point de collision)



Evolution de la taille des faisceaux dans la région d'interaction ATLAS au LHC

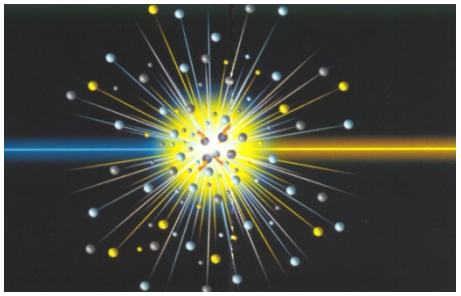
- Taille transverse du faisceau
  $\sigma^2 \propto \varepsilon \times \beta$
  - Emittance ε
    → « Qualité du faisceau »
  - Fonction d'amplitude β
    → Configuration des aimants

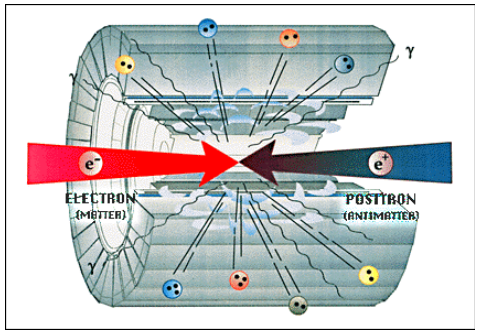


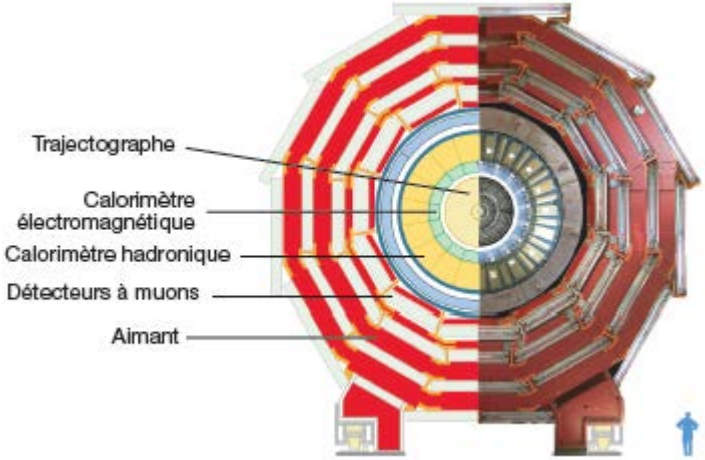
Les collisionneurs

- Collision de particules accélérées → « Grain » d'énergie → Nouvelles particules

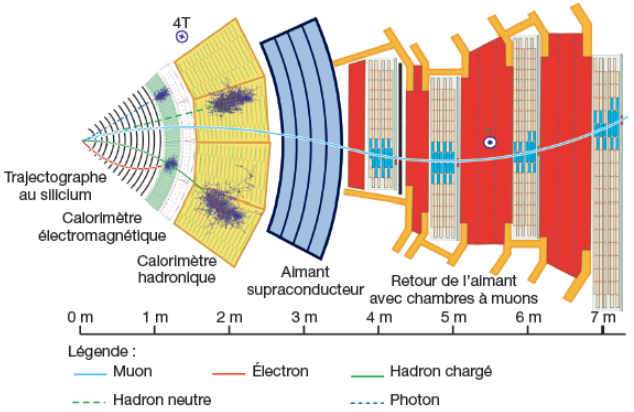
Accélérateur — $E = mc^2$ — Détecteur







- Accélération dans des sections droites
- Collisions dans des anneaux circulaires
  - → Taille de la machine « réduite »
  - → Particules produisent des collisions à chaque tour
  - → Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible

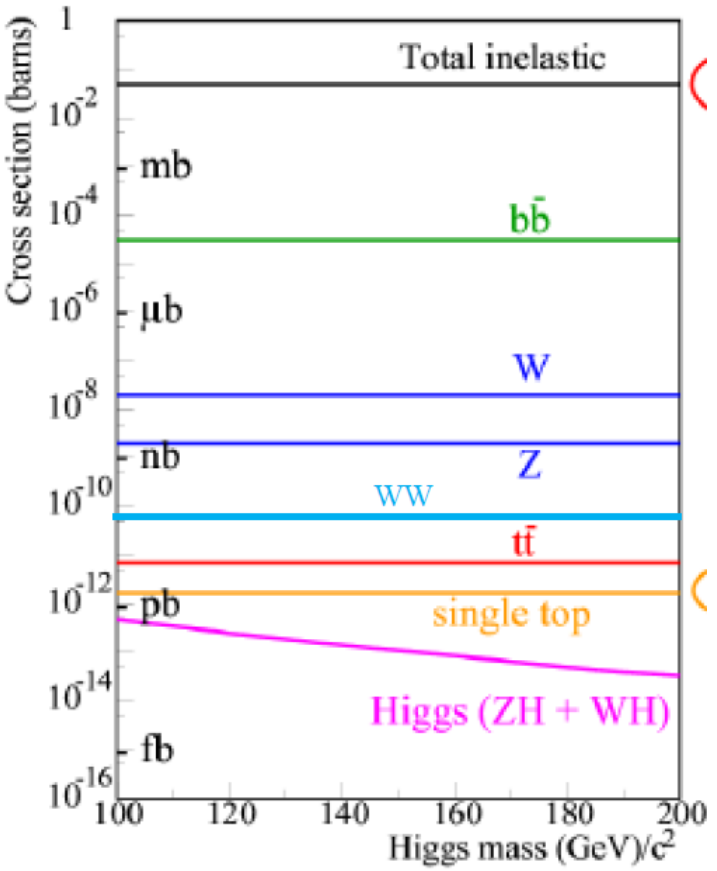


- Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
  - → Taille de la zone de collision : ~ cm (plutôt moins)
  - → Taille de l'accélérateur : ~ km (plutôt plus)

Intermède gourmand …

Sections efficaces et luminosité

- Formule fondamentale : $R = \sigma \mathcal{L}$
  - R : taux d'occurrence d'une réaction [Hz]
  - σ : section efficace du phénomène [cm^2]
  - $\mathcal{L}$: luminosité [$cm^{-2}s^{-1}$]
    → Caractéristique fondamentale de l'accélérateur
- Unité plus « usuelle » : le barn (b)
  - 1 barn = 10^{-28} m^2 = 10^{-24} cm^2
  - mb, μb, nb, pb, fb
- On exprime la luminosité en $cm^{-2}s^{-1}$ mais la luminosité intégrée en « {m,μ,n,p,f}b inverse »
  - Prise de données : ~ 10^7 s / an
  - Attention : plus le préfixe est « petit », plus la luminosité intégrée est élevée : 1 fb^{-1} = 1000 pb^{-1}
- Expression simplifiée de la luminosité
  - f : fréquence de croisement
  - n_1 et n_2 : nombres de particules par paquet
  - $\sigma_x\sigma_y$: taille transverse des paquets – profil gaussien

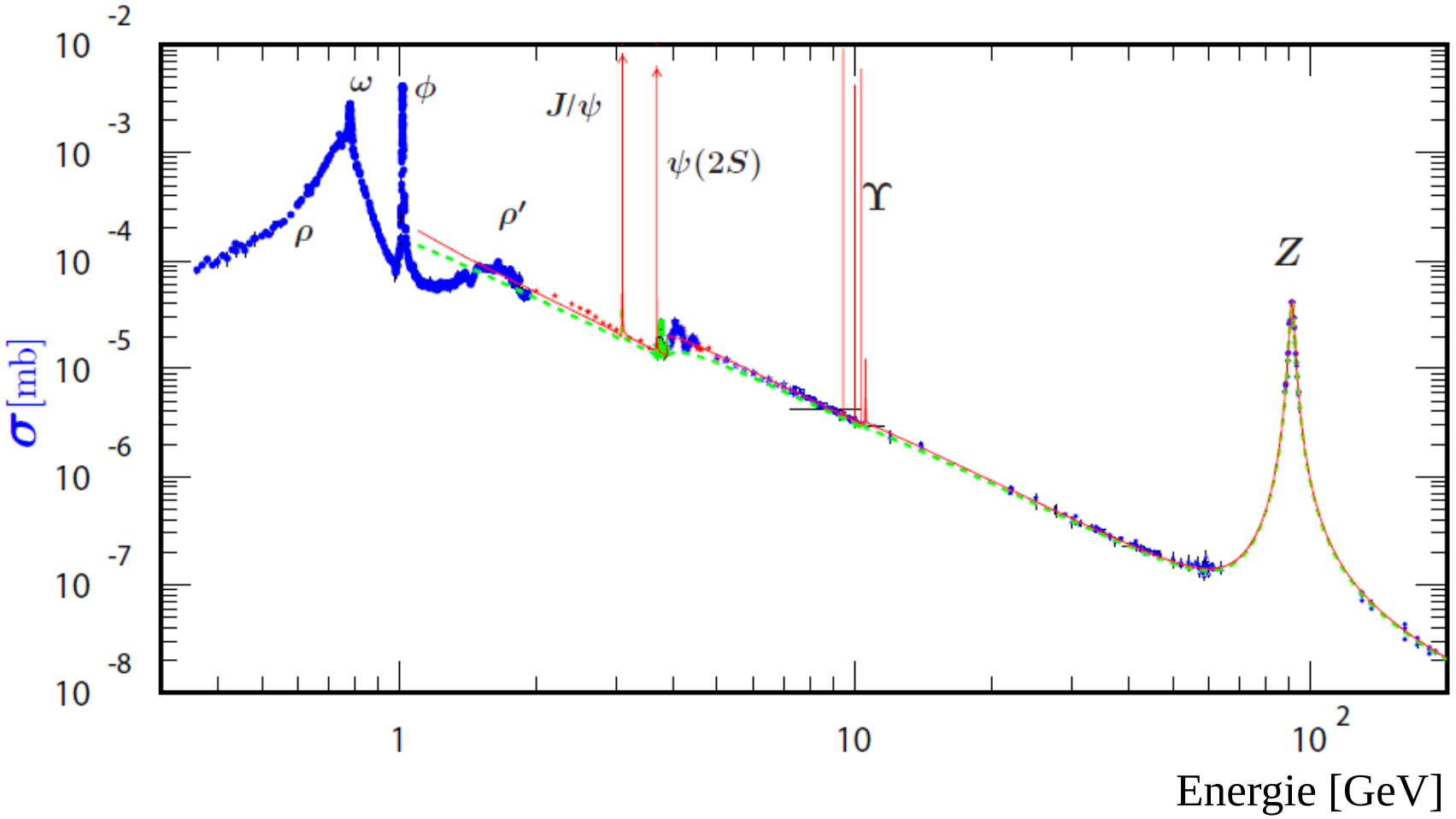


Ulrich Heintz - Moriond QCD

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

Exemple de section efficace

- Processus $e^+e^- \rightarrow$ hadrons
  - Echelle logarithmique sur les deux axes



SLAC

- Nom complet : SLAC National Accelerator Laboratory
  - Anciennement : Stanford Linear Accelerator Center

- Près de l'Université de Stanford, à ~40 km au sud de San Francisco

- Fondé en 1962

• Trois prix Nobel	Découverte	Prix Nobel
▪ Structure du proton	1968	1990
▪ Quark charmé	1974	1976
▪ Lepton tau	1976	1995

- Un accélérateur linéaire de 2 miles (3,2 km de long)
  - Accélère électrons et positrons jusqu'à quelques dizaines de GeV(*)

(*) GeV = Giga (10^9) electron-Volt = 1.6 10^{-10} J
{k,M,G,T}eV/c^2 sont des unités de masse (via la relation d'Einstein $E = Mc^2$)
Par abus de langage, on omet souvent le « /c^2 ». Quelques exemples de masses :
$M_{electron} \approx 511$ keV ; $M_{proton} \approx 938$ MeV ; $M_{top} \approx 173$ GeV ; $M_{\text{« Higgs »}} \approx 126$ GeV

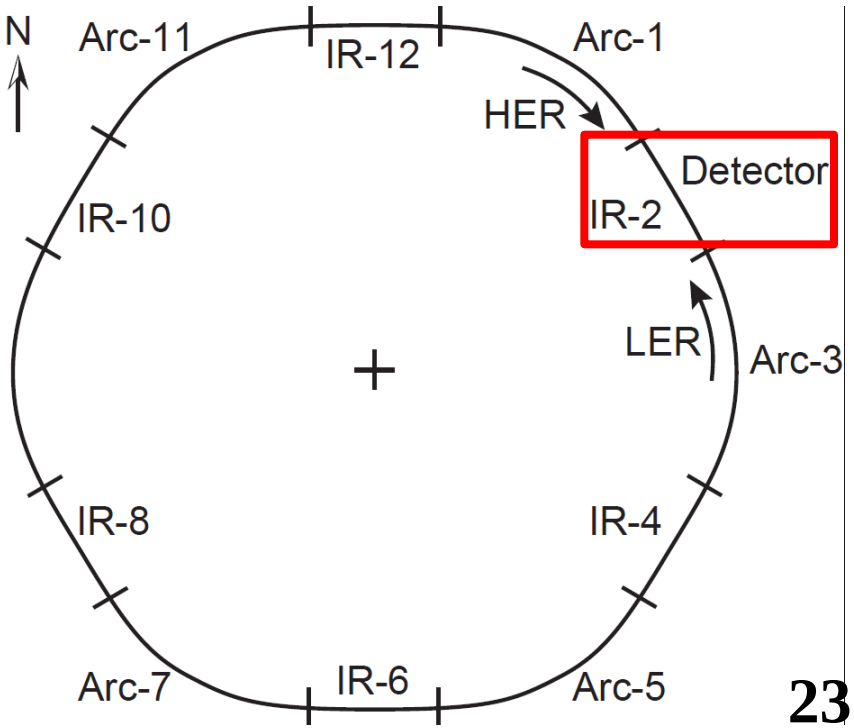
L'Usine à saveurs « PEP-II »

- Configuration nominale du site jusqu'en 2008

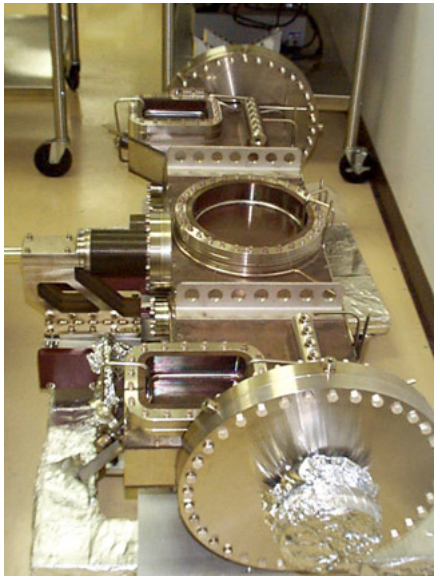
- Schéma classique de collisionneur
  - Accélérateur linéaire
  - Anneau de stockage (circonférence ~2.2 km) dans lequel tournent deux faisceaux en contresens
  - Collisions au centre d'un détecteur : BaBar

Le collisionneur PEP-II

- Six régions droites – Interaction Regions « IR »
  - BaBar est situé à « IR-2 »
  - Accélération dans l'une d'entres elles
- Six arcs de cercle
- Deux anneaux
  - « High Energy Ring » (HER) : Electrons de 9 GeV
  - « Low Energy Ring » (LER): Positrons de 3.1 GeV
- ~300 « Beam Position Monitors » par anneau
  - Précision : ~ 1 mm (μm) en 1 (1024) tour(s)
- Des « Beam Profile Monitors » mesurent la forme des paquets et leur taille
- Des « Beam Current Monitors » mesurent des courants de plusieurs A à 5 mA près et sont sensibles à des variations de O(10 μA/s)



Le collisionneur

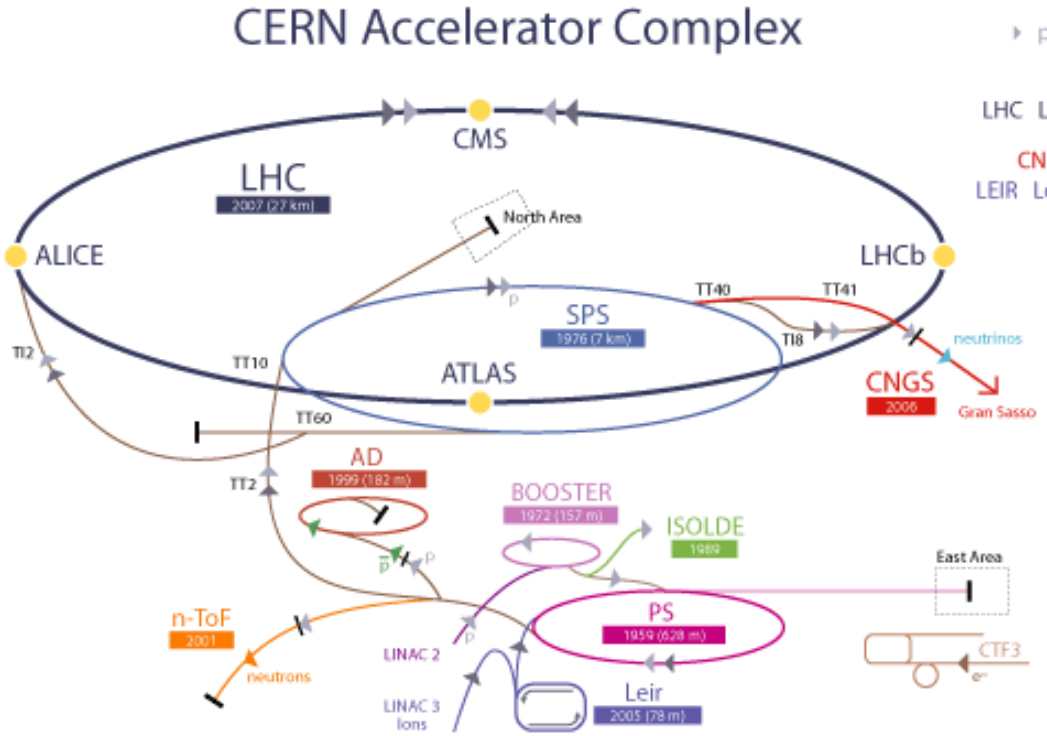


- Des collimateurs arrêtent les particules trop éloignées de la trajectoire nominale ou « hors énergie »
  - Taille du faisceau à ces emplacements : 1 mm en horizontal
    0.2 mm en vertical
  - Ouverture des collimateurs à 6-8 « sigmas »

- Des centaines de pompes à vide réparties sur tout l'anneau
  - P ≈ 3 (2) nTorr(*) dans le HER (LER)
  - Encore dix fois mieux au niveau du détecteur
    → Très sensible aux « fuites de vide », localisées par injection d'He
  - Plusieurs techniques de pompage utilisées en parallèle
  - Ionisation du gaz résiduel, puis ions piégés sur un substrat (Ti par exemple) : absorption (en volume) ou adsorption (en surface)
    → Principe du « getter » (« piège à gaz » en français)
  - Pompes régénérées régulièrement
  - « Scrubbing » & « dust events »

(*) Torr ou mmHg – 760 Torr = 1 atmosphère
= 101325 Pa

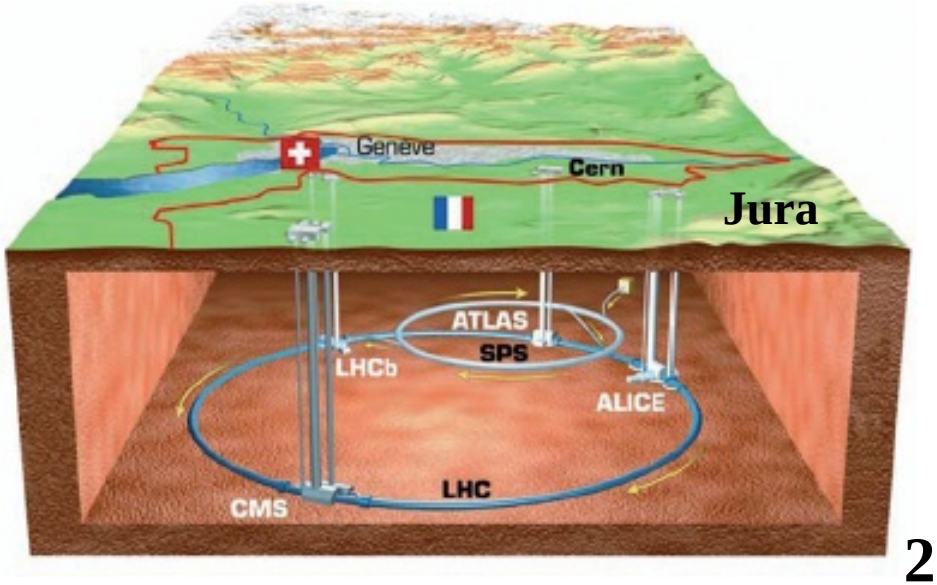
Accélération des particules au LHC



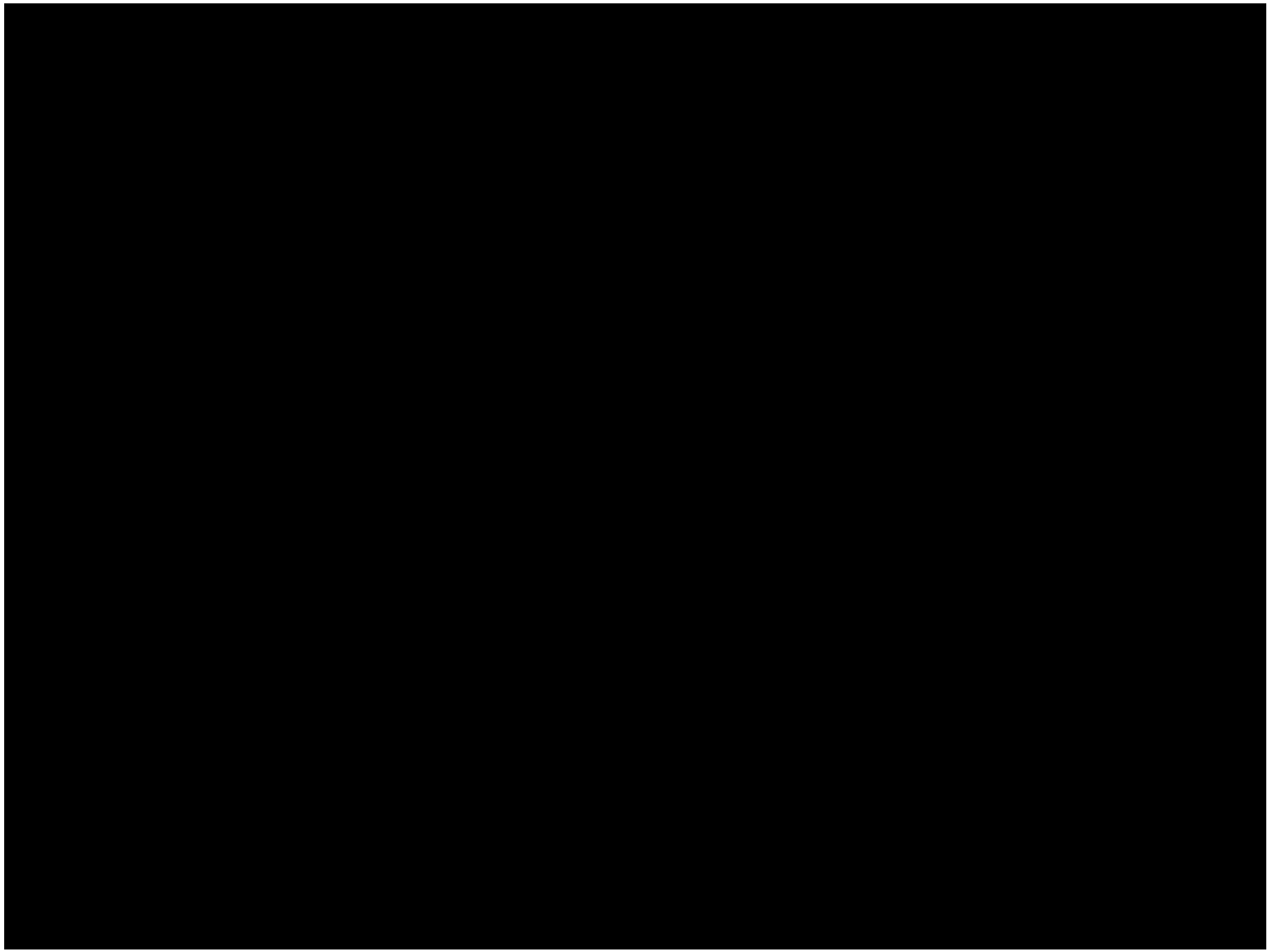
Le LHC

L'ancêtre : Lawrence (1930)

- Anneau quasi-circulaire de ~27 km de circonférence creusé à ~100 m sous terre
- 2 faisceaux de protons (ou d'ions Pb selon les périodes) y circulent en sens opposé
- Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



Accélération des particules au LHC



Le LHC en quelques chiffres

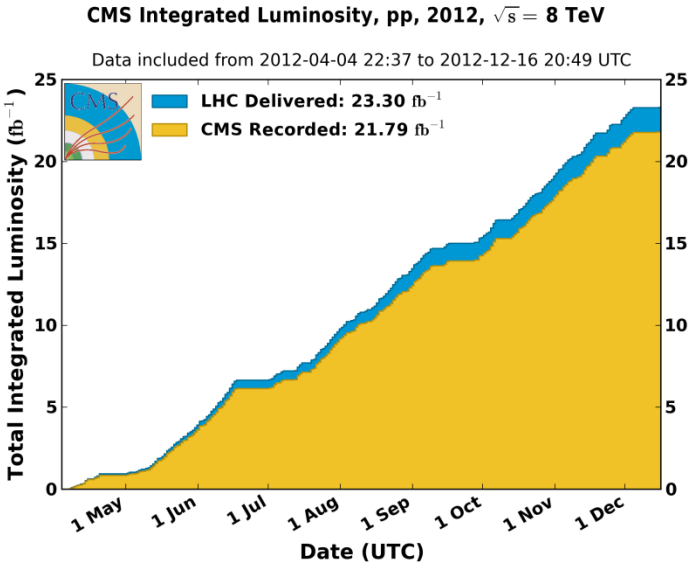
- Consommation d'électricité : ~ 400 GWh/an (5% de la consommation de la SNCF)
- Les particules accomplissent 11 000 tours / seconde à la vitesse de la lumière
- La pression dans le tube à vide est 10 fois inférieure à celle sur la Lune
- Les aimants sont au nombre de 9 300 environ ; ils sont refroidis à -271,3°C
  → Plus froid que l'espace intersidéral !

En fonctionnement nominal (pas encore atteint) :

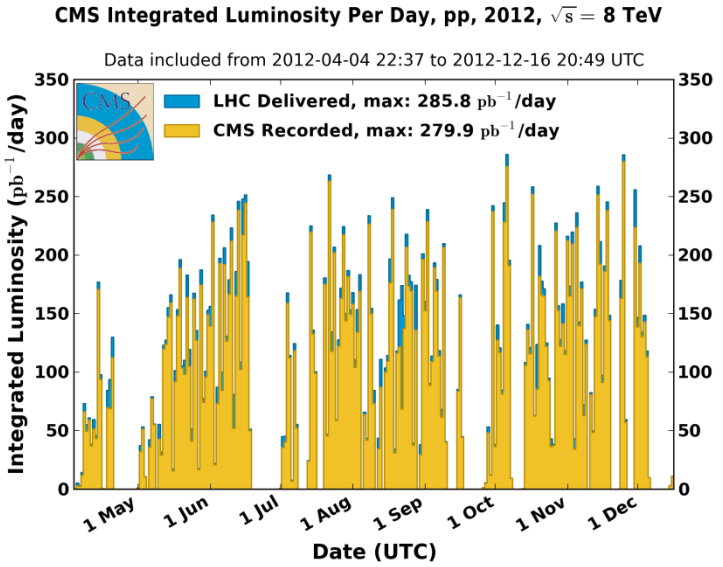
- Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde dans les détecteurs et chaque interaction produira ~ 20 collisions proton-proton
- Il y aura ~ 300 000 000 000 000 de protons en même temps dans le LHC
- L'énergie stockée dans le faisceau équivaudra à celle de 80 kg de TNT
  aimants 240 kg
- L'énergie nominale des collisions est 14 TeV (8 TeV en 2013)

Exemple de performances d'un « couple » accélérateur-détecteur : LHC-CMS en 2012

- Evolution de la luminosité intégrée en fonction du temps



- Comparaison des luminosités délivrée par l'accélérateur et enregistrées par le détecteur

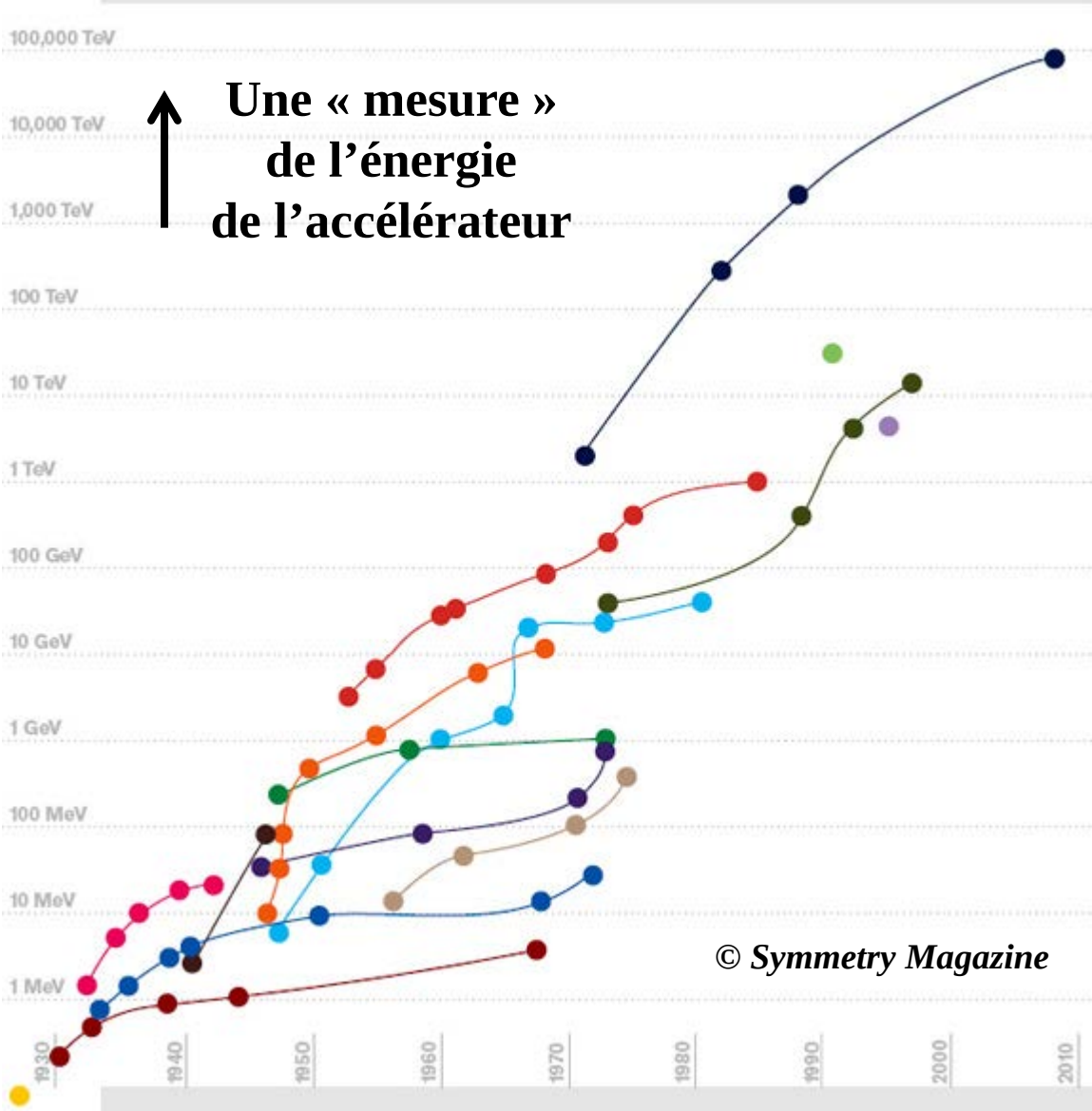


$$L_{\text{intégrée}} = 50\ \text{fb}^{-1} \left(\frac{\text{L}_{\text{instantanée}}}{5\times10^{33}\,\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}} \right) \left(\frac{\text{Temps de prise de données}}{10^{7}\ \text{s}} \right)$$

Année calendaire ≈ 3,16 × 10^7 s ; « cycle utile » du LHC en 2012 : 36,5%

Progrès des accélérateurs

- Diagramme de Livingston



Premier accélérateur

Cyclotrons

Accélérateurs électrostatiques Cockroft-Walton

Accélérateurs électrostatiques Van de Graaff

Bétatrons

Synchrocyclotrons

Accélérateurs linéaires

Synchrotrons à électons

Synchrotrons à protons

Collisionneurs à anneau de stockage

Collisionneurs linéaires

Progrès des accélérateurs

First accelerator
Most accelerators in operation today, including thousands of machines used for treating the surfaces of materials, apply the same principle of resonance acceleration that Norwegian engineer Rolf Wideröe explored when he built the world's first accelerator in Aachen, Germany in 1928. His linear accelerator, or linac, powered by an alternating voltage, propelled potassium ions through an 88-cm-long glass tube, achieving an energy gain equivalent to twice the peak voltage he used. This proof of principle opened the door to a vast new field of research and many types of accelerators.

Cyclotrons
More than 350 cyclotrons around the world produce radioactive isotopes for medical applications, such as PET scans. Inspired by Wideröe's success, Ernest Lawrence and his student M. Stanley Livingston built the first of these circular accelerators, about four inches in diameter, and operated it in 1931 in Berkeley. **(A)** The cyclotron's magnetic field forces particles to travel in spirals. On each turn, the particles cross an electric field, which accelerates them to higher energy.

Cockcroft-Walton electrostatic accelerators
In 1932, John Cockcroft and Ernest Walton became the first scientists to split the atomic nucleus with artifically accelerated particles when they aimed a proton beam from a new type of accelerator at the nuclei of lithium atoms. Physicists still use Cockcroft-Walton accelerators to deliver strong, steady streams of low-energy protons. The machines can turn alternating currents into electrostatic fields corresponding to more than one million volts.

Van de Graaff electrostatic accelerators
Scientists used this type of accelerator for several decades in physics and biomedical research. Commercial companies now build modern versions of this machine. Invented at Princeton University in the 1930s, the accelerator generates a high voltage by charging a large sphere through a moving belt. In the early 1950s, the Massachusetts Institute of Technology donated its Van de Graaff machine to the Museum of Science in Boston, where visitors can still see it in action.

Betatrons
In 1940, Donald Kerst at the University of Illinois modified the design of the cyclotron to accelerate particles to higher energy. The betatron's large magnet provides a variable field and keeps particles on a circular orbit inside a beam pipe, a major step forward in accelerator technology. In 1957, Dr. O. Arthur Stiennon opened in Wisconsin the first private medical center to treat cancer patients with a betatron. Because of cost and size limitations, demand for betatrons started to fall in the 1970s.

Synchrocyclotrons
For many years physicists struggled to build accelerators that work for both low- and high-speed particles. The problem is that slow particles gain energy and speed when traveling through an electric field while particles traveling close to the speed of light gain energy while barely speeding up at all, a phenomenon explained by the theory of special relativity. This creates a timing problem in accelerators with electric fields that alternate at constant frequency. The synchrocyclotron, invented in the 1940s but no longer built today, solved the problem by introducing an electric field with variable frequency, paving the way for even better accelerators.

Linear accelerators
Physicists built the first modern linear accelerators after World War II, using microwave technology developed for radar. Today, thousands of hospitals use linacs for radiotherapy in cancer treatment. **(B)** Linacs use radio-frequency waves to create electric fields inside cylindrical cavities. Luis Alvarez built the first standing-wave linac to accelerate protons at the University of California, Berkeley, in 1946. William Hansen and his team at Stanford University constructed the first traveling-wave linac to accelerate electrons in 1947. High-energy accelerators often rely on a standing-wave linac to give heavy particles an initial boost before injecting them into the circular machines that accelerate them to high energy.

Electron synchrotrons
The operation of the first electron synchrotron in the United States, at General Electric in 1946, led to the discovery of synchrotron radiation, the light emitted by charged, high-energy particles traveling in a circle. Today, more than 50 synchrotrons, known as lightsources, **(C)** produce intense beams of light for research in material science, chemistry, molecular biology, and other fields. By injecting particles into a synchrotron at close to the speed of light, scientists can operate its alternating electric field at an almost constant frequency. An adjustable magnetic field guarantees that the particles stay on a fixed circular path, so beams can circulate for long periods of time.

Proton synchrotrons
Because protons are about 2000 times heavier than electrons, they must be accelerated to higher energies, and hence over longer distances, to attain relativistic speeds. The discovery in the 1950s of strong beam focusing, which controls the size of a particle beam through a series of magnets, allowed the construction of large, circular proton accelerators for nuclear and high-energy research, starting at Brookhaven National Laboratory and the European laboratory CERN. Hospitals have begun to use proton synchrotrons for cancer treatment.

Storage ring colliders
Particle colliders have led to the discoveries of many subatomic building blocks and the forces that govern their behavior. Storage ring colliders are based on synchrotron technology. They accelerate two beams of particles in opposite directions and circulate them for hours. Every time the beams cross, a few particles collide. In the 1960s, scientists built the first electron-positron collider at Frascati, Italy, followed by machines in the United States and Russia. Today, colliders at KEK, Fermilab, Brookhaven—and, soon, CERN **(D)**—smash electrons, positrons, protons, antiprotons, and ions into each other. Scientists now are developing the technology for a proposed muon collider.

Linear colliders
The Stanford Linear Accelerator Center started operating the world's first linear particle collider in 1989. Today, a worldwide collaboration of scientists is advancing plans for the proposed International Linear Collider, which would use superconducting radio-frequency (RF) cavities to accelerate electrons and positrons to much higher energy than achieved at SLAC. A collaboration based at CERN is developing a new linac concept, the Compact Linear Collider.

Text: Kurt Riesselmann
Image: Adapted from the 2001 Snowmass Accelerator R&D Report

Détecteurs

Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

Taille des détecteurs ATLAS et CMS

- Des cathédrales de métal et d'électronique !
  → Dimensions de plusieurs dizaines de mètres
  → Poids de plusieurs milliers de tonnes (≈ Tour Eiffel)

- Des millions de canaux électroniques recoivent des informations lors des collisions
  → Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus
  → Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.

- Volume total de données : ~ plusieurs Encyclopédia Universialis / seconde
  → Impossible de tout conserver
  → Tri en temps réel des événements : drastique et très performant

- Données stockées et analysées au moyen de milliers d'ordinateurs répartis dans des centaines de centres de calcul du monde entier

- Chaque collaboration du LHC compte plusieurs milliers de membres

Comment construire un détecteur ?

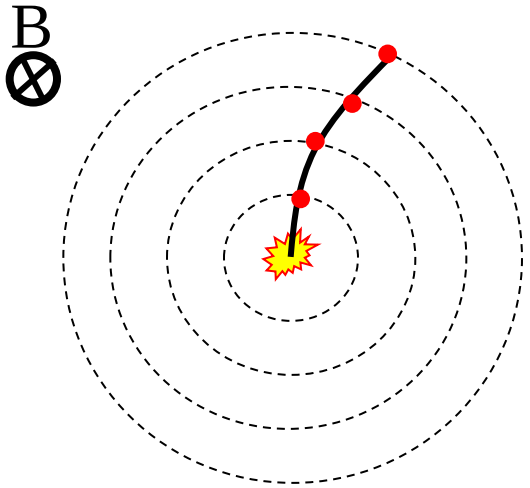
- Il faut mesurer
  - la trajectoire
  - la charge électrique
  - la vitesse
  - l'énergie
  - la nature

de toutes les particules créées lors des collisions

- Principe de base
  - Détecteur « sans trou » : forme cylindrique

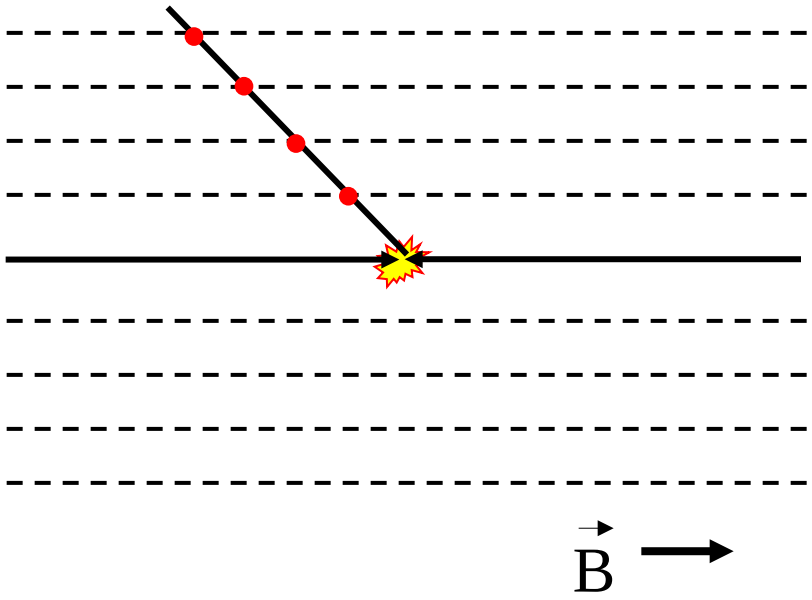
Trajectographe : mesure trajectoire & charge

ATLAS vu de face



Un électron

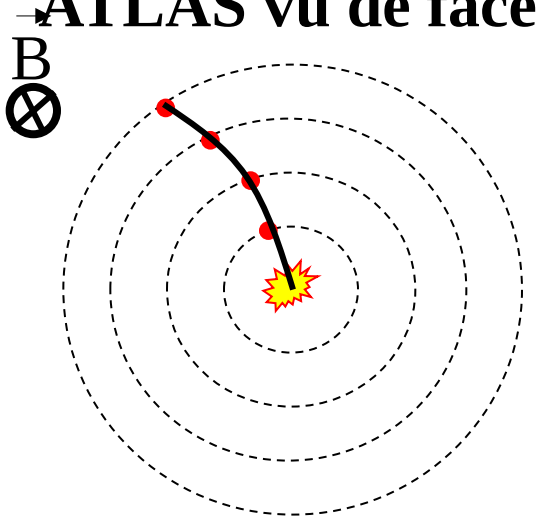
ATLAS vu de côté



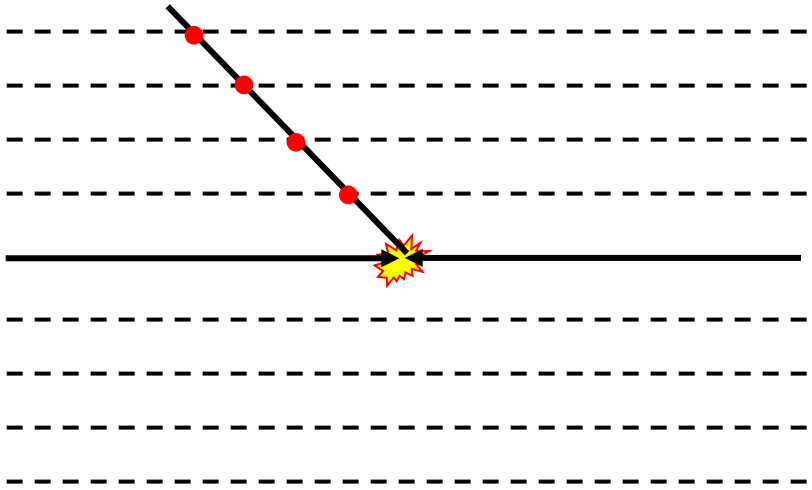
- Plusieurs ‘’couches’’ permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l’aide d‘un **champ magnétique** :
  - En effet les particules chargées, lorsqu’elles sont soumises à l’action d’un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
  - Rayon de courbure $R=mv/qB$

Le trajectographe

ATLAS vu de face



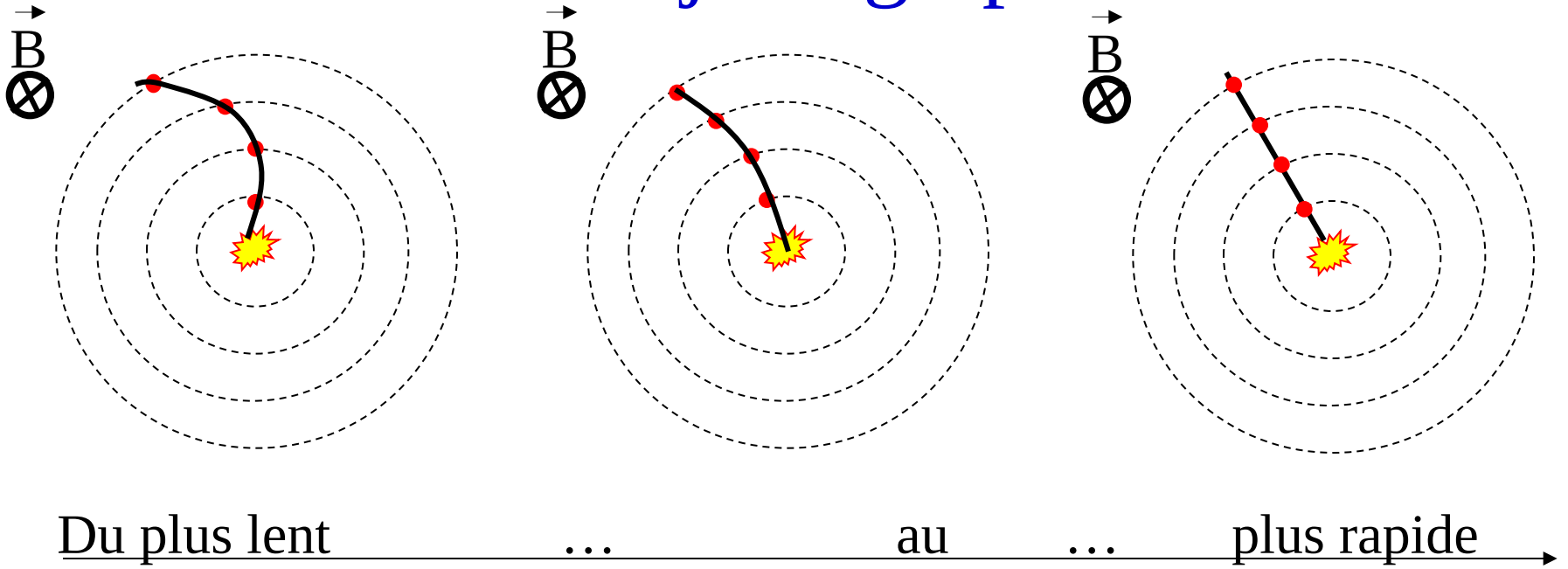
ATLAS vu de côté



Un anti-électron=positron

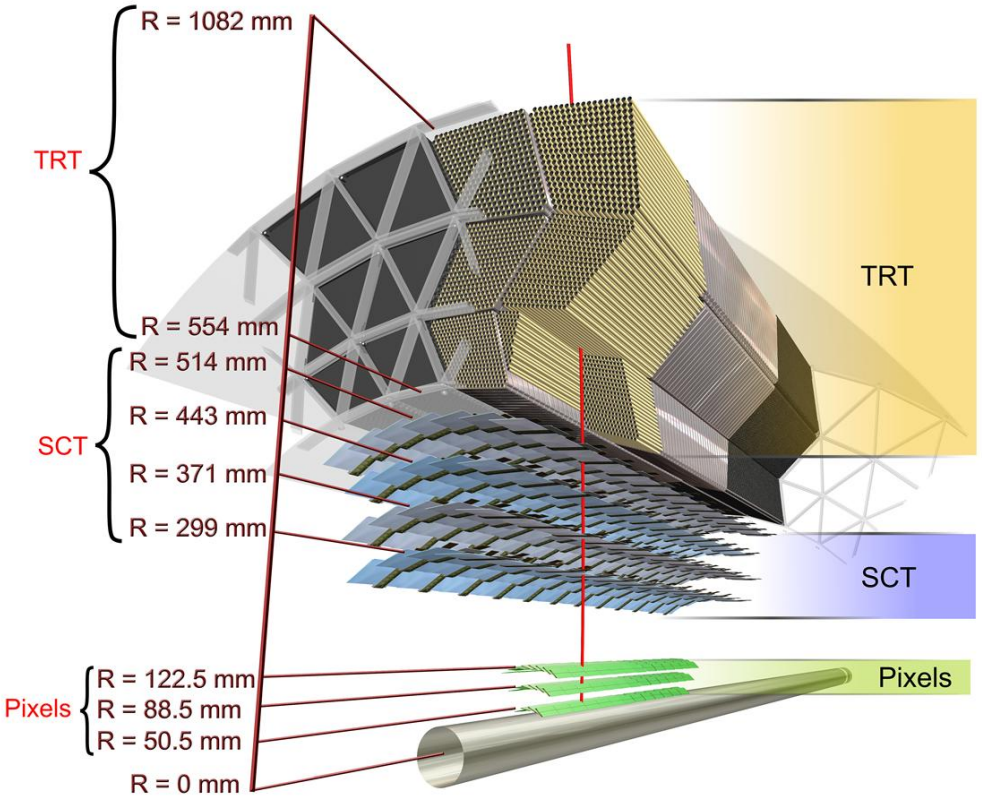
- Plusieurs ‘’couches’’ permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l’aide d‘un **champ magnétique** :
  - En effet les particules chargées, lorsqu’elles sont soumises à l’action d’un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
  - Rayon de courbure R=mv/qB

Le trajectographe



- Plusieurs ‘’couches’’ permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l’aide d‘un **champ magnétique** :
  - En effet les particules chargées, lorsqu’elles sont soumises à l’action d’un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
  - Rayon de courbure R=mv/qB

Un trajectographe en trois parties dans ATLAS



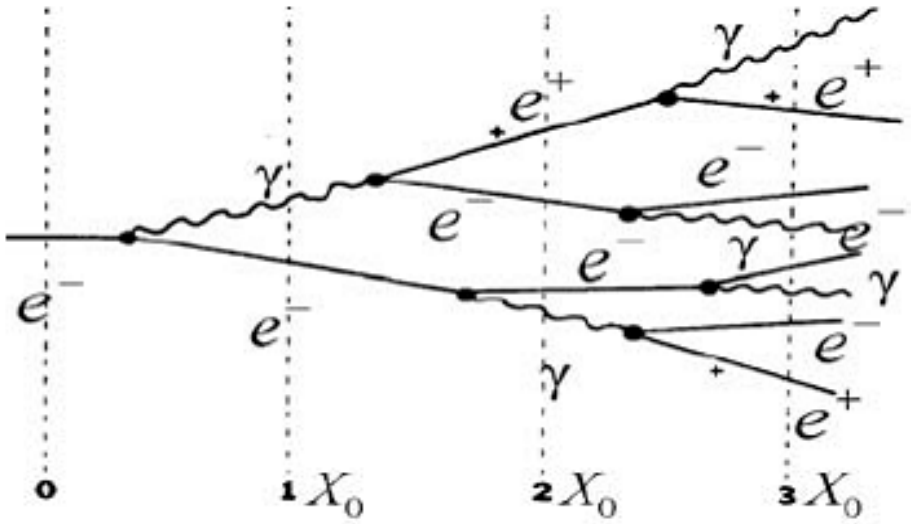
•Détecteurs pixel : constitués de 140 millions de pixels carrés de silicium de 50 à 300 μm de côté. Placé très près du faisceau pour minimiser sa taille (son coût est très élevé).

•Détecteur à bandes SCT (SemiConducteur Tracker) : il s'agit maintenant de 5 millions de bandes de 80μm de largeur et de quelques centimètres de longueur disposées en cylindre.
Moins précis que pixels.

•Détecteur de radiation de transition (TRT - Transition Radiation Tracker) : composé de 400 000 tubes de 4mm de diamètre et de 1,44m de long. Dans chacun de ces tubes est inséré un fil métallique. Une différence de potentiel est appliquée entre le fil et le tube, ce qui permet la génération d'un signal lors du passage d'une particule chargée.

Calorimètres : mesure de l'énergie

- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière par
  - Création de paires (conversion)
  - Rayonnement (Bremstrahlung)



- Les particules "filles" ainsi produites vont laisser un signal dans les parties actives du calorimètre (gerbe électromagnétique)
  - par exemple par ionisation

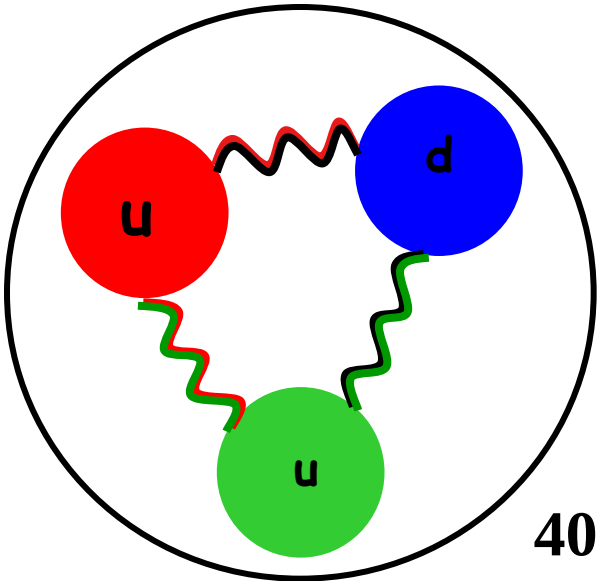
- Cette mesure nécessite la destruction de la particule initiale.

Fonctionnement d'un calorimètre

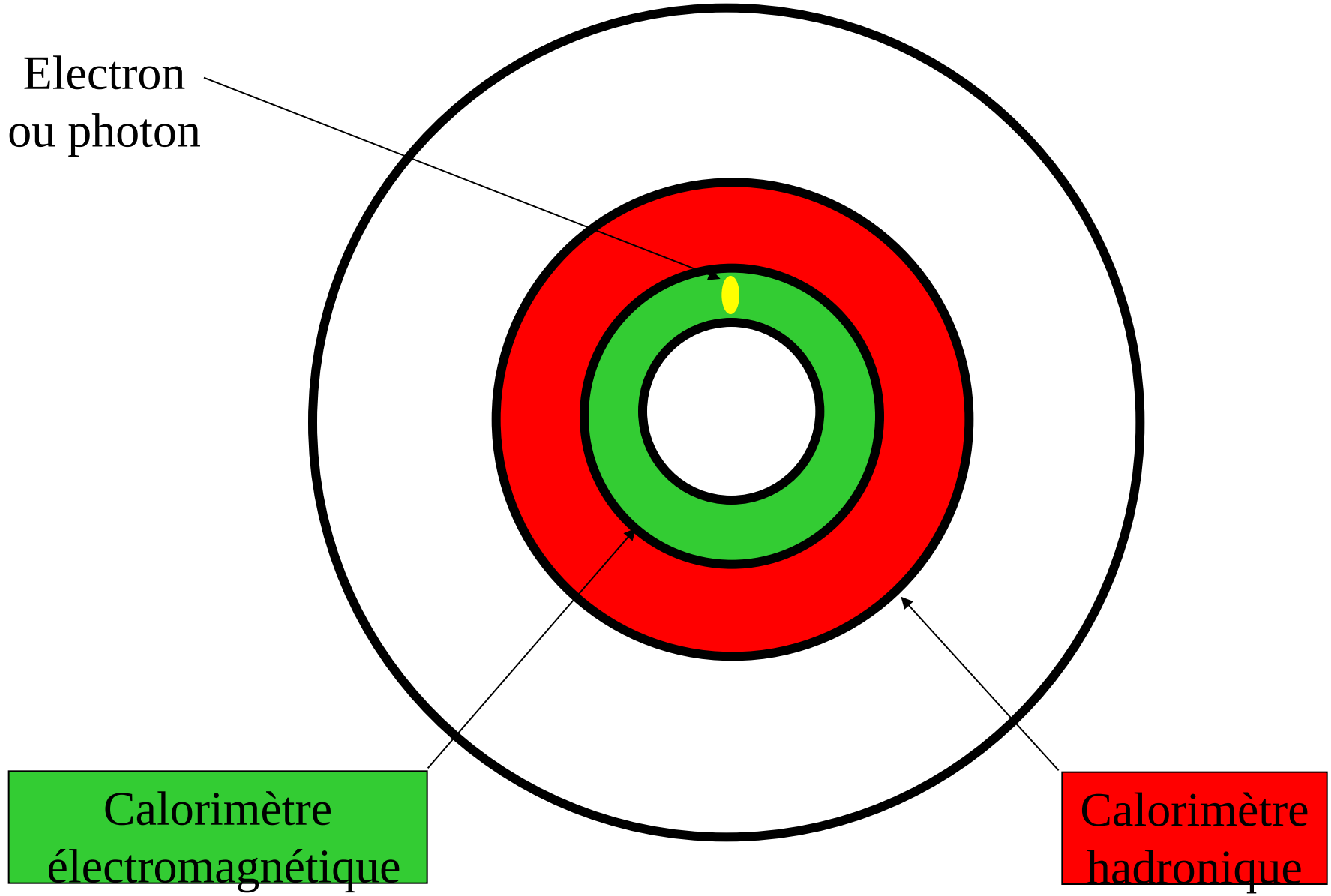
- Les particules interagissant avec les calorimètres peuvent être classées en 2 catégories

- Particules électromagnétiques
  - Electrons et photons
    → Ces particules interagissent beaucoup : peu de matière suffit pour les arrêter

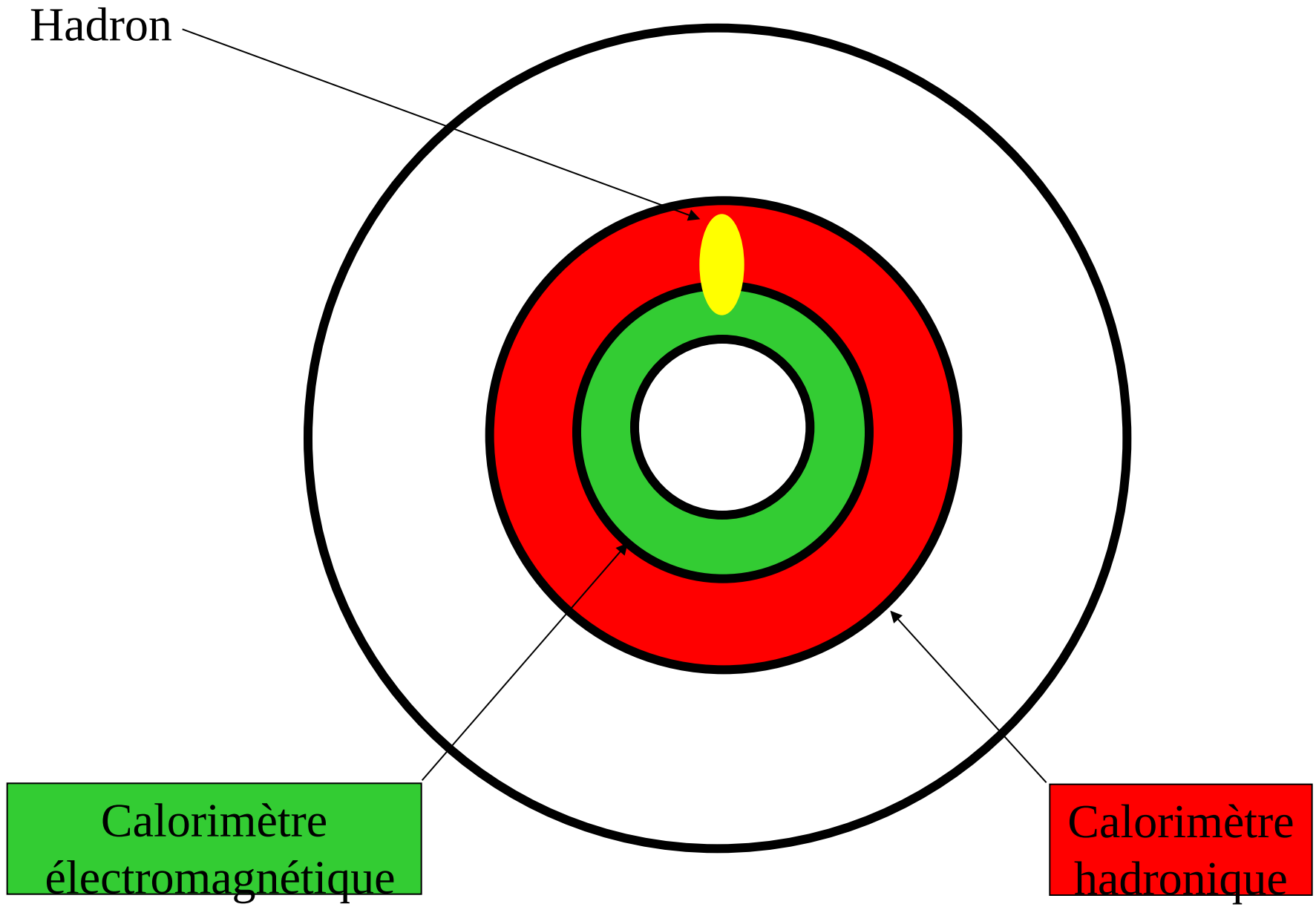
- Les hadrons
  - Particules composites formées de quarks (ex: proton)
  - Ces particules interagissent moins
    → Il faut plus de matière pour les arrêter



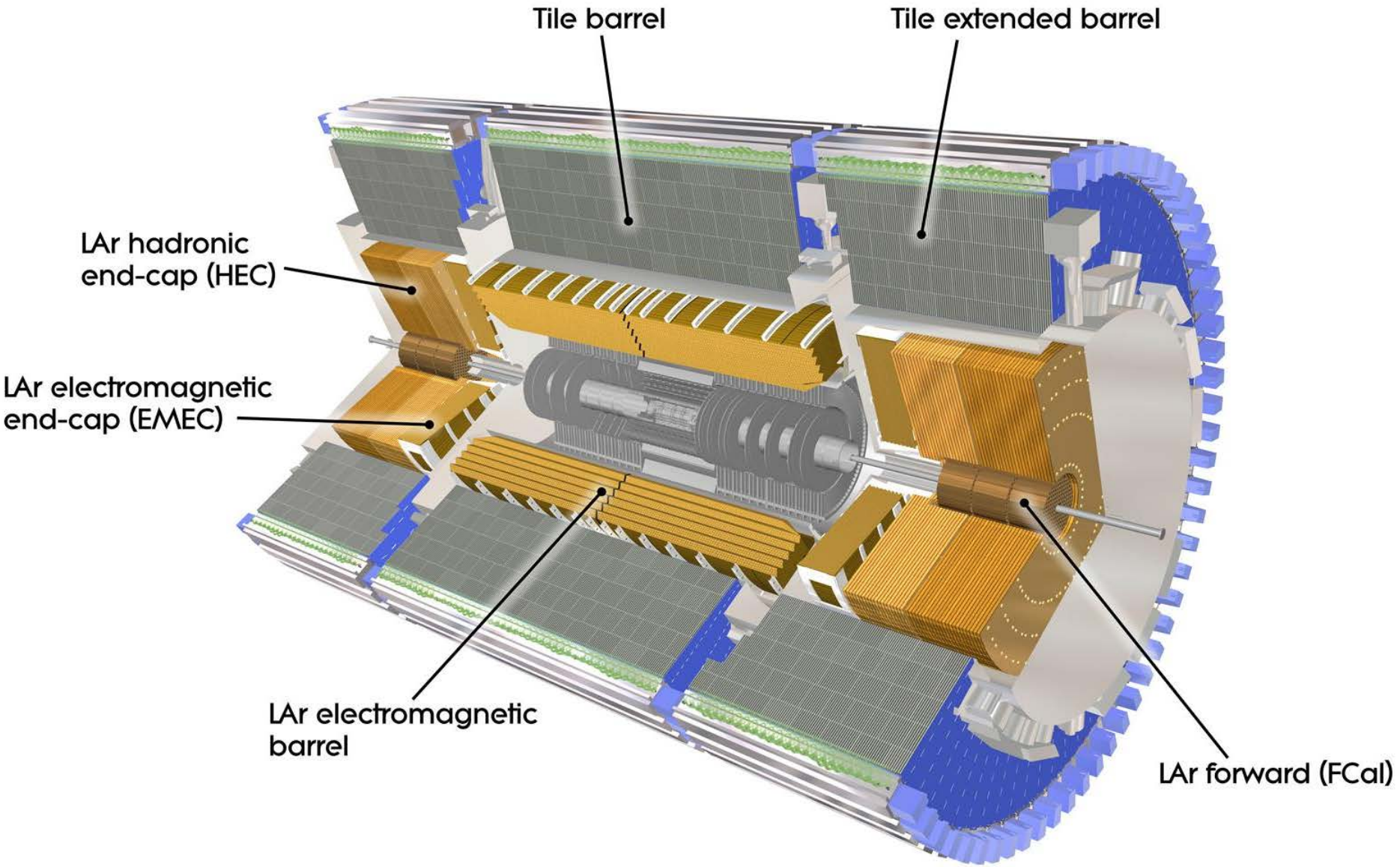
Les calorimètres dans ATLAS



Les calorimètres dans ATLAS



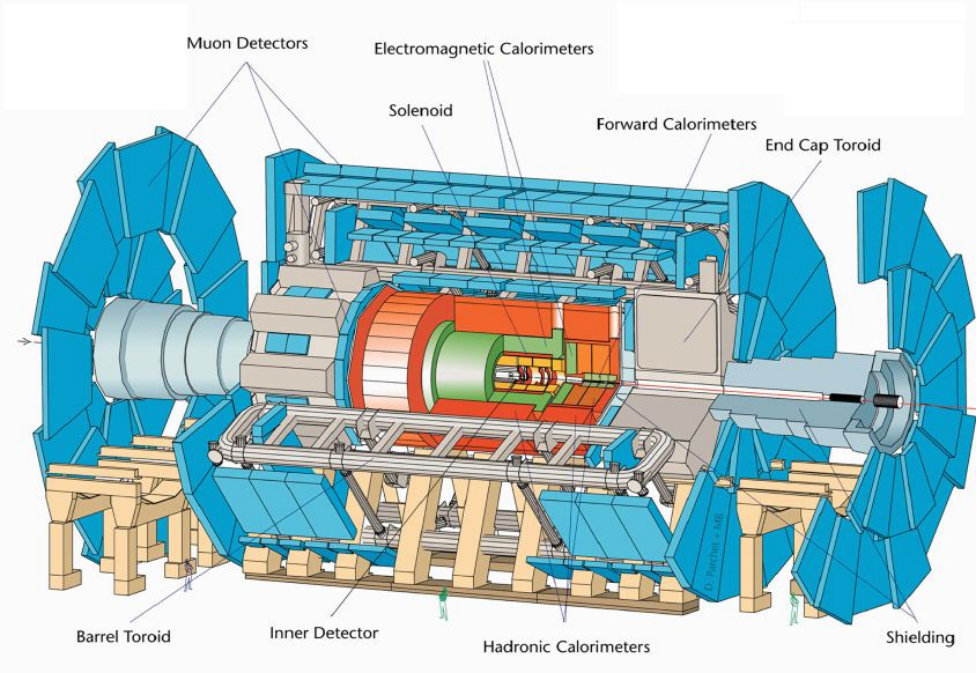
Les calorimètres dans ATLAS



Détecter les muons

- Muons : particules semblables à l'électron, en plus massifs.
- Souvent présents dans les signatures des événements intéressants.
- Particules chargées : on les voit dans le détecteur de traces
- Mais pas arrêtées par les calorimètres

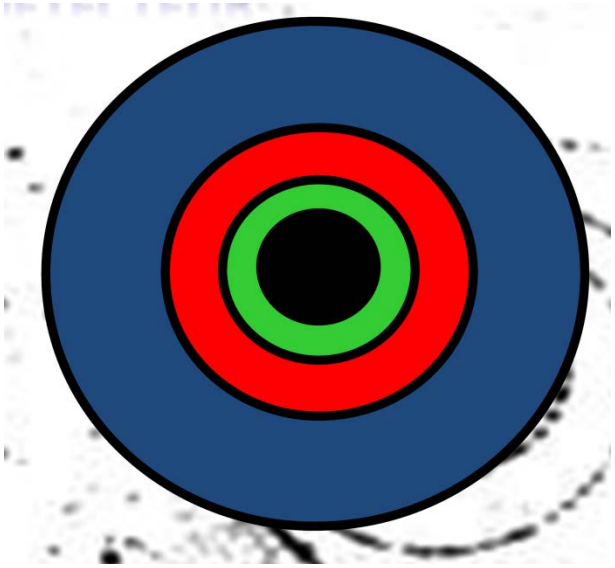
  → On construit des chambres à muons qui mesurent de façon très précise la vitesse et la trajectoire de ces particules (précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu) dans la partie extérieure du détecteur.



Système à muons en bleu

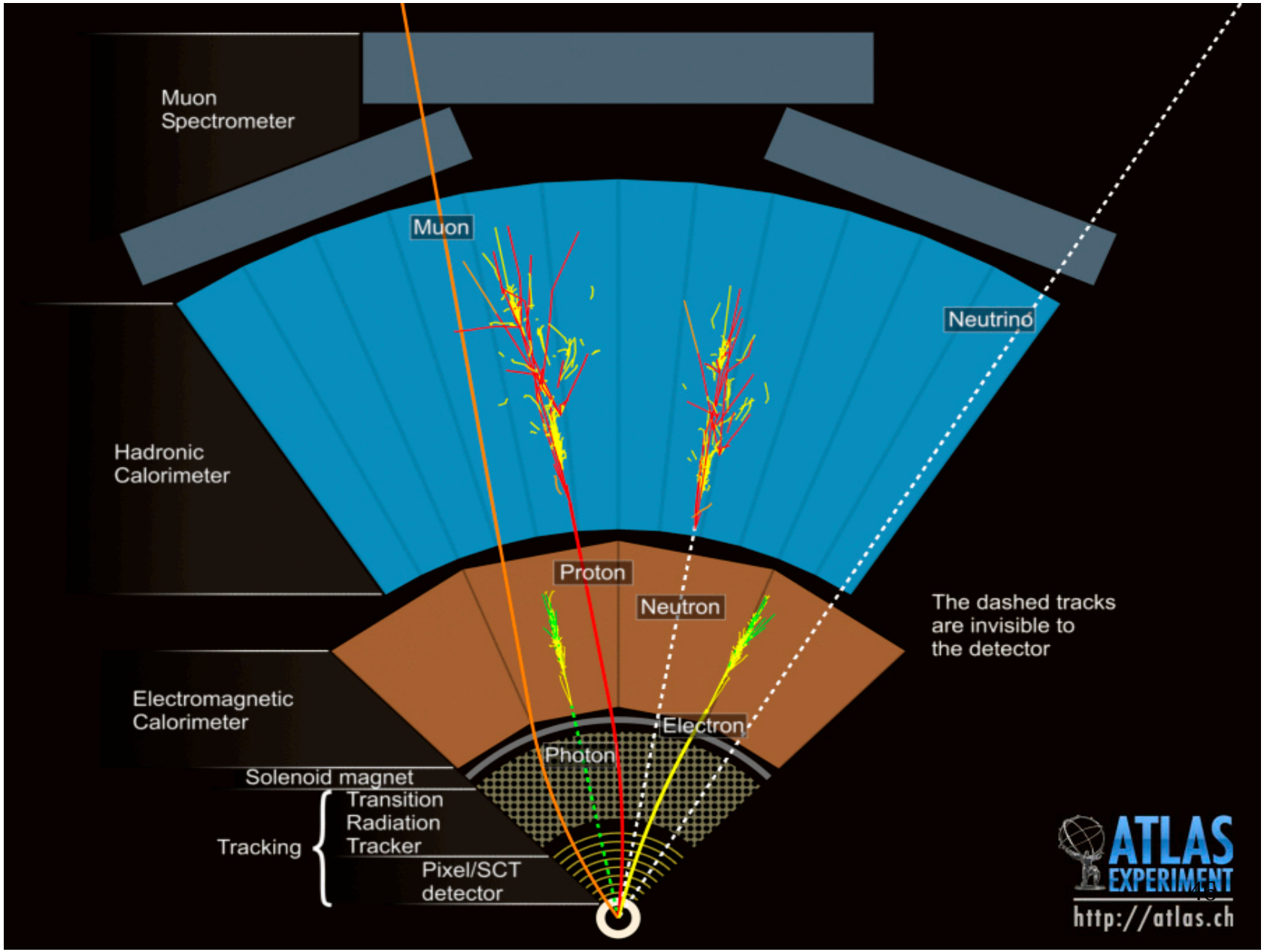
Structure générale d'un détecteur

- Structure en poupée russe
- Chaque couche a une fonction précise
- Identification des particules en combinant les informations de tous les sous-systèmes



Particule Stable	Détecteur de traces	Calorimètre électro-magnétique	Calorimètre hadronique	Détecteur de muons
Photon				
Électron				
Quark/Gluon → Jets				
Muons				
Neutrinos				

Résumé


Muon
Spectrometer
Muon
Neutrino
Hadronic
Calorimeter
Proton
Neutron
The dashed tracks
are invisible to
the detector
Electromagnetic
Calorimeter
Electron
Photon
Solenoid magnet
Tracking
Transition
Radiation
Tracker
Pixel/SCT
detector
ATLAS
EXPERIMENT
http://atlas.ch

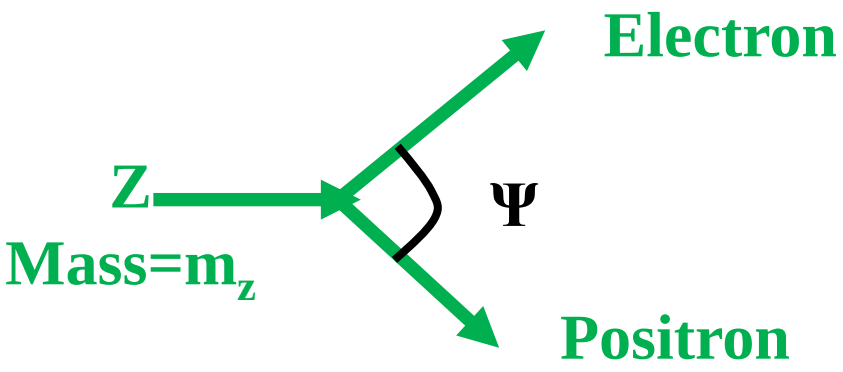
Et les autres particules ?

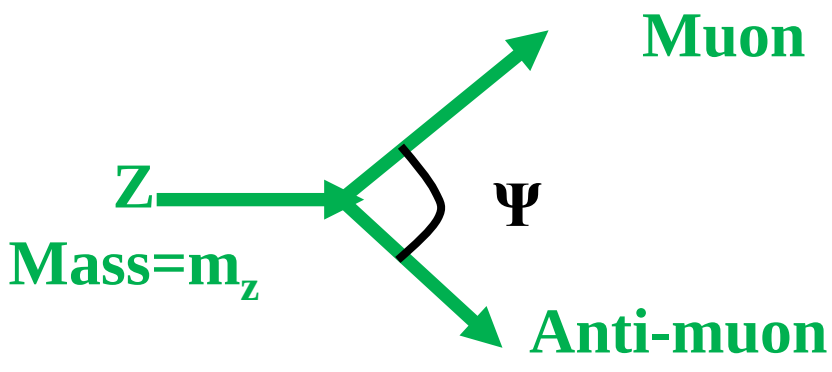
- Durée de vie très courte
  - Bosons Z et W, boson de Higgs, etc.

  $\rightarrow$ Elles se désintègrent avant de traverser le détecteur

- On « fait parler » leurs produits de désintégration

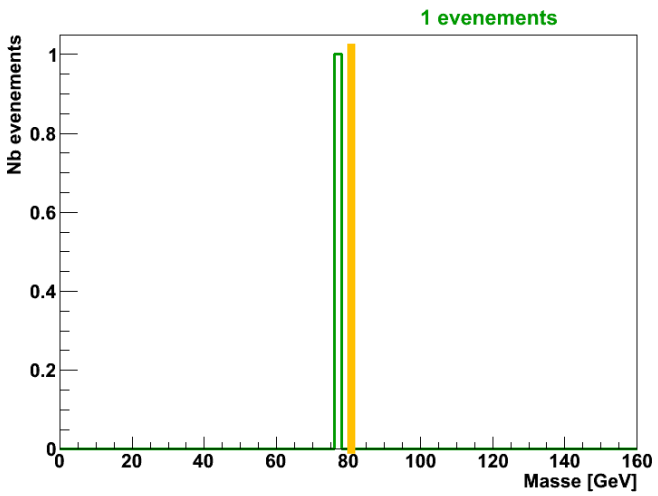
Signal : $Z^0 \rightarrow 2$ leptons



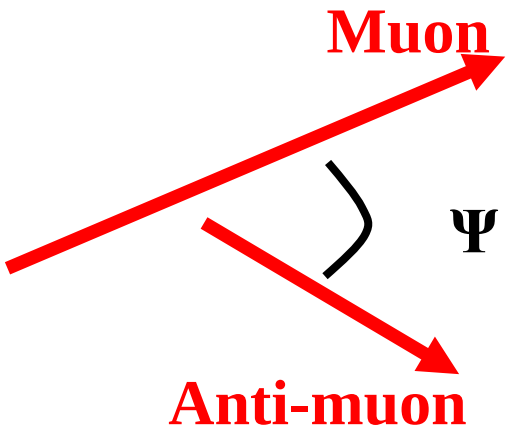


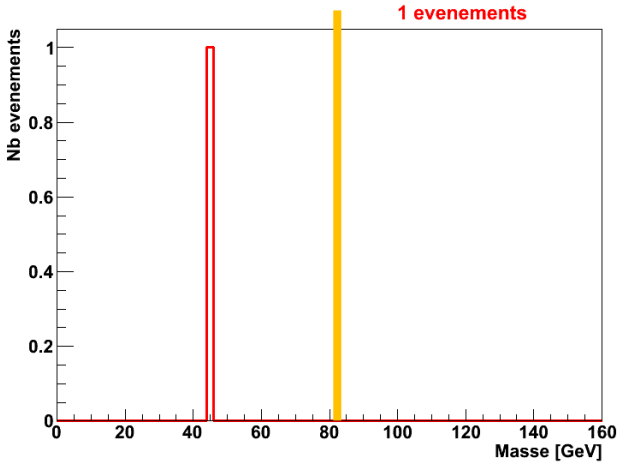
$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

- Énergie et quantité de mouvement (**p**=m**v**) des produits finaux sont connus puisque mesurés par ATLAS
  → On peut retrouver m0(Z)



Bruit de fond





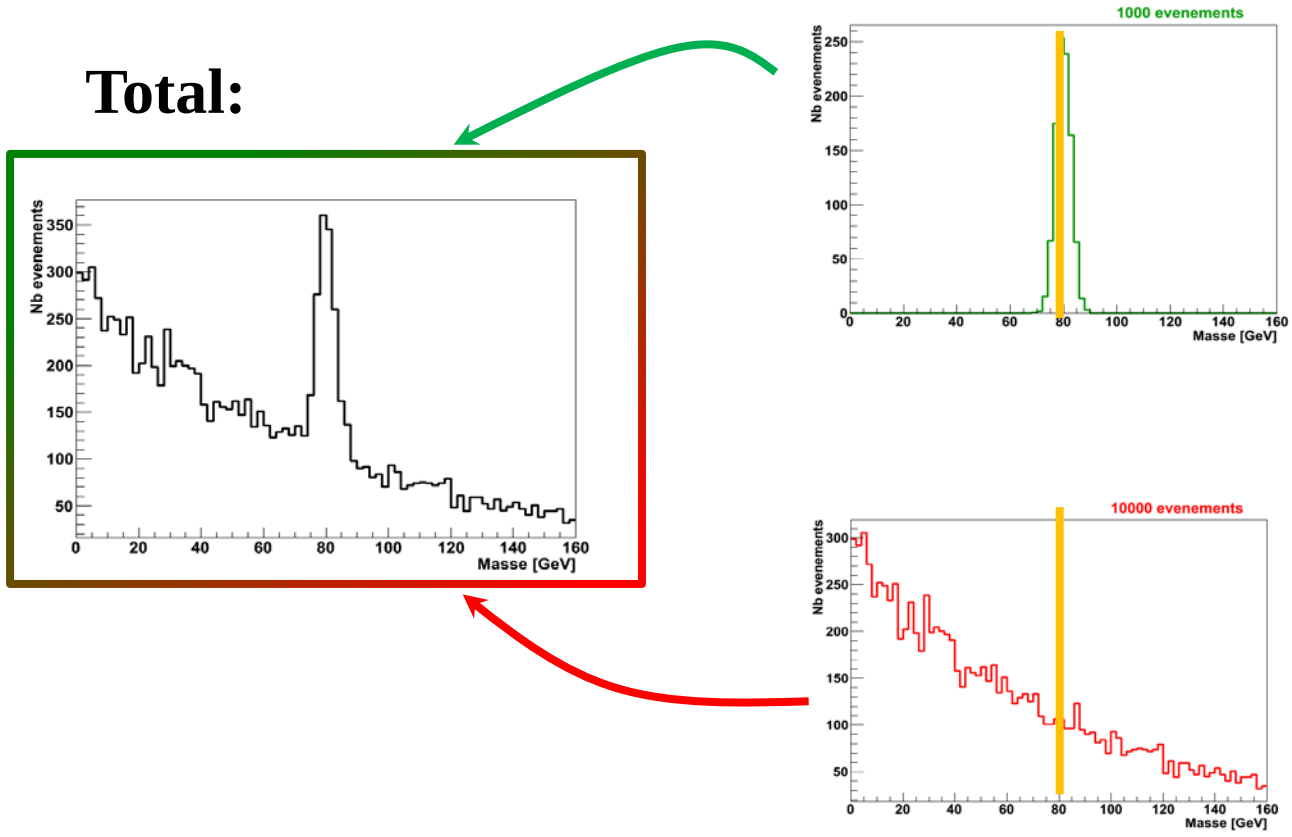
- Un muon et un anti-muon qui ne viennent pas d'un Z

→La quantité $\sqrt{\left(\frac{(E_{e^-}+E_{e^+})}{c^2}\right)^2-\left(\frac{\vec{p}_{e^-}+\vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$ n'est pas égale à la masse du Z

Signal et bruit de fond mélangés

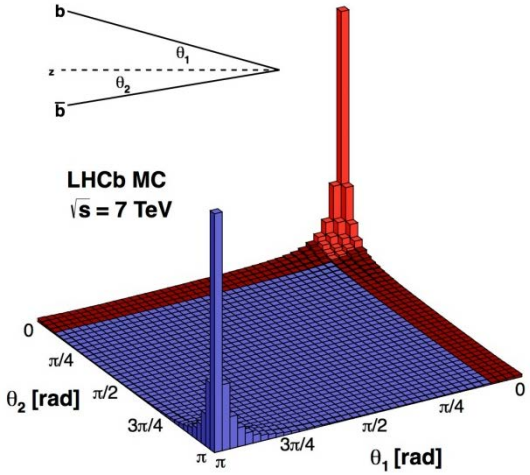
- On va sélectionner des événements qui ‘’ressemblent’’ au Z
  - Mais certains seront du bruit de fond

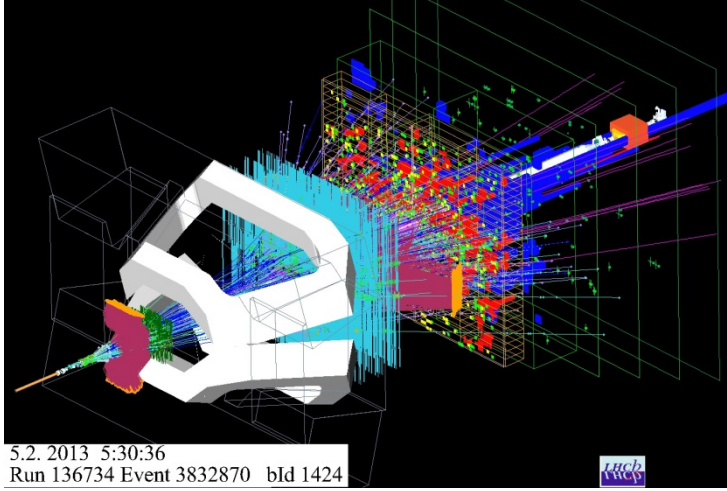
→ L’histogramme total pourra ressembler à :

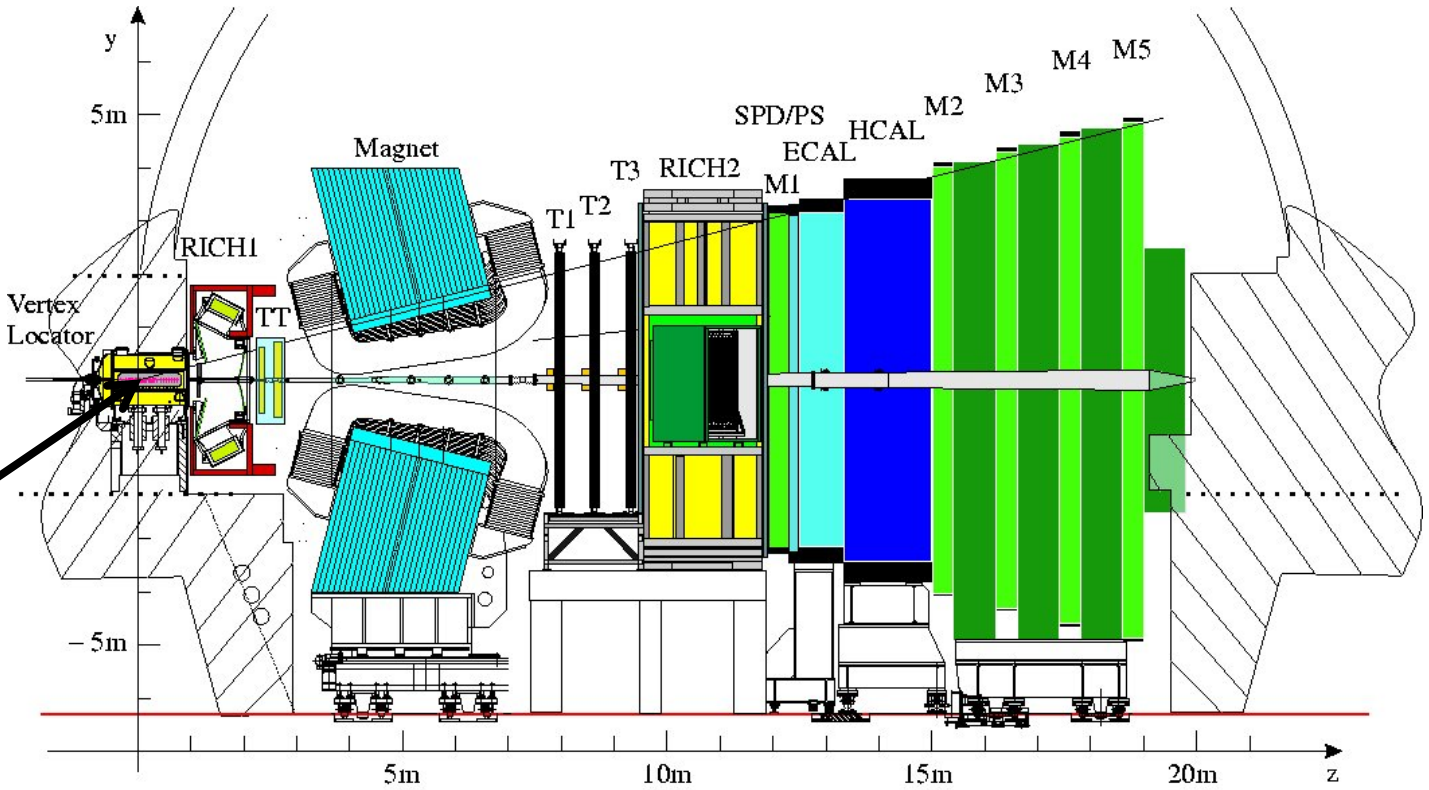


LHCb

- Spectomètre
  - Paires $q\bar{q}$ produites majoritairement vers l'avant ou vers l'arrière





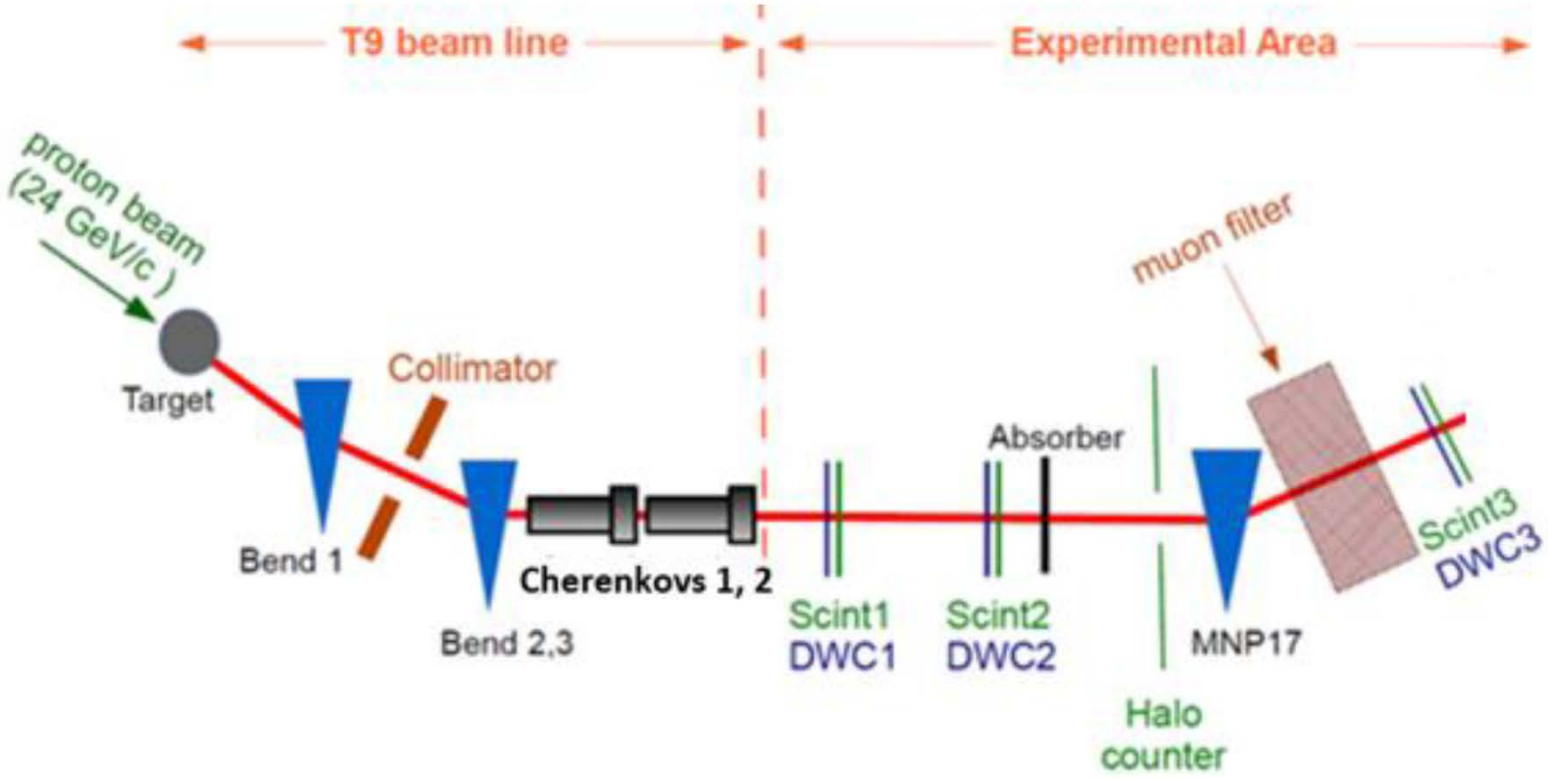


Point de collision

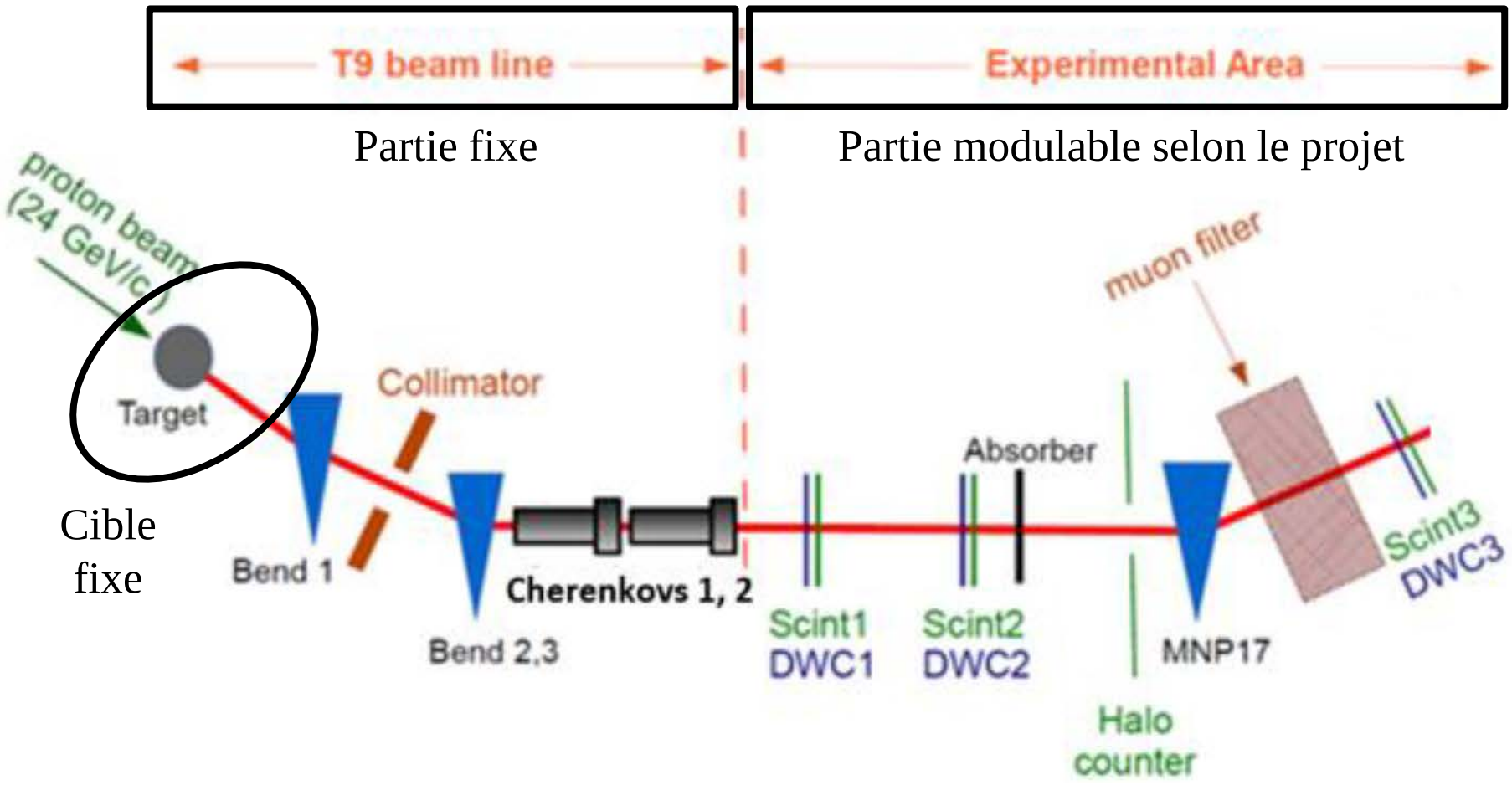
A Beamline for schools

- Concours pour les lycéens, organisé chaque année depuis 2014 par le CERN
  - Les deux équipes lauréates passent une dizaine de jours au CERN
  - Réalisation d'une expérience sur la ligne de faisceau « T9 » du PS
  - Peu / pas assez de participations d'équipes françaises …

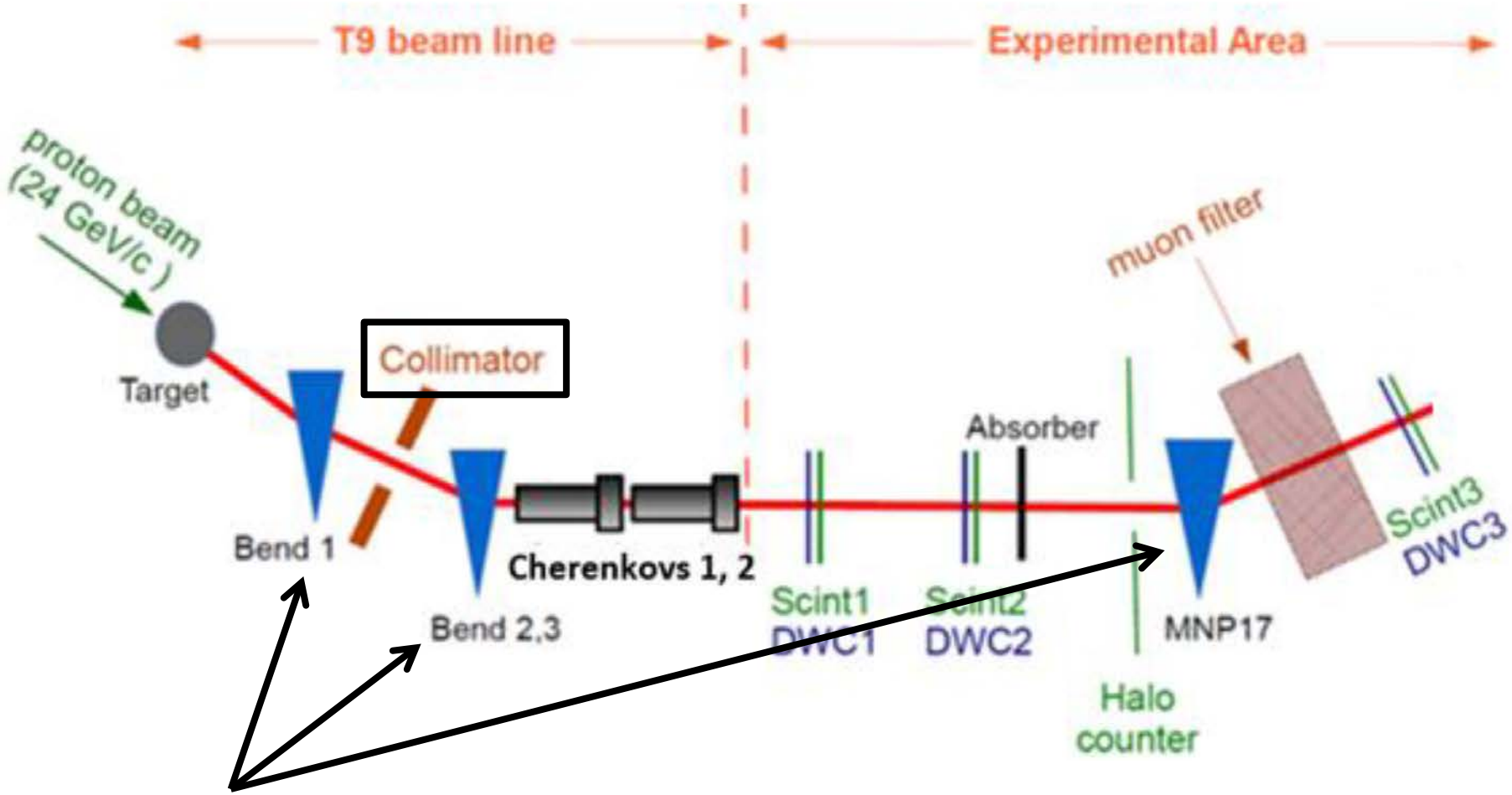
- Plus d'informations : http://beamline-for-schools.web.cern.ch



A Beamline for schools



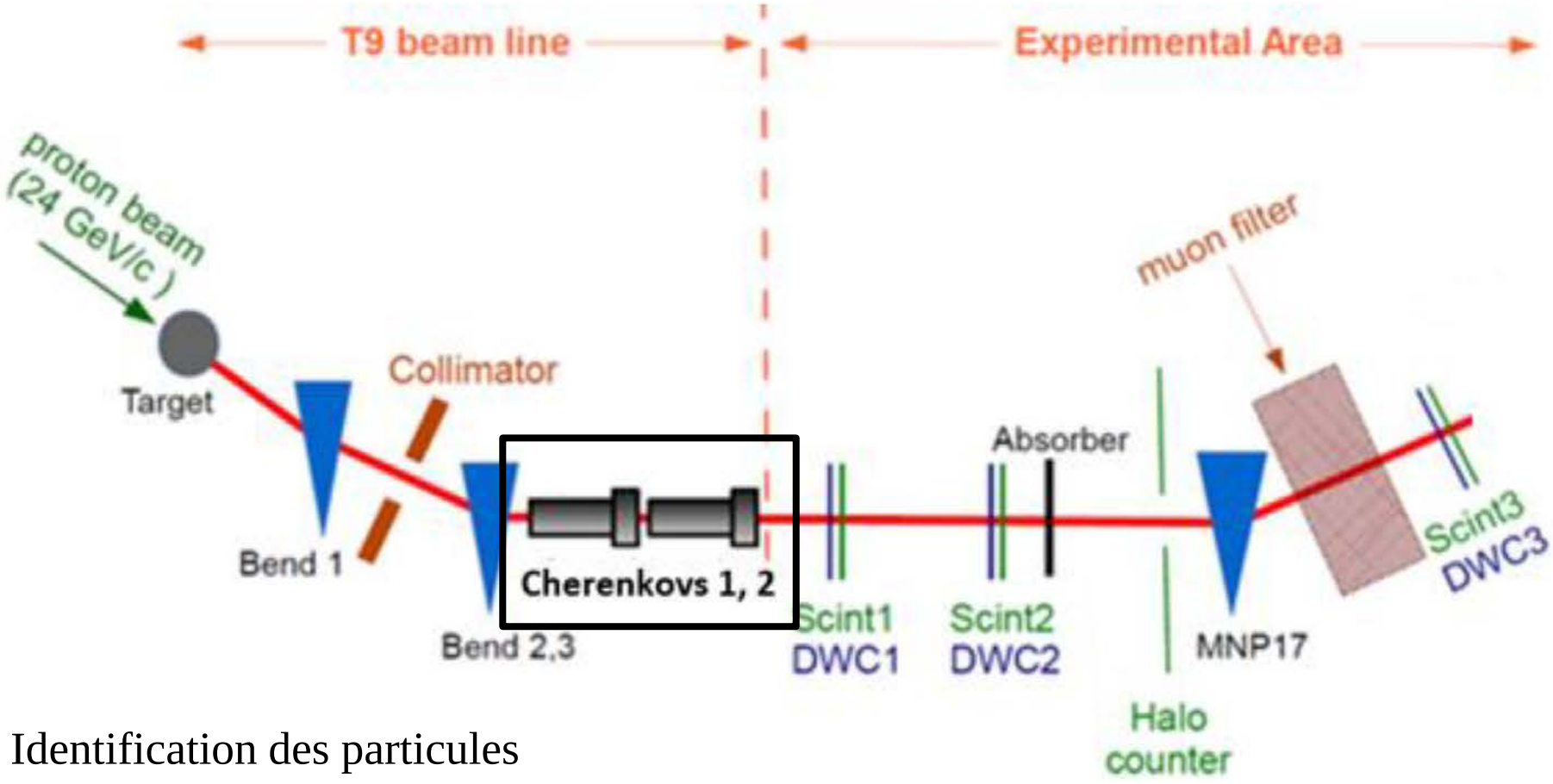
A Beamline for schools



Aimants dipolaires de courbure
→ Choix de l'impulsion des particules

$$p\,[\mathrm{GeV/c}] = 0{,}3 \times B\,[\mathrm{Tesla}] \times R\,[\mathrm{m}]$$

A Beamline for schools



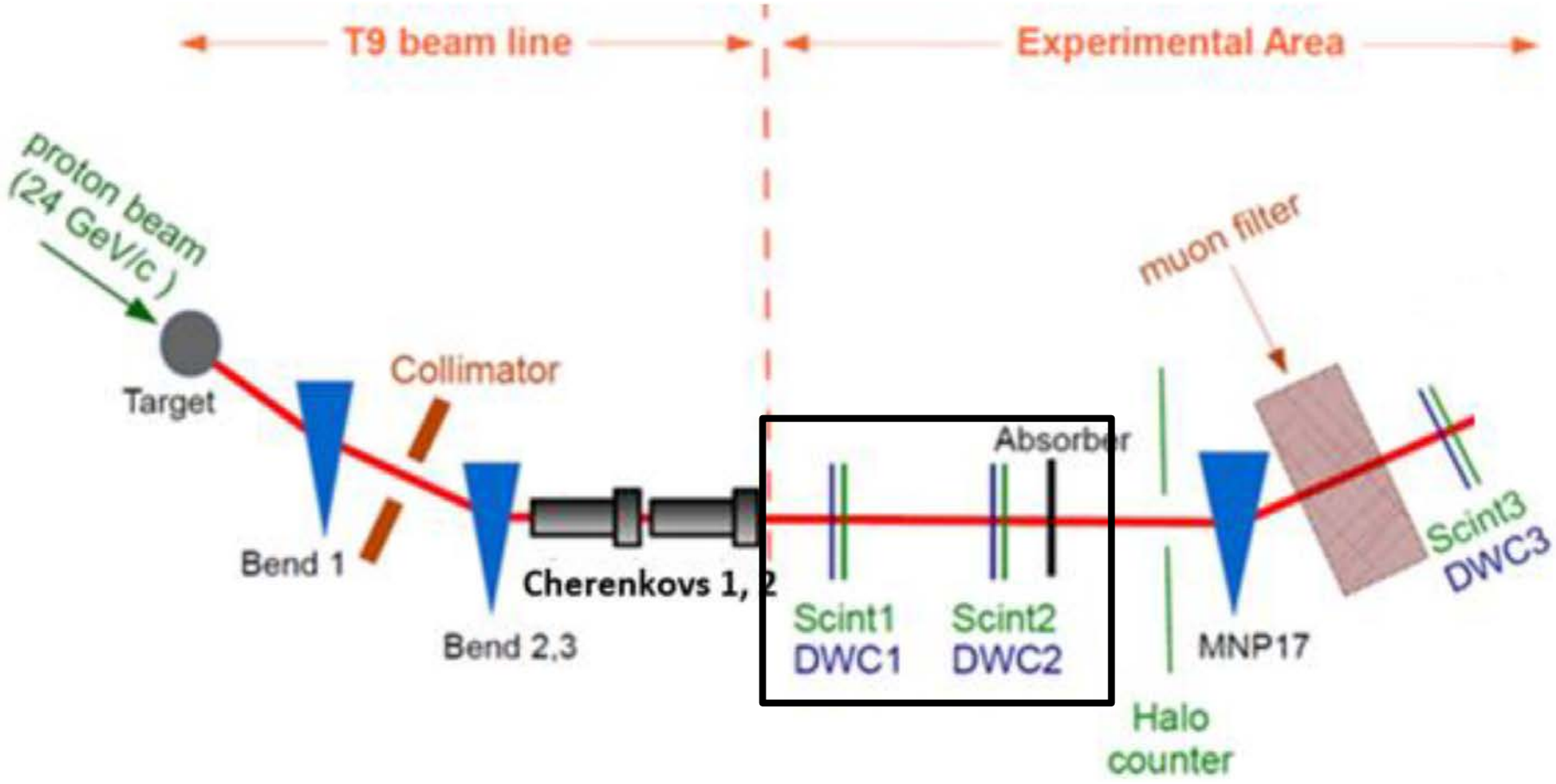
Identification des particules

- Emission cohérente de lumière si v/c > 1/n
- Connaissance de la vitesse et de l'impulsion

  → Masse ⇔ Nature de la particule :

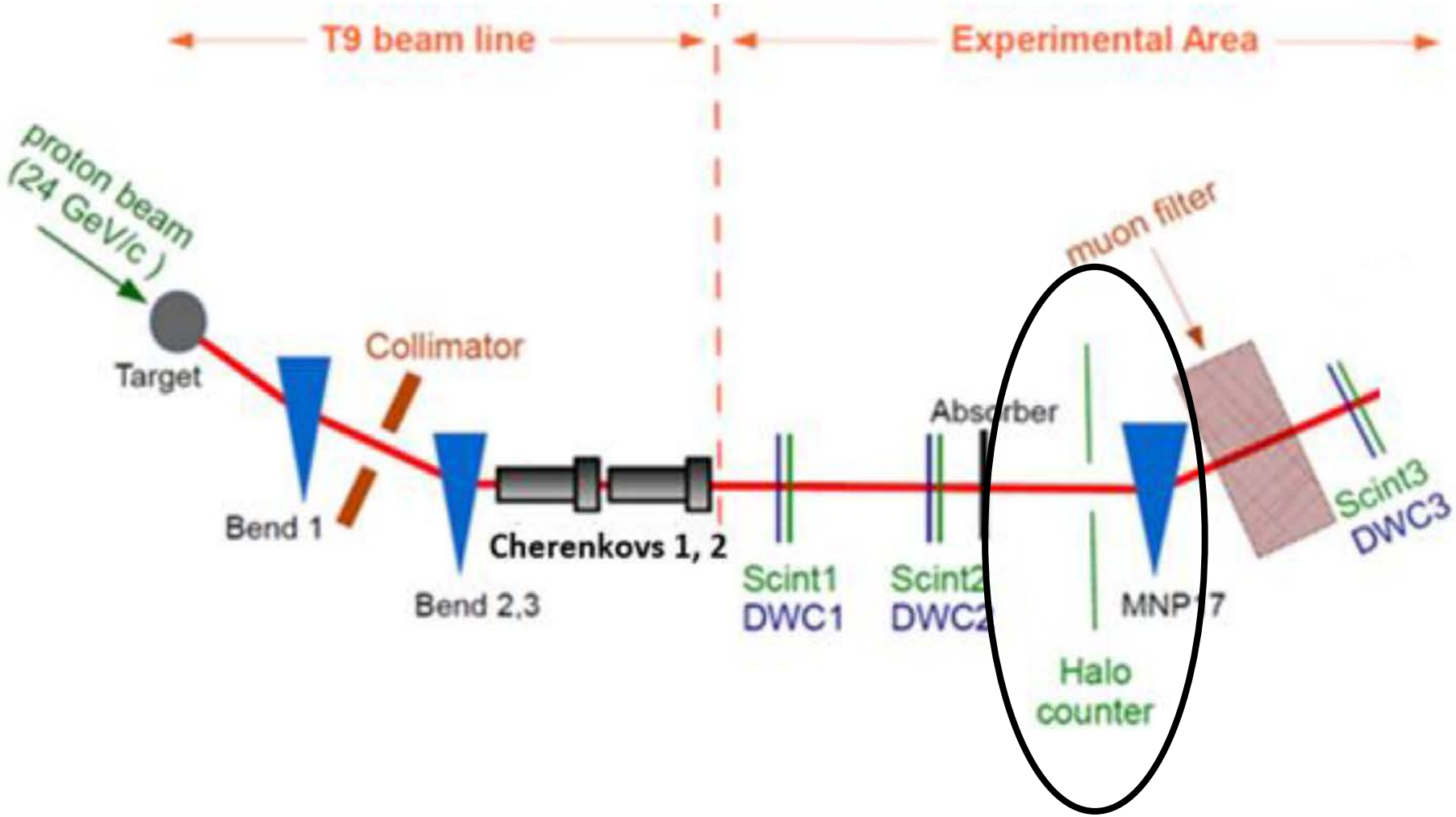
  $m_e < m_\mu < m_\pi < m_K < m_p$

A Beamline for schools



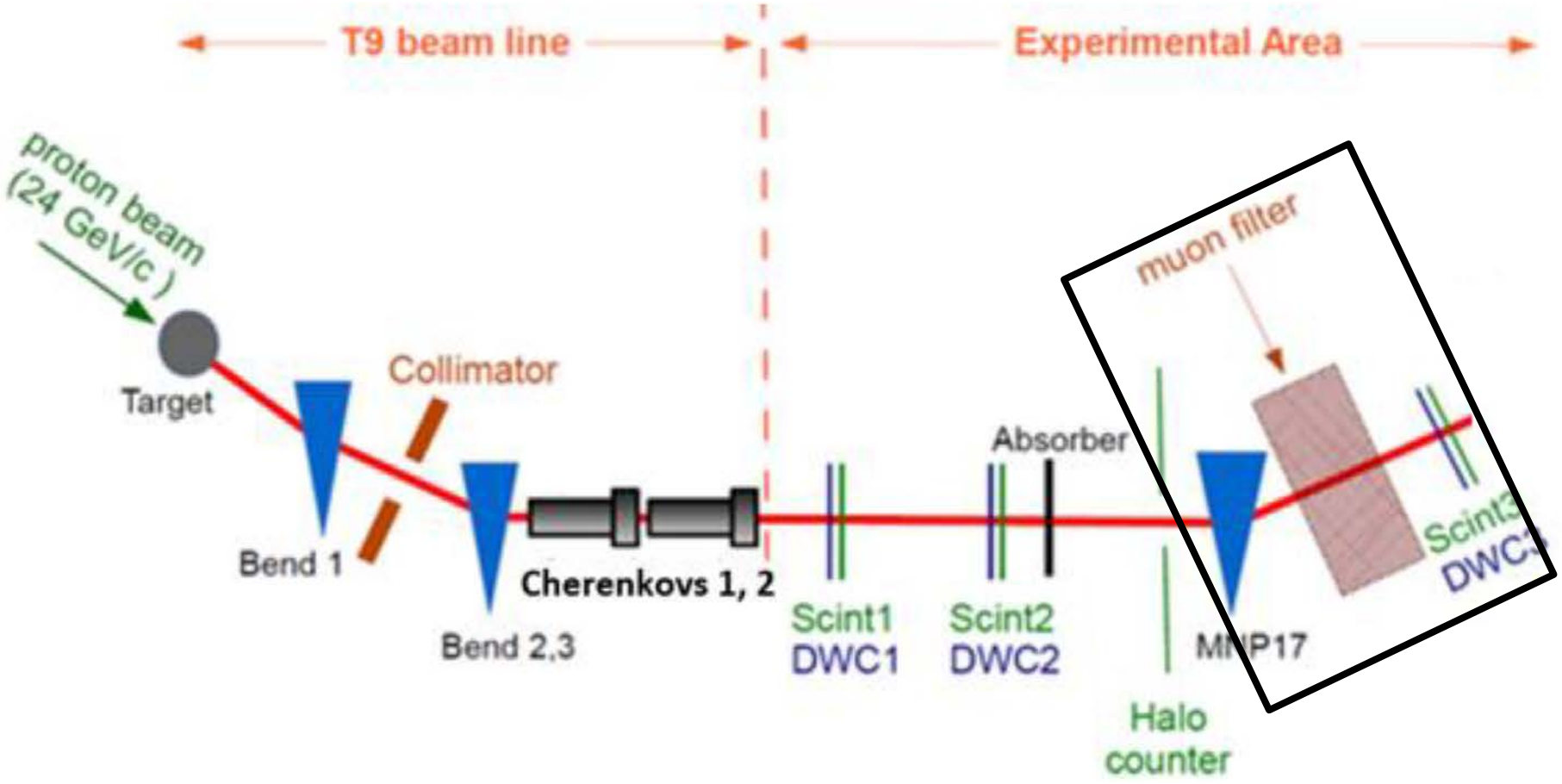
- Scintillateurs : comptage de particules ou système de déclenchement
- DWC : trajectographe – particules chargées

A Beamline for schools



Mesure du « bruit de fond »

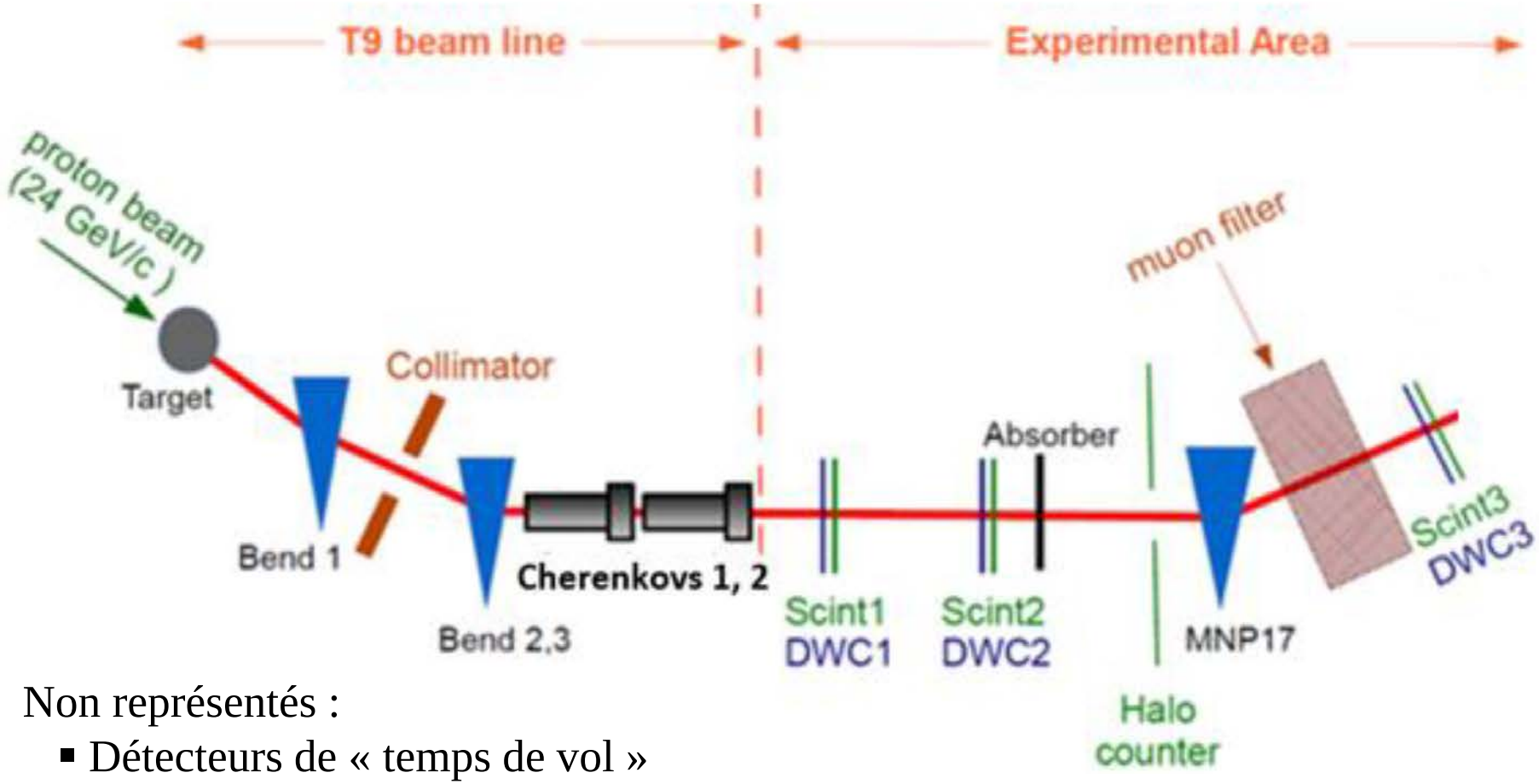
A Beamline for schools



Un « anti-filtre à muons » : ne laisse passer que les muons

- Bloc de fer

A Beamline for schools



Non représentés :

- Détecteurs de « temps de vol »
- Calorimètre
- Autres trajectographes
- Système de déclenchement

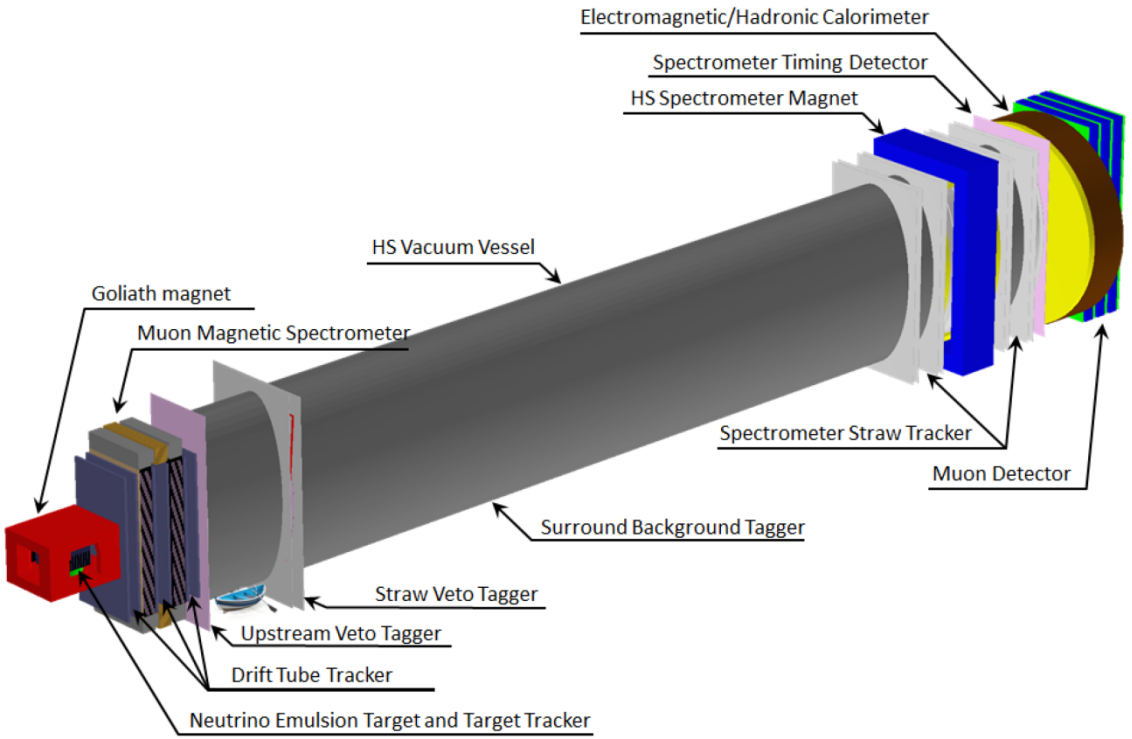
Un projet d'expérience sur cible fixe : SHiP

- SHiP : Search for Hidden Particles – « Recherche de particules cachées »
  - Recherche de particules encore inconnues, à « longue durée de vie », interagissant faiblement et de masses jusqu'à ~10 GeV/c^2
    → Prédites par de nombreuses extensions du Modèle Standard
    → Inaccessibles au LHC
  - Physique des $\nu\tau$ en bonus
  - Au SPS (CERN)

- Tube à vide
  ~60 m de long

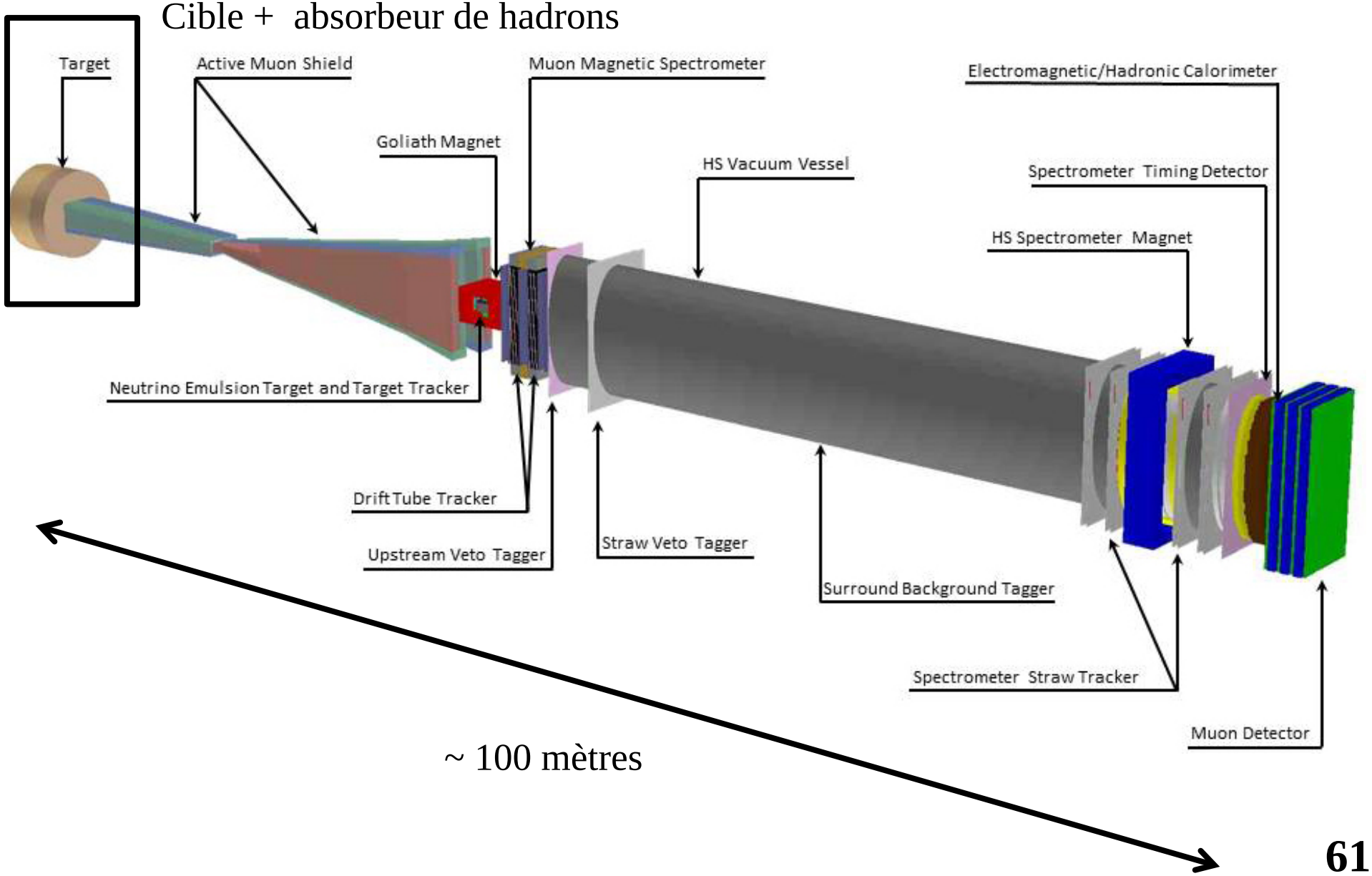
- Objectif :
  - 2×10^{20} POT en 5 ans
  - Par paquets de ~10^{13} p

- ~10^4 $\nu\tau$

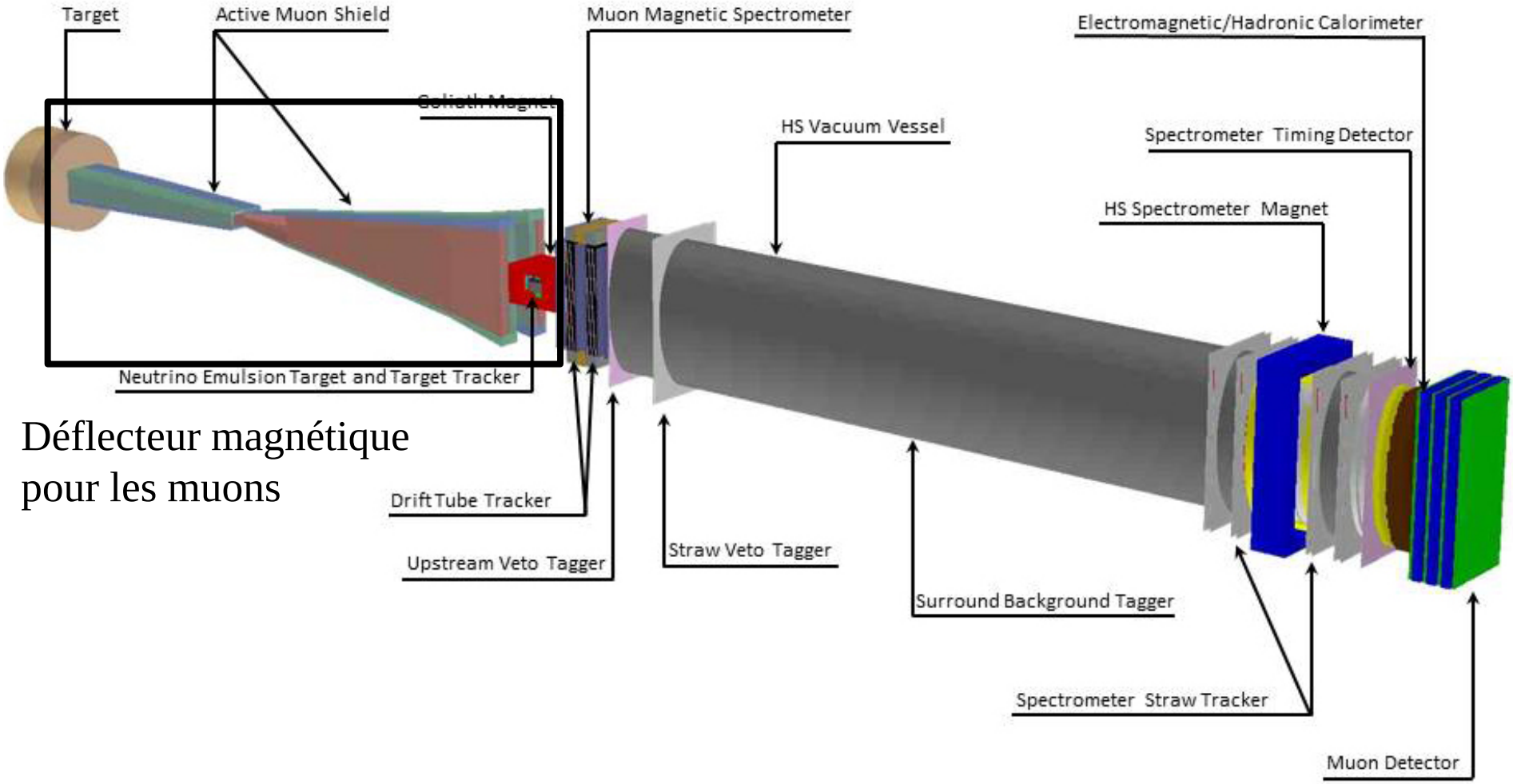


Un projet d'expérience sur cible fixe : SHiP

Cible + absorbeur de hadrons

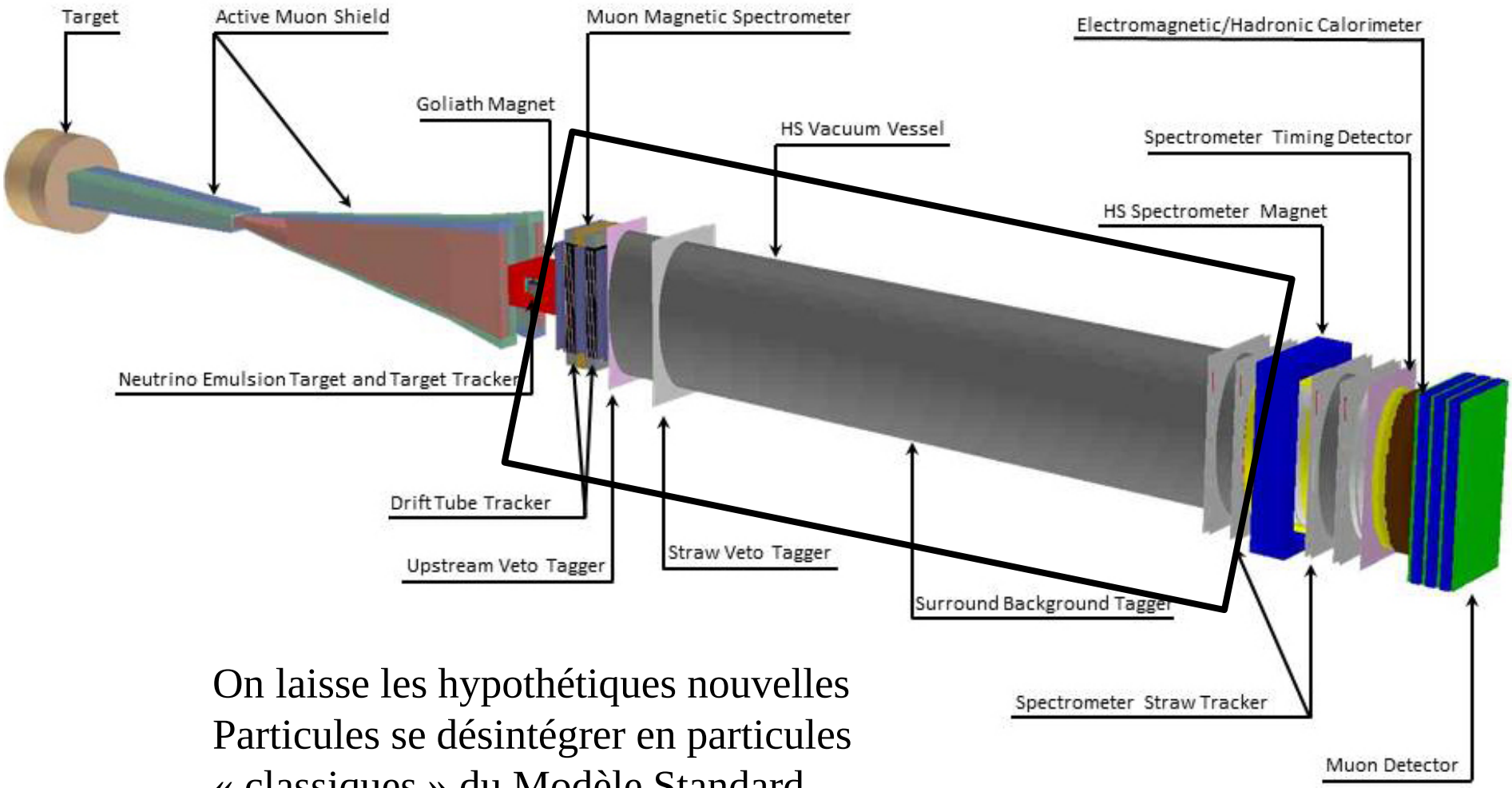


Un projet d'expérience sur cible fixe : SHiP



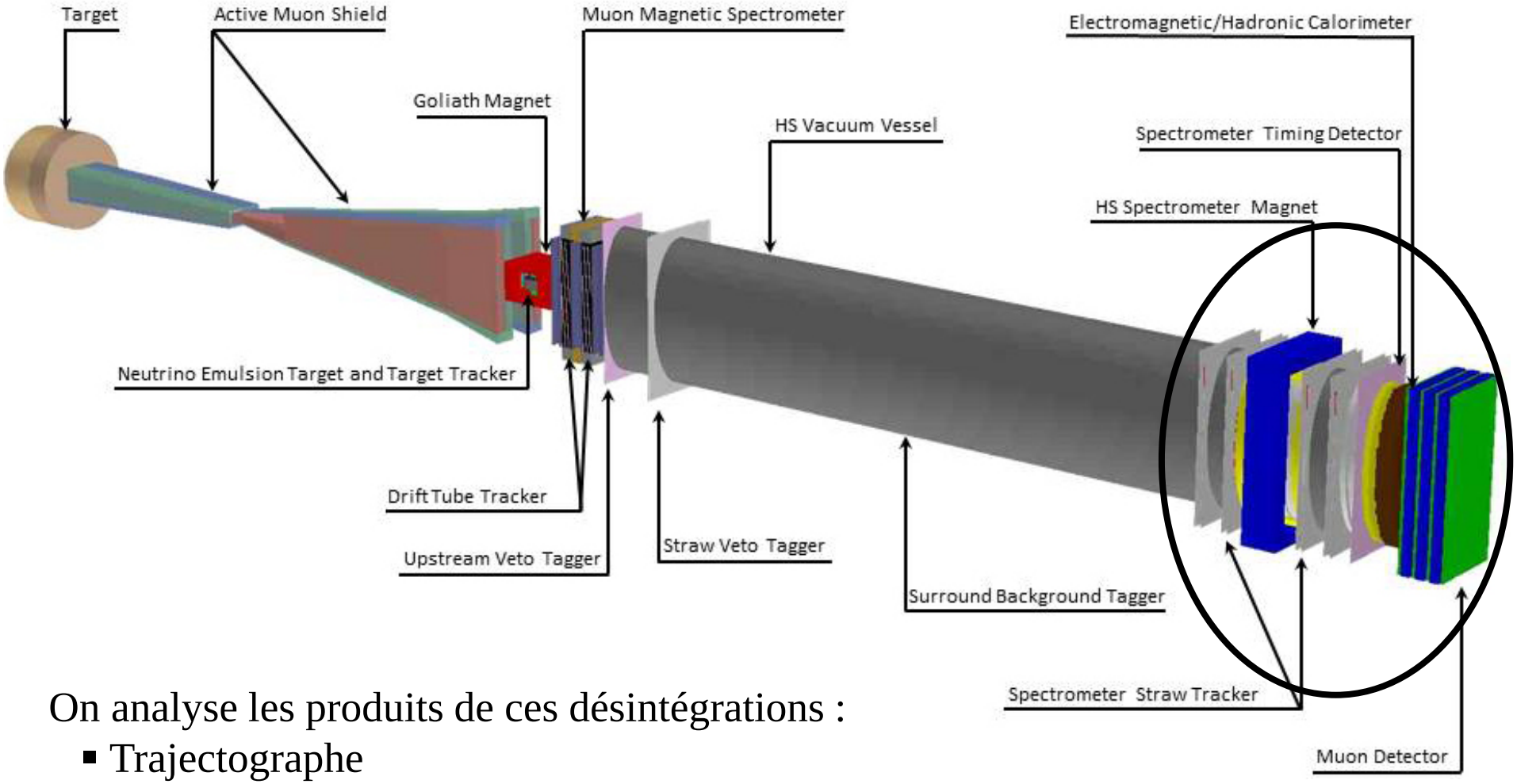
Déflecteur magnétique pour les muons

Un projet d'expérience sur cible fixe : SHiP



On laisse les hypothétiques nouvelles
Particules se désintégrer en particules
« classiques » du Modèle Standard

Un projet d'expérience sur cible fixe : SHiP



On analyse les produits de ces désintégrations :

- Trajectographe
- Calorimètres (électromagnétique et hadronique)
- Détecteur de muons

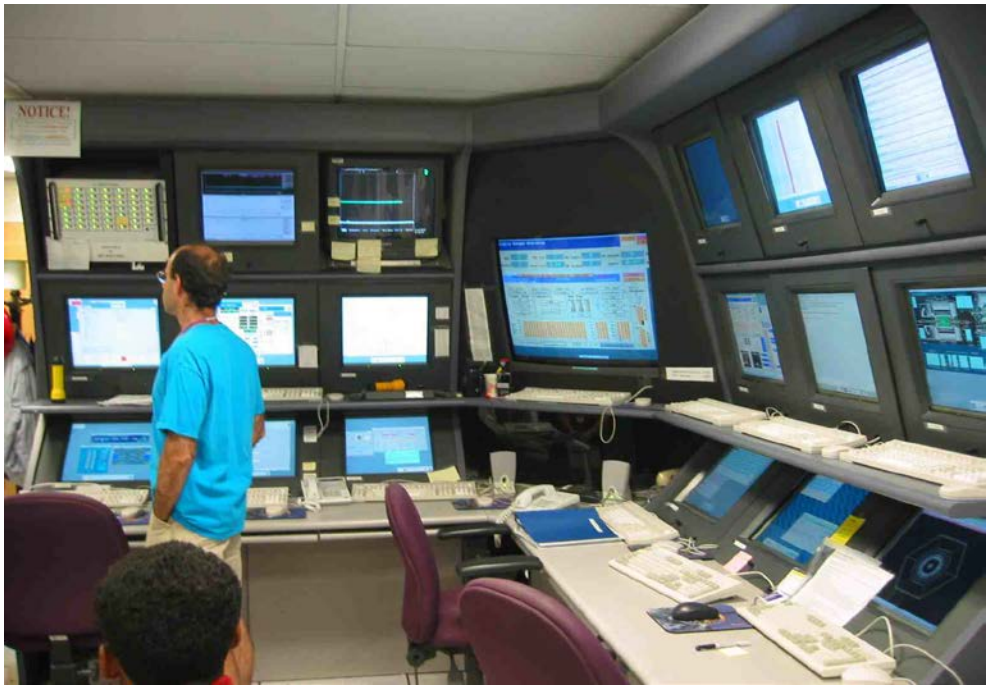
Une expérience vue de l’intérieur

Dans la salle de contrôle de BaBar

- « 3×8 » (minuit – 8h, 8h – 16h, 16h-24h), weekends et jours fériés inclus
- Deux opérateurs côté BaBar
  - un « pilote »
  - un responsable de la qualité des données – monitorage temps réel

  + « liaison » dans la salle de contrôle de l'accélérateur (« MCC ») si besoin

    Exemple : redémarrage de la machine après un arrêt prolongé



- Plutôt 4-5 personnes côté accélérateur – plus dans la journée en semaine

En salle de contrôle

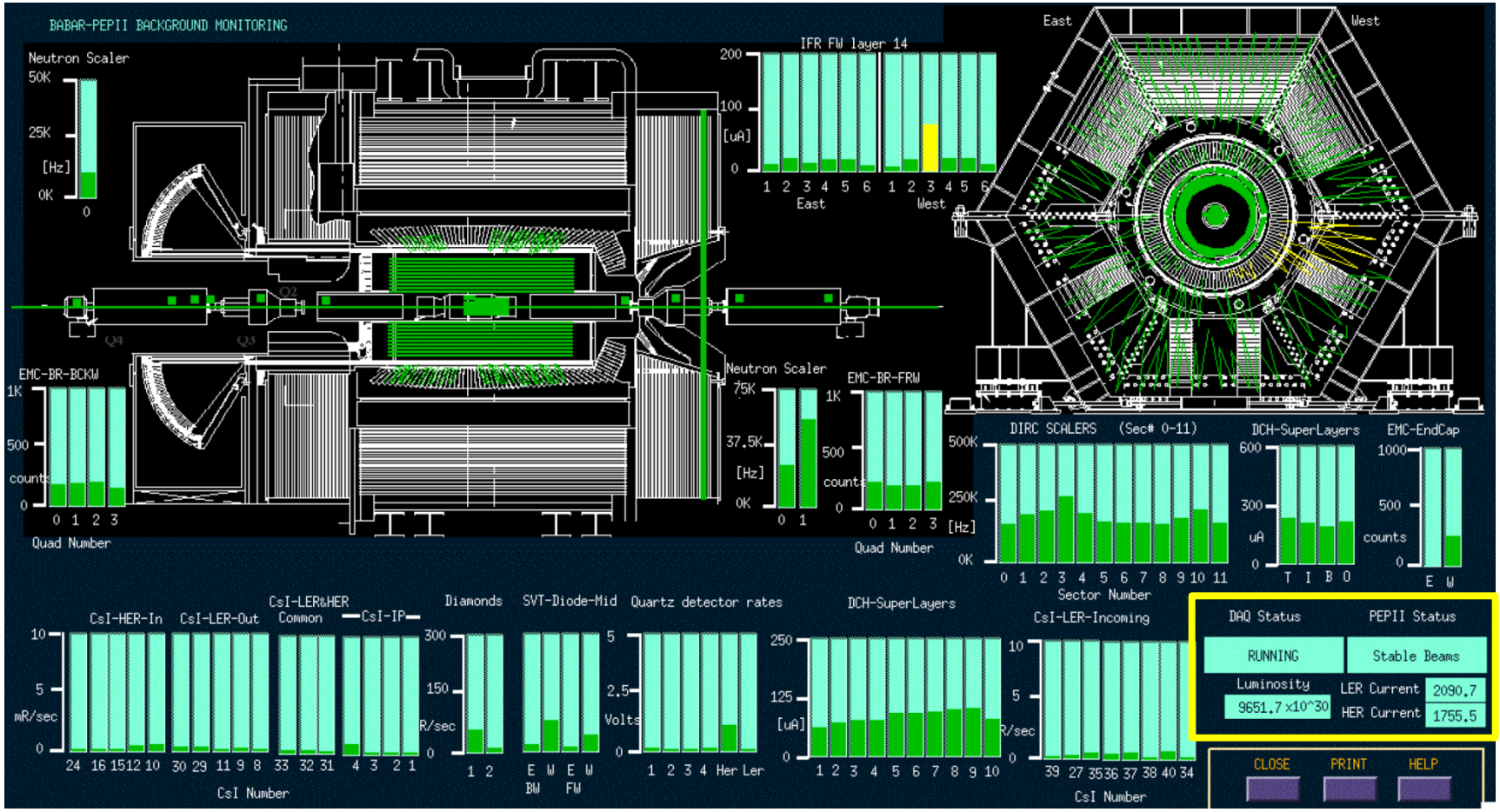
- Automatisation/Simplification de la plupart des procédures
  - De plus en plus vrai avec le temps
- Entrainement des opérateurs
  - Cours, manuels, instructions – court terme et long terme
- Deux « Run Coordinators »
- Experts d'astreinte
  - Un par système, liste à jour
  → En cas d'urgence, présence en salle de contrôle sous ~15'
  - 3-6 mois en moyenne
  - Activité « d'intérêt général »
- Second niveau d'experts si besoin
  - Plus « seniors » et rôle à plus long terme
- Acronyme de trois lettres pour chaque système

En salle de contrôle

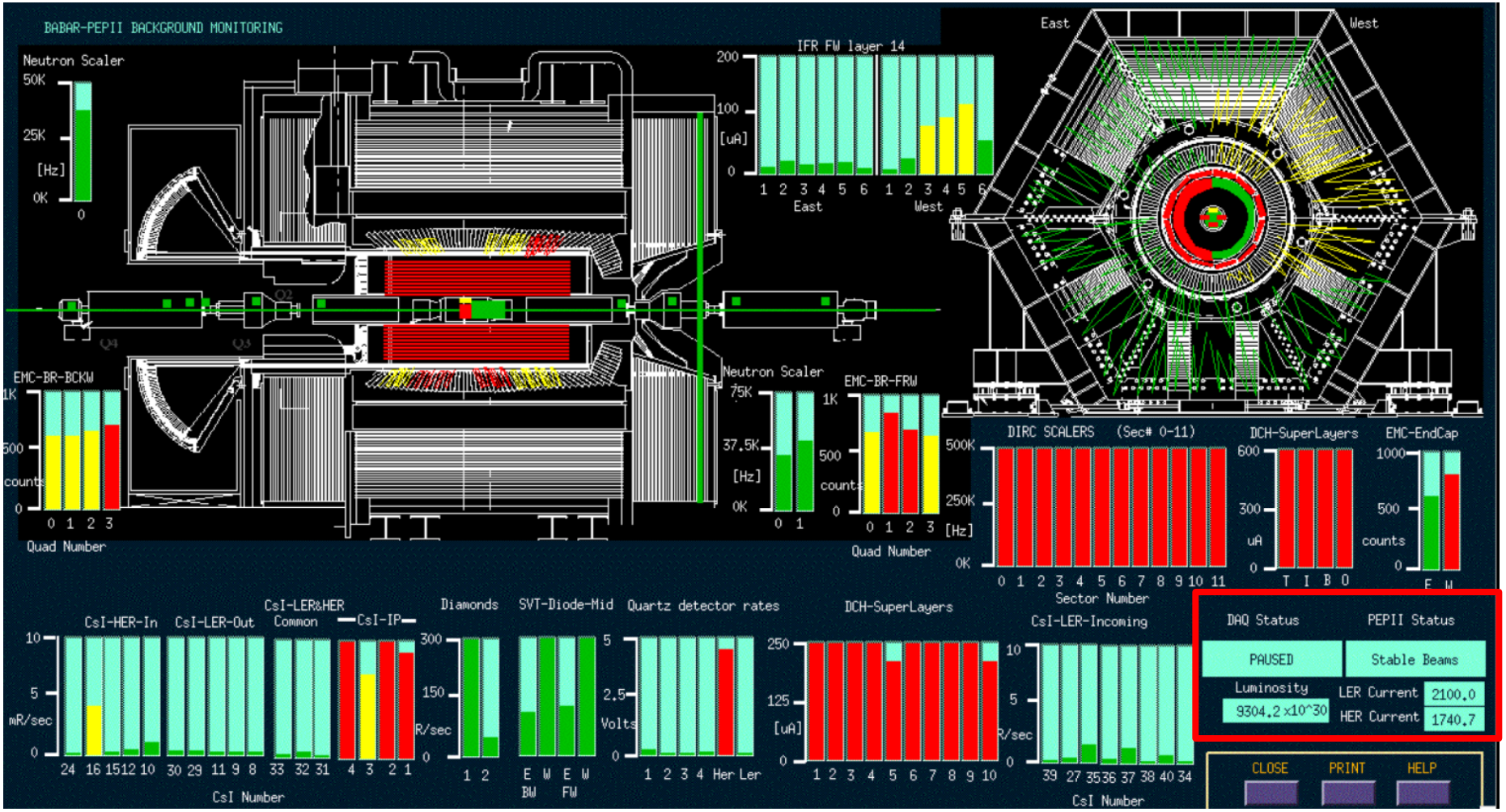
- Liaison téléphonique avec la salle de contrôle de l'accélérateur
  - Le statut de l'accélérateur guide celui du détecteur
- E-journal de bord accessible par le web
  - Mélange de données ajoutées automatiquement et d'infos des opérateurs
- Client graphique donnant accès en temps réel à l'état du détecteur
- De nombreuses réunions chaque jour (BaBar ou BaBar + PEP-II)
  - 7h30, 8h, 15h45

Le calme …

- Ecran rafraichi en temps réel
- Emplacements des points de mesure et niveaux mesurés (code de couleurs)

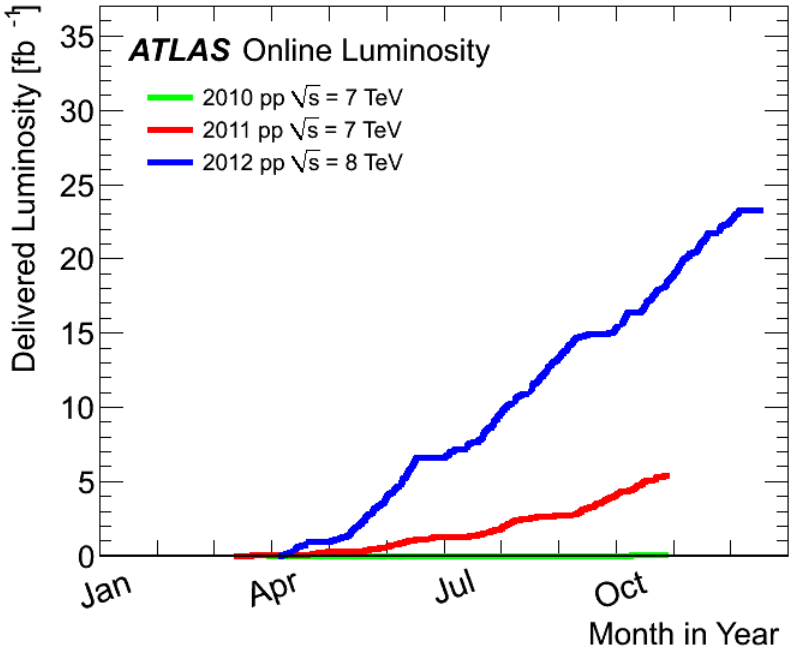


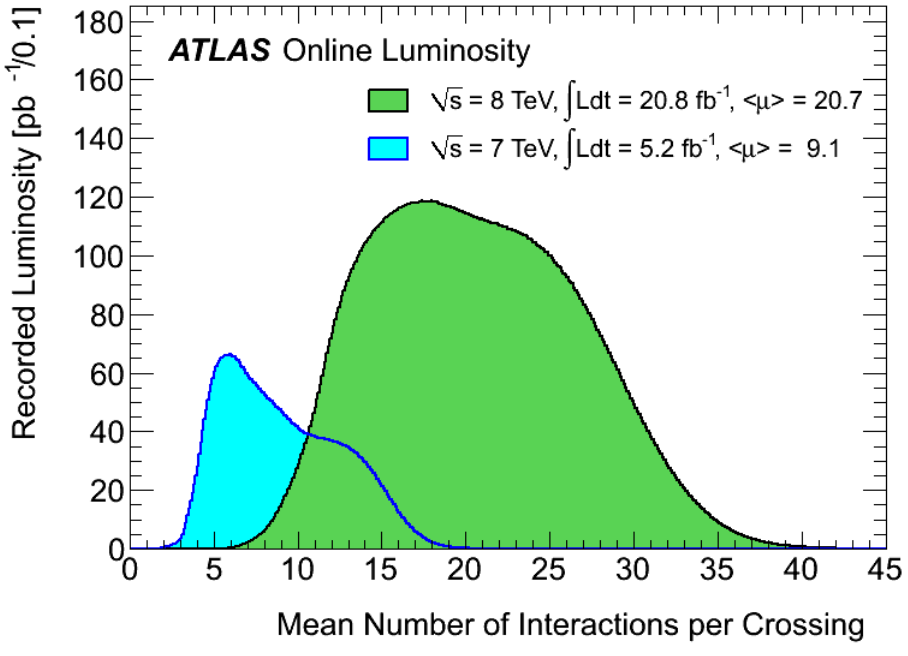
Une tempête …


BABAR-PEPII BACKGROUND MONITORING
Neutron Scaler
50K
25K
[Hz]
0K
0
IFR FW layer 14
200
100
[uA]
0
1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6
East
West
East
West
EMC-BR-BCKW
1K
500
counts
0
0 1 2 3
Quad Number
Neutron Scaler
75K
37.5K
[Hz]
0K
0 1
EMC-BR-FRW
1K
500
counts
0
0 1 2 3
Quad Number
DIRC SCALERS (Sec# 0-11)
500K
250K
[Hz]
0K
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
Sector Number
DCH-SuperLayers
600
300
uA
0
T I B O
EMC-EndCap
1000
500
counts
0
F W
CsI-HER-In
CsI-LER-Out
CsI-LER&HER Common
CsI-IP
10
5
mR/sec
0
24 16 15 12 10 30 29 11 9 8 33 32 31 4 3 2 1
CsI Number
Diamonds
300
150
R/sec
0
1 2
SVT-Diode-Mid
5
2.5
Volts
0
E W E W
BW FW
Quartz detector rates
1 2 3 4 Her Ler
DCH-SuperLayers
250
125
[uA]
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
CsI-LER-Incoming
10
5
R/sec
0
39 27 35 36 37 38 40 34
CsI Number
DAQ Status
PEPII Status
PAUSED
Stable Beams
Luminosity
9304.2 x10^30
LER Current
2100.0
HER Current
1740.7
CLOSE
PRINT
HELP

Performances du 1er Run du LHC (2010-2012)

Parameter	2010	2011	2012	design value
Beam energy	3.5	3.5	4	7
β^* in IP 1 and 5 (m)	2.0/3.5	1.5/1.0	0.6	0.55
Bunch spacing (ns)	150	75/50	50	25
Max. number of bunches	368	1380	1380	2808
Max. bunch intensity (protons per bunch)	1.2×10^{11}	1.45×10^{11}	1.7×10^{11}	1.15×10^{11}
Normalized emittance at start of fill (mm mrad)	≈2.0	≈2.4	≈2.5	3.75
Peak luminosity ($cm^{-2}s^{-1}$)	2.1×10^{32}	3.7×10^{33}	7.7×10^{33}	1×10^{34}
Max. mean number of events per bunch crossing	4	17	37	19
Stored beam energy (MJ)	≈28	≈110	≈140	362





Run 2 du LHC : 2015-2018

- Collisions à 13 TeV (8 TeV en 2012)
- Paquets séparés de 25 ns (50 ns en 2012)

} « Nouvelle » machine

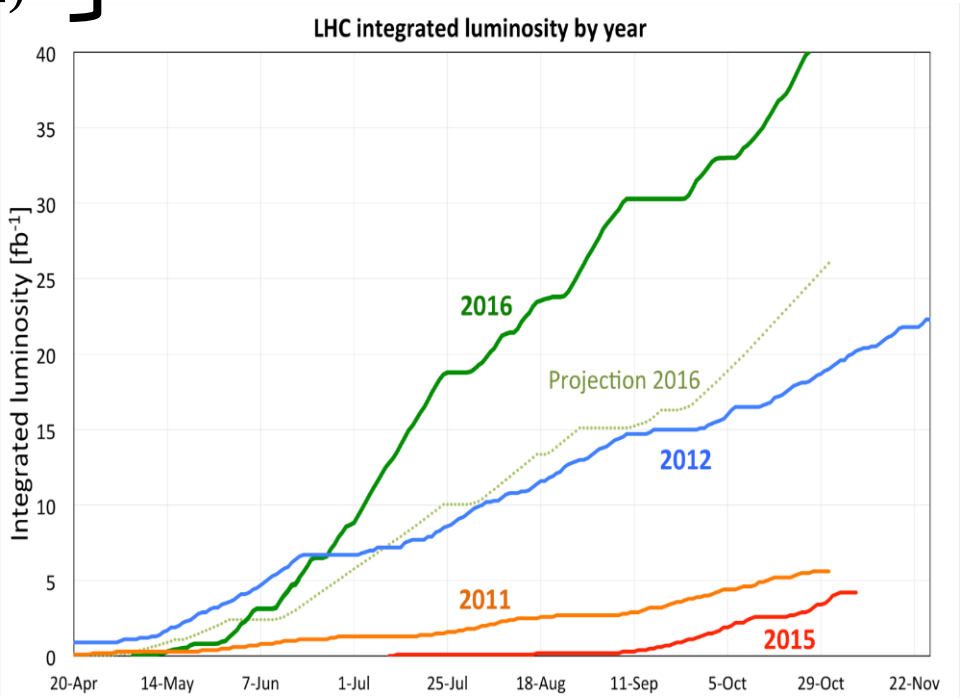
→ 2015 : année de « rôdage »
  - Peu de données accumulées

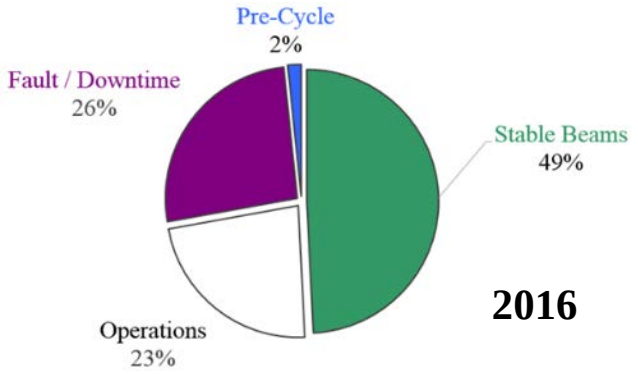
→ 2016 : excellente cuvée
  - L'apprentissage de 2015 a payé !

- Toujours pas de nouvelle physique à l'horizon …

- Arrêt hivernal jusqu'à fin mars
  - Maintenance + jouvence de certaines installations du complexe accélérateur

- Reprise des collisions au printemps 2017

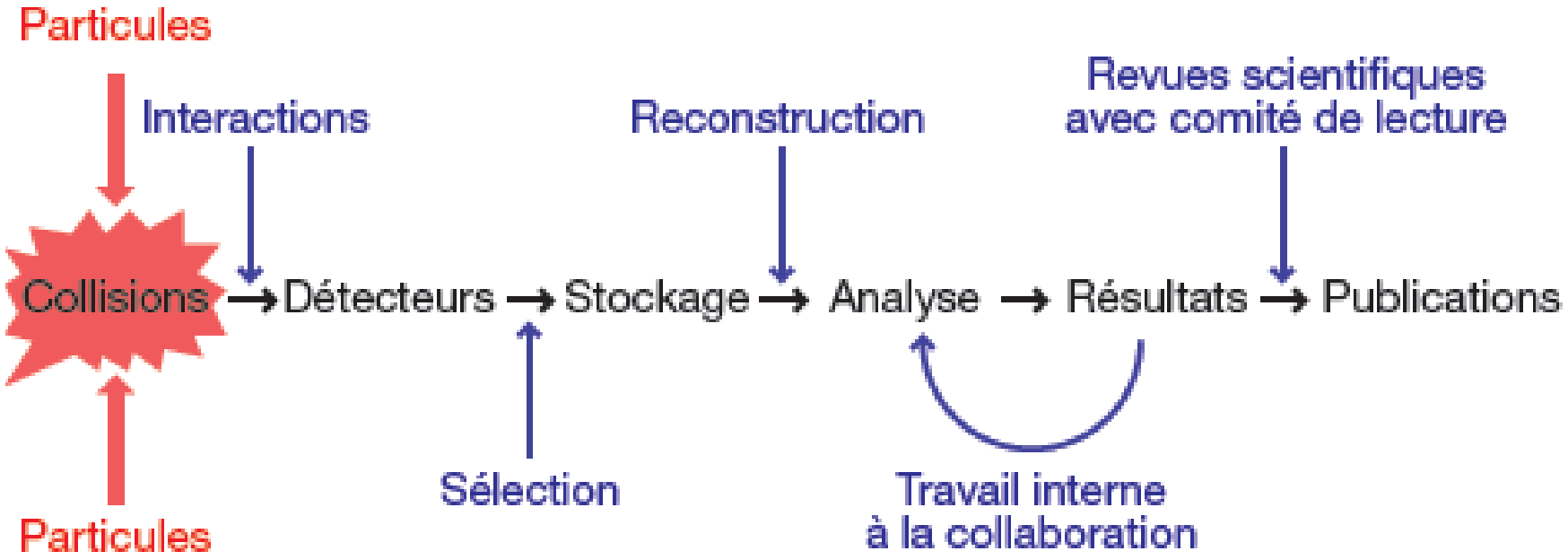




2016

Comment analyser les données ?

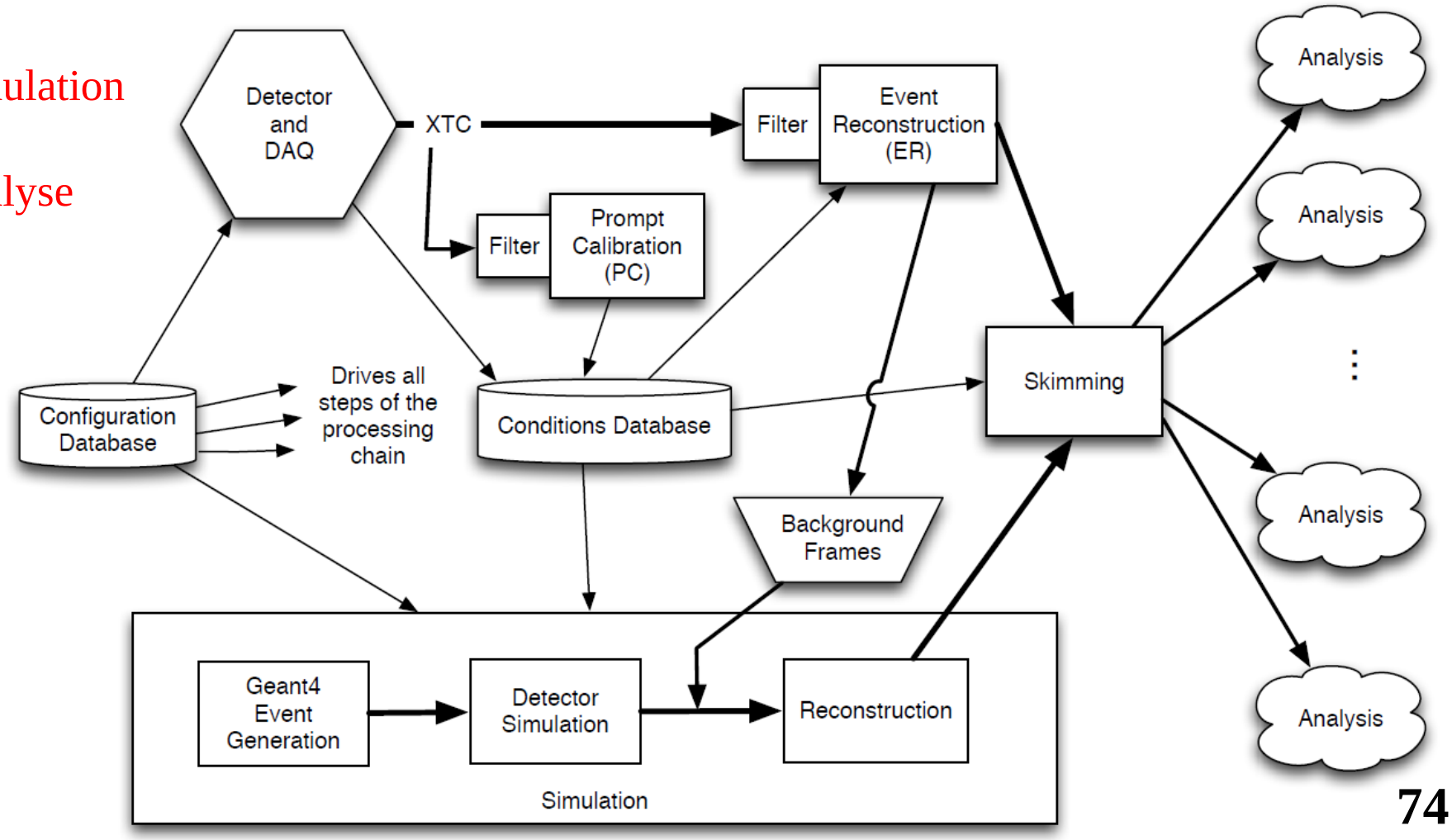
- Schéma suivi par une analyse typique :



- Utilisation intensive d'ordinateurs pour
  - accéder/utiliser les données enregistrées
  - simuler le comportement du détecteur lors du passage des particules étudiées
- Mise en œuvre de méthodes mathématiques sophistiquées pour obtenir les résultats les plus précis possibles et tester leur validité
- La « maturation » d'un résultat peut prendre une année voire plus

Du détecteur aux résultats de physique

- Acquisition
- Reconstruction
- Simulation
- Analyse



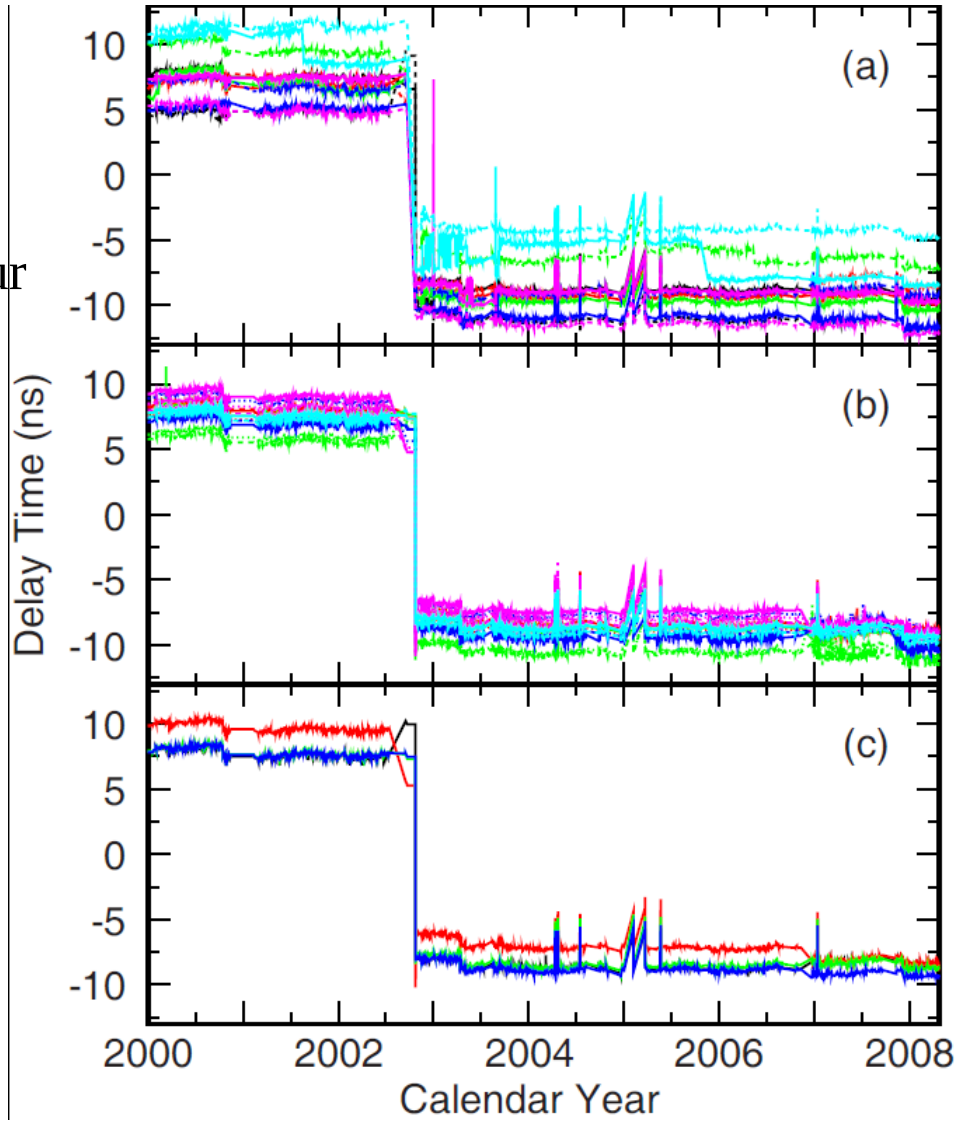
Exemple de calibration

- Suivi des variations du « temps de réponse » du DIRC
  - ns – échelle verticale arbitraire

- Trois niveaux de granularité différents
  (a) les 12 secteurs du DIRC
  (b) les 14 cartes d'acquisition d'un secteur
  (c) les 4 circuits séparés sur une carte

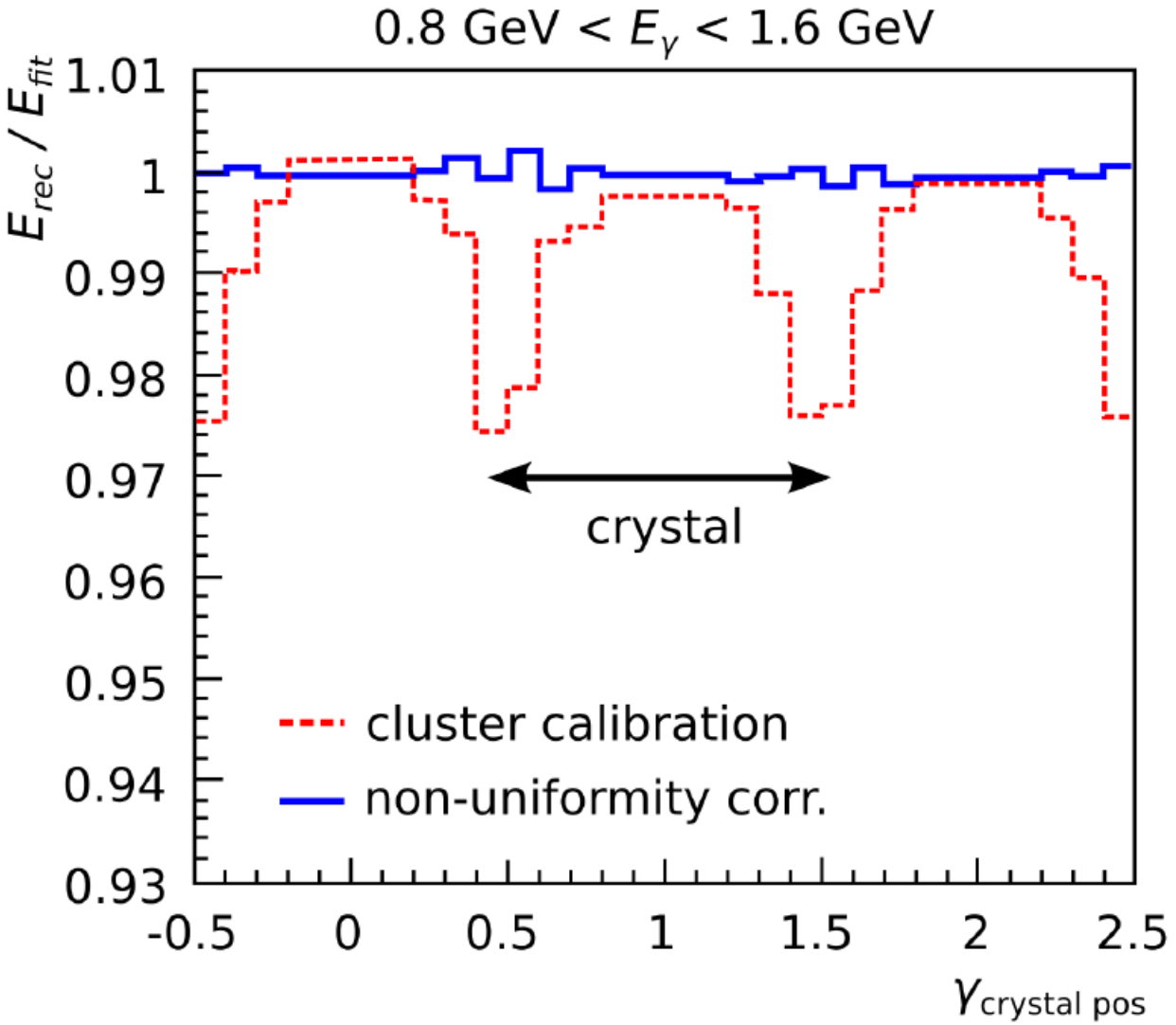
- Changement « visible » de toute l'électronique du DIRC fin 2002.

- Calibration effectuée en quelques minutes, environ une fois par jour entre deux remplissages de PEP-II
  → Inclue dans la calibration de l'ensemble du détecteur



Exemple de correction

- Les (petits) interstices entre cristaux du calorimètre conduisent à une perte d'énergie
  - Corrigée !



Techniques d'analyse

- Outils mathématiques et statistiques très puissants
  - Méthode du maximum de vraisemblance pour déterminer le meilleur jeu de paramètres du modèle utilisé pour décrire les données
  - Analyses multi-variables

    → Discriminant de Fisher, réseaux de neurones

    + méthodes plus récentes (arbres de décision, etc.)

- On sépare les données en autant d'espèces que nécessaire
  - Signal (signaux) et bruits de fond

- On cherche des variables discriminantes qui permettent de reconnaître et de séparer ces différentes catégories

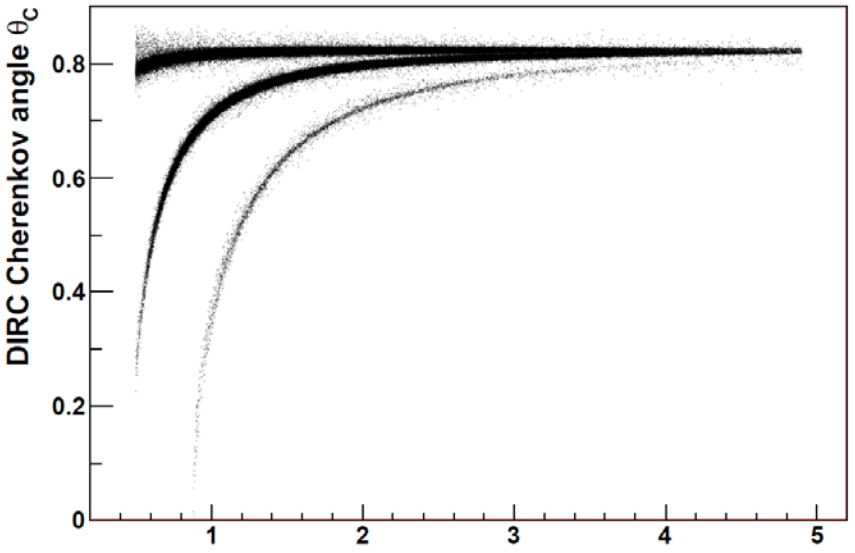
- On les combine de manière « optimale »

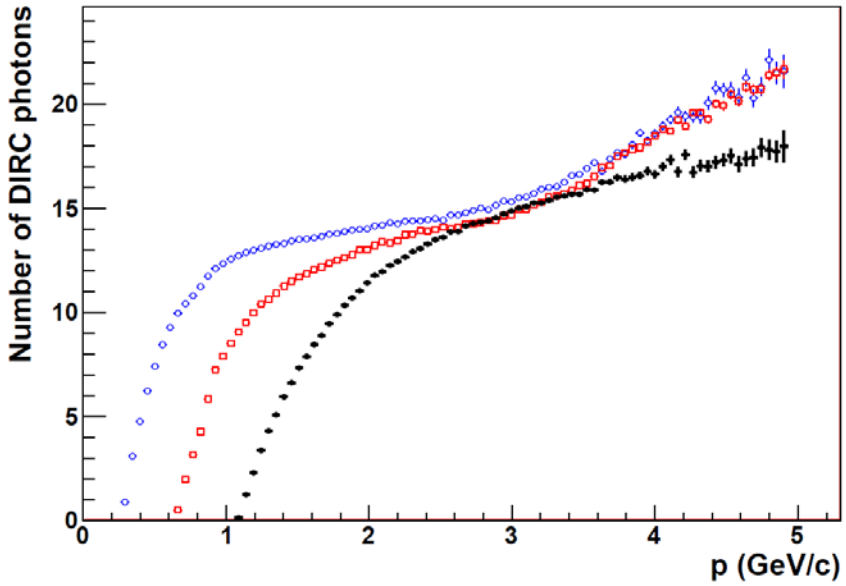
→ Au niveau de la reconstruction, on obtient des « sélecteurs » qui fournissent des listes de « candidats » (des kaons, des muons, etc.) selon des critères bien établis. On « assemble » ensuite ces candidats pour reconstruire la ou les désintégrations étudiées.

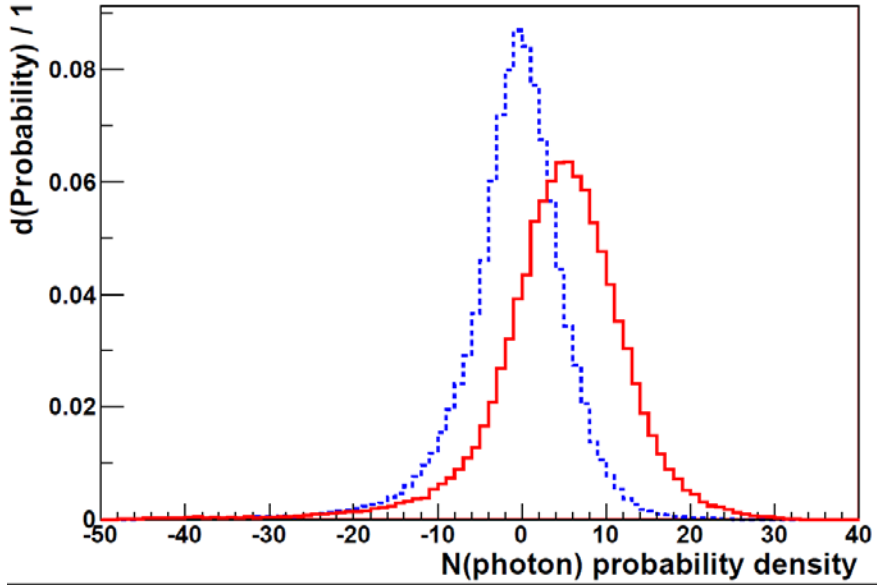
Rôle clef de la simulation

Exemple de variables discriminantes

- Séparation pions / kaons / protons dans un sous-détecteur du détecteur BaBar à SLAC







Un « sélecteur » académique

- Deux catégories c_1, c_2
- Un algorithme « idéal » retourne une variable gaussienne de moyenne μ_1 (μ_2) et d'écart type s pour la catégorie c_1 (c_2) : LH_1 (LH_2)
- σ, commun aux deux distributions quantifie l'écart entre les deux distributions :

$$\kappa = (\mu_1 - \mu_2)/\sigma$$

- Pour choisir à quelle catégorie appartient un événement donné on forme le quotient :

$$LHR = LH_1 / (LH_1 + LH_2)$$

- Les événements de la catégorie c_1 (c_2) « piquent » à LHR = 1 (0)
- On choisit un seuil τ dans l'intervalle [0;1] et on « décrète » :
  - $LHR < \tau \Rightarrow$ l'événement appartient à la catégorie c_2
  - $LHR > \tau \Rightarrow$ l'événement appartient à la catégorie c_1

$\rightarrow$ Questions :

- Quelle est la probabilité ε d'identifier correctement un élément de c_2 ?
- Quelle est la probabilité ν de prendre un classer un élément de c_1 dans c_2 ?

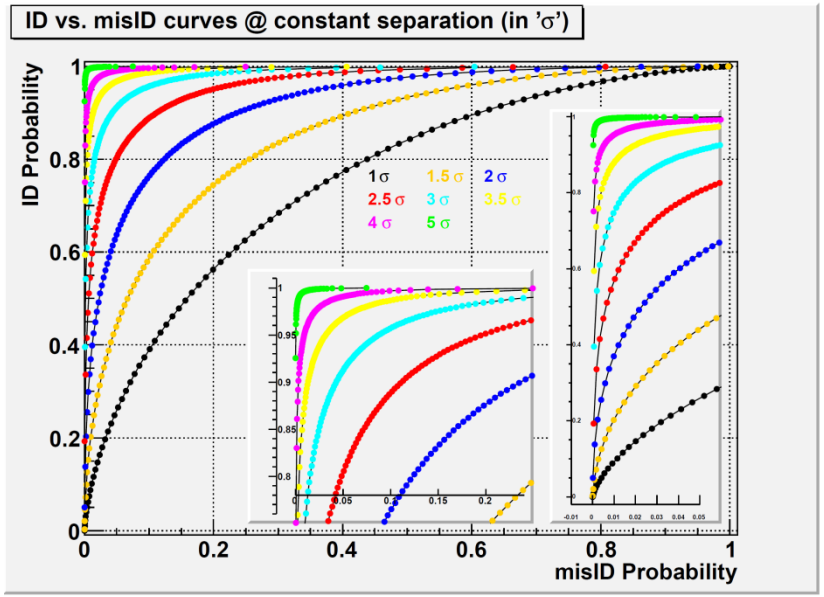
Un « sélecteur » académique

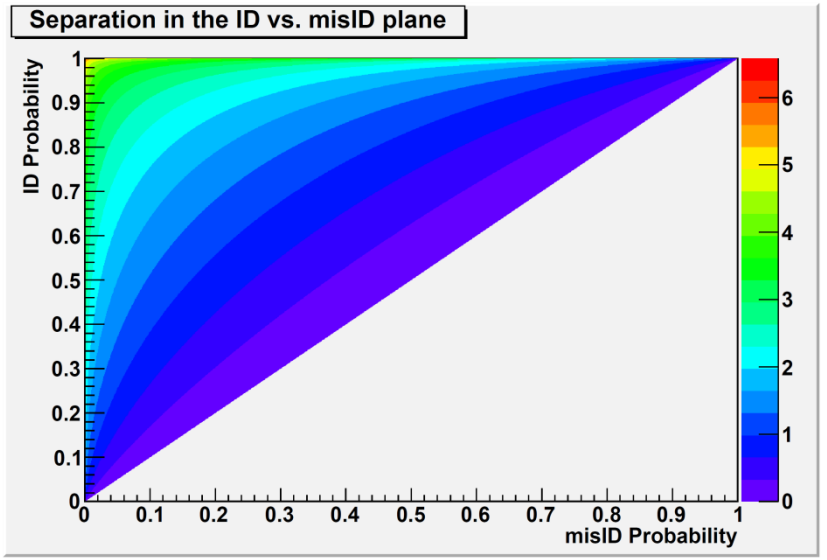
- Réponses : il existe une correspondance biunivoque entre (ε,ν) et (κ,τ)
  - Posant $\lambda := \ln\left(\frac{1-\tau}{\tau}\right)$, on a :

$$\begin{cases} \epsilon &= \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left[-\frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\kappa+\frac{2\lambda}{\kappa}\right)\right] \\ \eta &= \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left[\frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\kappa-\frac{2\lambda}{\kappa}\right)\right] \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} \kappa &= \sqrt{2}\left[\mathrm{erfc}^{-1}(2\eta)-\mathrm{erfc}^{-1}(2\epsilon)\right] \\ \lambda &= \left[\mathrm{erfc}^{-1}(2\epsilon)-\mathrm{erfc}^{-1}(2\eta)\right]\left[\mathrm{erfc}^{-1}(2\epsilon)+\mathrm{erfc}^{-1}(2\eta)\right] \end{cases}$$

Où erfc est la fonction d'erreur gaussienne complémentaire

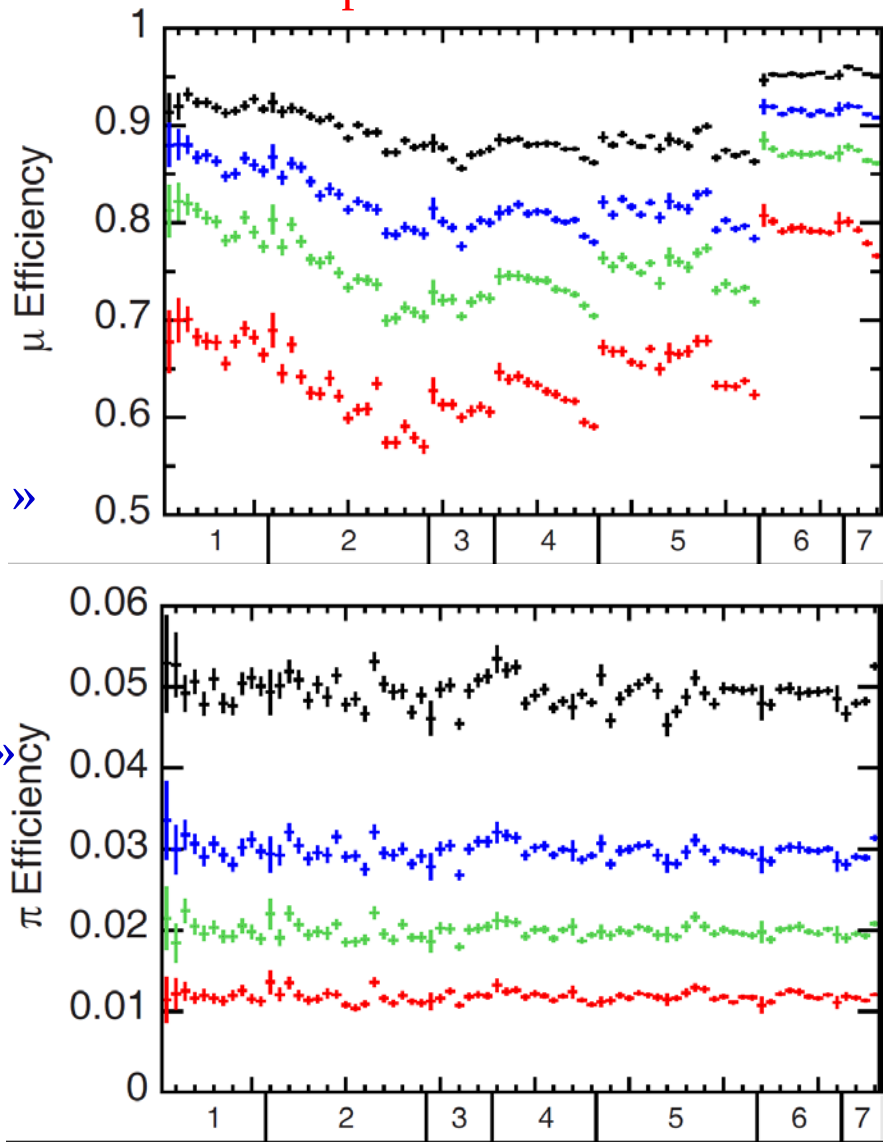
- Avec des courbes :





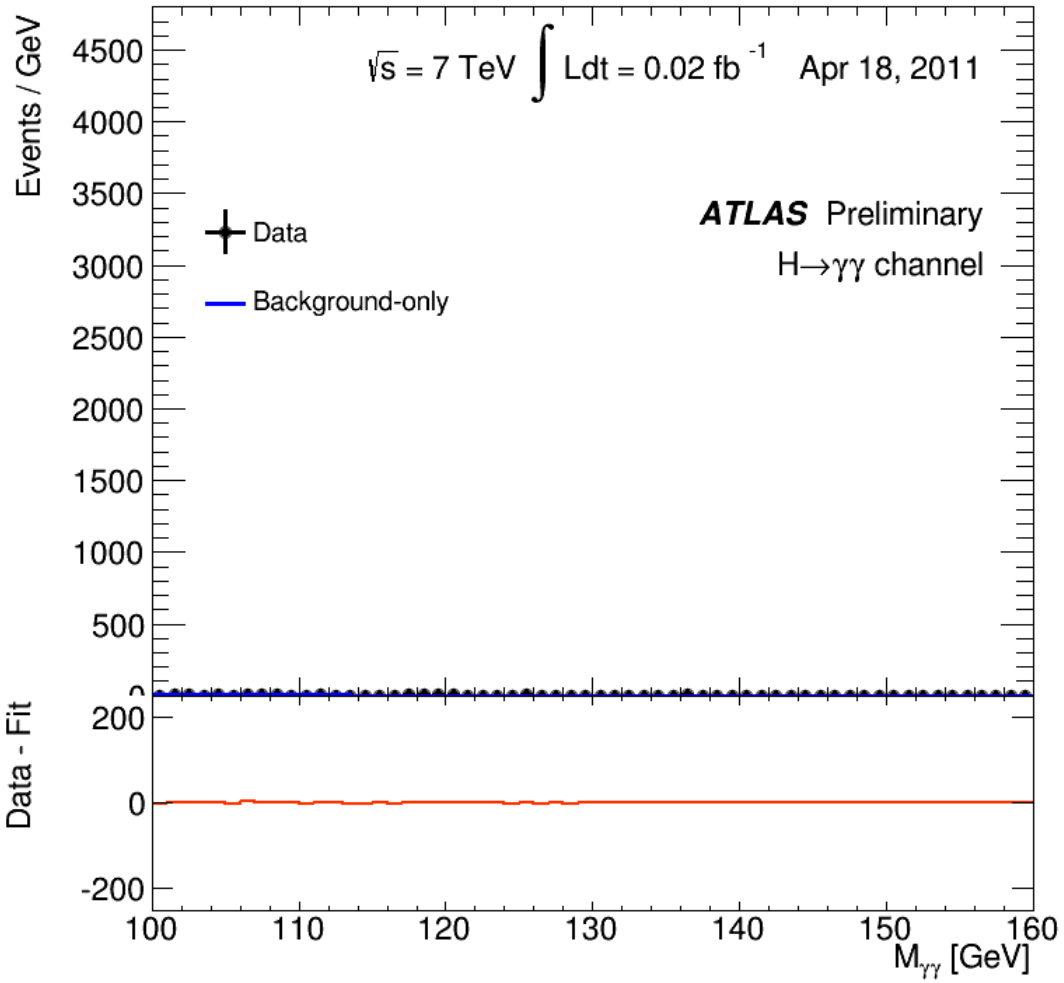
Un vrai « sélecteur »

- Identification de muons à taux de mauvaise identification de pions fixé
- Pour les Runs 1 à 7
- Quatre pourcentages constants de mauvaise identification de pions (pris pour des muons)
- La variation de l'efficacité de détection des muons en fonction du temps reflète la « saga » des détecteurs à muons dans BaBar
- Notion de « séparation » entre deux catégories exprimée en « nombre de sigmas »
  - Exemples : μ/π dans l'IFR
    ou K/π dans le DIRC



La puissance de la statistique à l'œuvre !

- Le signal laissé par « un » boson de Higgs sort peu à peu du bruit de fond …



- … à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

Expériences sur les neutrinos

Neutrinos

- 3 types – ou « saveurs »
  - Associés chacun à un lepton chargé : électron, muon, tau
- Prédiction théorique : Pauli, 1930
  - Pour résoudre l'absence apparente de conservation de l'énergie dans les désintégrations β
- Découvertes expérimentales
  - νe : 1956 νμ : 1962 ντ : 2000
- Très faible interaction avec la matière
  - Détection – et donc étude – très difficile
    - → Particules invisibles dans un détecteur comme ATLAS ou CMS
    - → Interaction au sein d'un grand volume de matière : production du lepton chargé associé qui est, lui, détecté
- Questions ouvertes
  - Masses des neutrinos ?
  - Neutrino = antineutrino ?
  - Neutrinos stériles ?

} Sujets d'étude actuellement très porteurs

Sources de neutrinos

- Désintégrations double-bêta … avec (ou sans) émission de neutrinos !
  - Exemple : les expériences NEMO au Laboratoire Souterrain de Modane
- Neutrinos ultra-énergétiques en provenance du cosmos
  - Sources / mécanismes d'accélération encore inconnus
- Accélérateurs de particules
  - Protons → Cible → Pions, Kaons → Désintégration → Absorbeurs
  - Production dominante de $\nu\mu$; également quelques pourcents de νe
  - « POT » (Proton On Target) : nombre de protons envoyés sur la cible
    → Nombre de neutrinos produits $\propto$ POT $\times$ énergie des protons
  - Exemple : envoi d'un faisceau de neutrinos du CERN vers le Gran Sasso (Italie)
    → Expérience OPERA
- Centrales nucléaires
  - Production copieuse d'antineutrinos lors des réactions de fission
  - Flux dépend de la composition du réacteur
    → Détecteur proche pour normaliser le flux
    → Flux mesuré légèrement inférieur aux prédictions : anomalie !?
  - Exemples : Double Chooz (Ardennes), Stereo (Grenoble), SoliD (Belgique)

Etudes des oscillations de neutrinos

- Oscillations
  - Changement de composition d'un faisceau de neutrinos au cours de son parcours
    → Les pourcentages de νe / νμ / ντ varient !
  - Phénomène purement quantique
    → Découvert il y a une vingtaine d'années

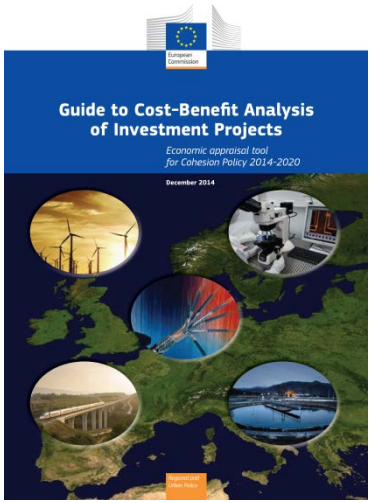
- Le phénomène dépend
  - Des paramètres du Modèle Standard – 3 angles « de mélange » + 1 phase
    → Valeurs non données par la théorie : mesurées expérimentalement
  - De l'énergie des neutrinos et de la longueur de leur parcours

- De nombreuses expériences complémentaires
  - Composition initiale du faisceau de neutrinos
  - Energie des neutrinos
  - Distance entre les détecteurs
  → Expériences d'apparation ou de disparation

- Trois angles mesurés à des ambiguités trigonométriques près
- « Hiérarchie » de masses des neutrinos encore inconnue

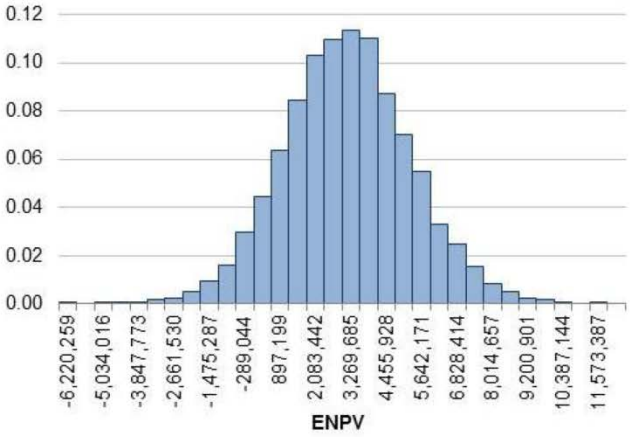
Conclusions

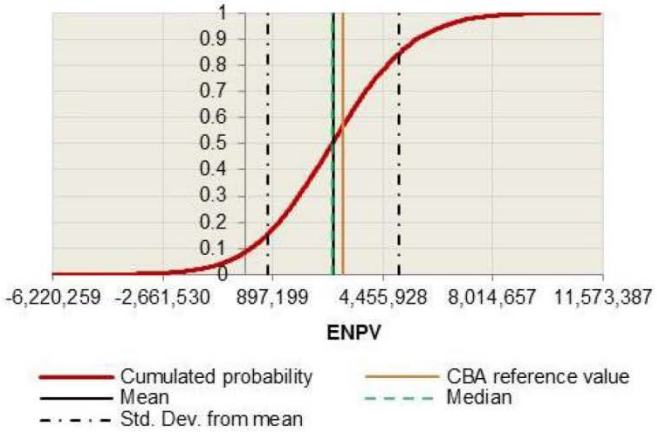
Analyse coût-avantage du LHC



- Combien coûte un collisionneur ?
  Le jeu en vaut-il la chandelle ?
  - Etude sur la période 1993-2025 (33 ans)
  - Groupe de travail : économistes + chercheurs
  - Méthodologie conforme aux recommandations de l'UE
  - Plus d'informations : http://www.eiburs.unimi.it

- Résultats
  - Valeur actuelle nette moyenne : environ 2,9 milliards d'€ (coût : 13,5 milliards d'€)



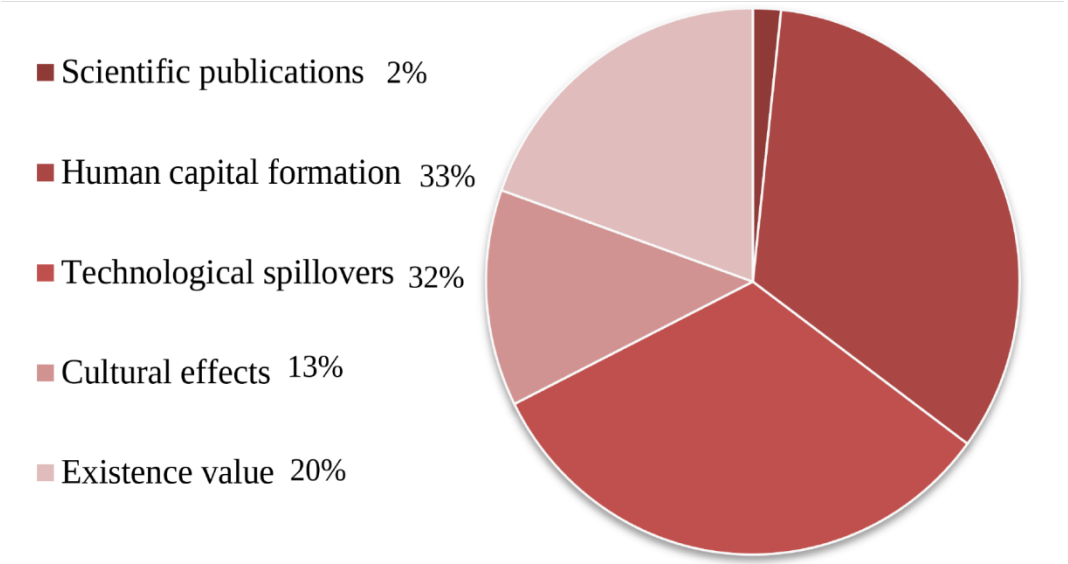


  - Probabilité que cette valeur soit positive : environ 90%

Analyse coût-avantage du LHC

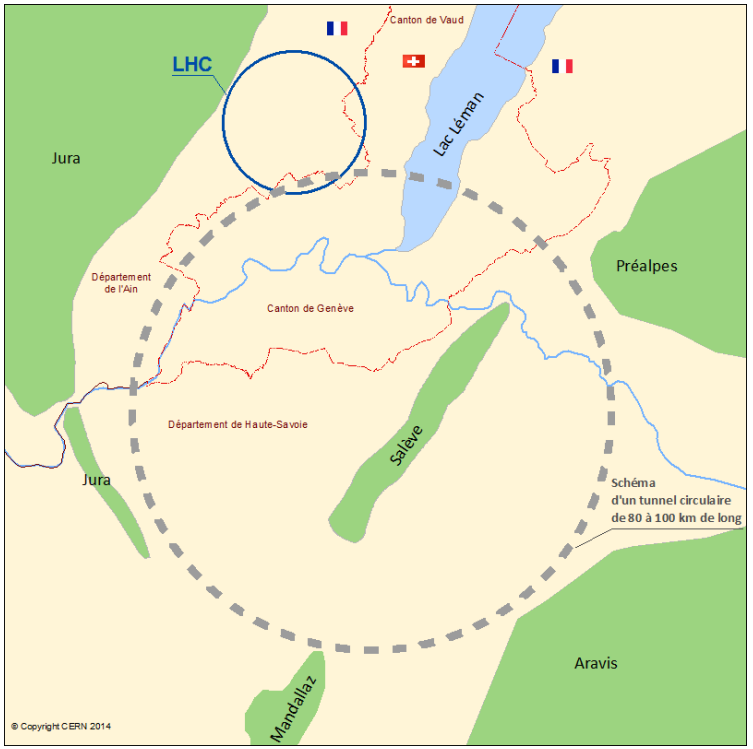
- Coûts : 13,5 ± 0,4 milliards d'€

- Bénéfices
  - Progrès de la connaissance : 0,3 ± 0,1 milliards d'€
  - Ressources humaines (formation) : 5,5 ± 0,3 milliards d'€
  - Retombées technologiques ; industries : 5,3 ± 1,7 milliards d'€
  - Culturels : 2,1 ± 0,5 milliards d'€
  - L'existence même du LHC : 3,2 ± 1,0 milliards d'€



Bilan : comment définir un nouveau projet ?

- Potentiel de physique
  - Développements théoriques
  - Résultats des expériences passées / en cours
- Attractivité du projet pour les pays / laboratoires
  - Taille critique de la proto-collaboration
- Financement
  - Pays / laboratoire d'accueil
- Progrès technologiques nécessaires
  - Méthodes d'accélération
  - Intensité des champs magnétiques
  - Performances et « durabilité » des détecteurs
- Site
  - Géologie
- etc.



→ Au final un compromis : le couple accélérateur-détecteur le meilleur possible …
… compte-tenu de l'ensemble des contraintes existantes