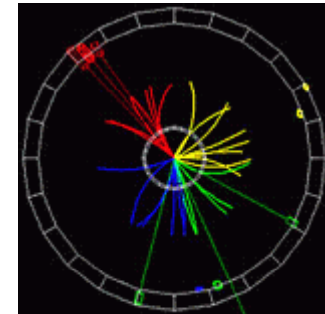


Les accélérateurs de particules

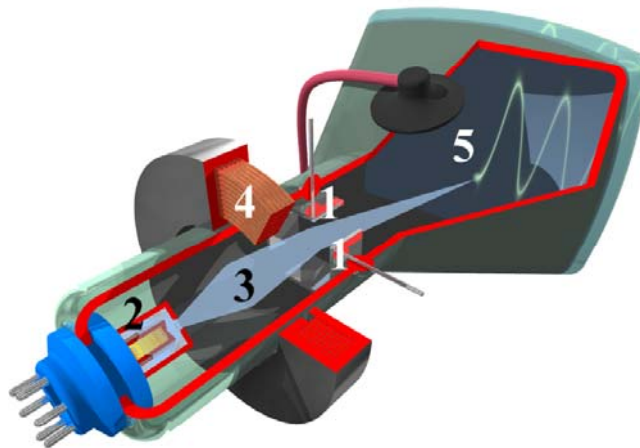
Nicolas ARNAUD (narnaud@lal.in2p3.fr)

- Particules & interactions
- Détecteurs
- **Accélérateurs** ←
- Perspectives



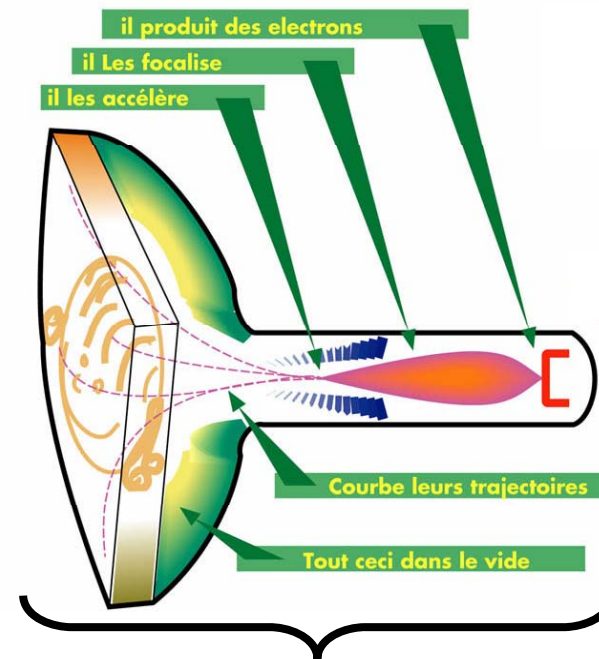
Un accélérateur comment ça marche ?

- Vous avez certainement déjà croisé des accélérateurs
 - **oscilloscope** en T.P. de physique
 - vieux **poste cathodique de télévision**



Tube d'oscilloscope

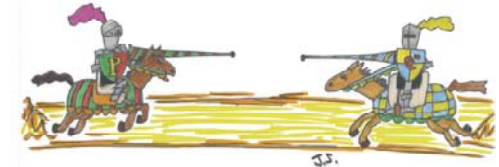
- 1 : électrodes déviant le faisceau
- 2 : canon à électrons
- 3 : faisceaux d'électrons
- 4 : bobine pour faire converger le faisceau
- 5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore



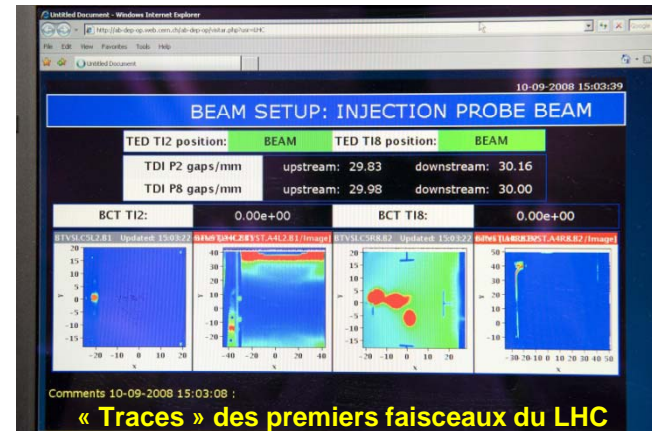
La panoplie du parfait accélérateur :
rien ne manque !

Un accélérateur comment ça marche ?

- Le **but** : créer des collisions au centre de détecteurs spécialement construits pour les observer



- **Processus complexe** :
 - il faut produire les particules,
 - puis les accélérer et les guider ;
 - enfin, s'assurer que les collisions ont lieu à l'endroit voulu.



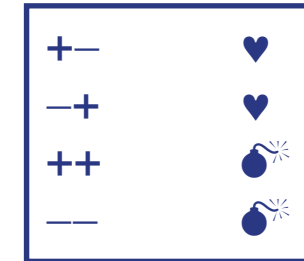
- **Difficultés** :
 - beaucoup d'énergie consommée (€€€).
 - La Nature n'en fait qu'à sa tête : les réactions cherchées sont (très) rares !
 - Il faut donc accumuler le plus grand nombre possible de collisions
 - Précision d'horlogerie au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)

⇒ Ce n'est **pas simple** ...

... mais **ça fonctionne plutôt bien** !

Principes de base

- On ne sait accélérer que des particules chargées
- Deux charges $\begin{cases} \text{opposées} & \text{s'attirent} \\ \text{de même signe} & \text{se repoussent} \end{cases}$
- **Champ électrique**
→ Accélération
- **Champ magnétique**
→ Modifications de la trajectoire des particules
→ Modifications de l'agencement des particules dans l'espace
- Les particules sont organisées en **paquets très denses**
→ les particules sont très petites
→ on veut être sûr d'avoir des collisions à chaque croisement
→ les particules sont produites en série
- Les particules circulent dans un **tube à vide** pour minimiser les collisions parasites avec les molécules d'air résiduelles
- Les particules sont **(ultra)-relativistes** : $v_{ptc} \approx v_{lumière}$ (300 000 km/s)

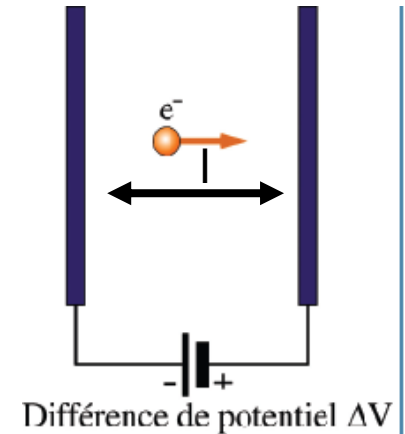


Accélération

(champ électrique)

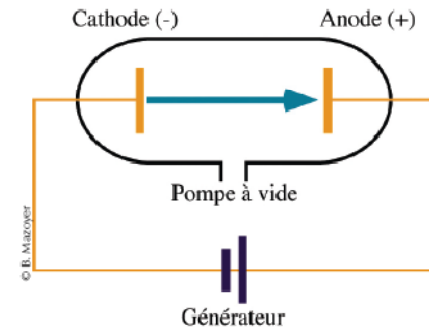
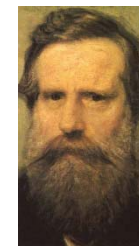
- Particules accélérées par une **différence de potentiel**
→ unité commode : **l'électron-volt (eV)**

Énergie gagnée par une particule
de charge élémentaire dans une
différence de potentiel de 1 V



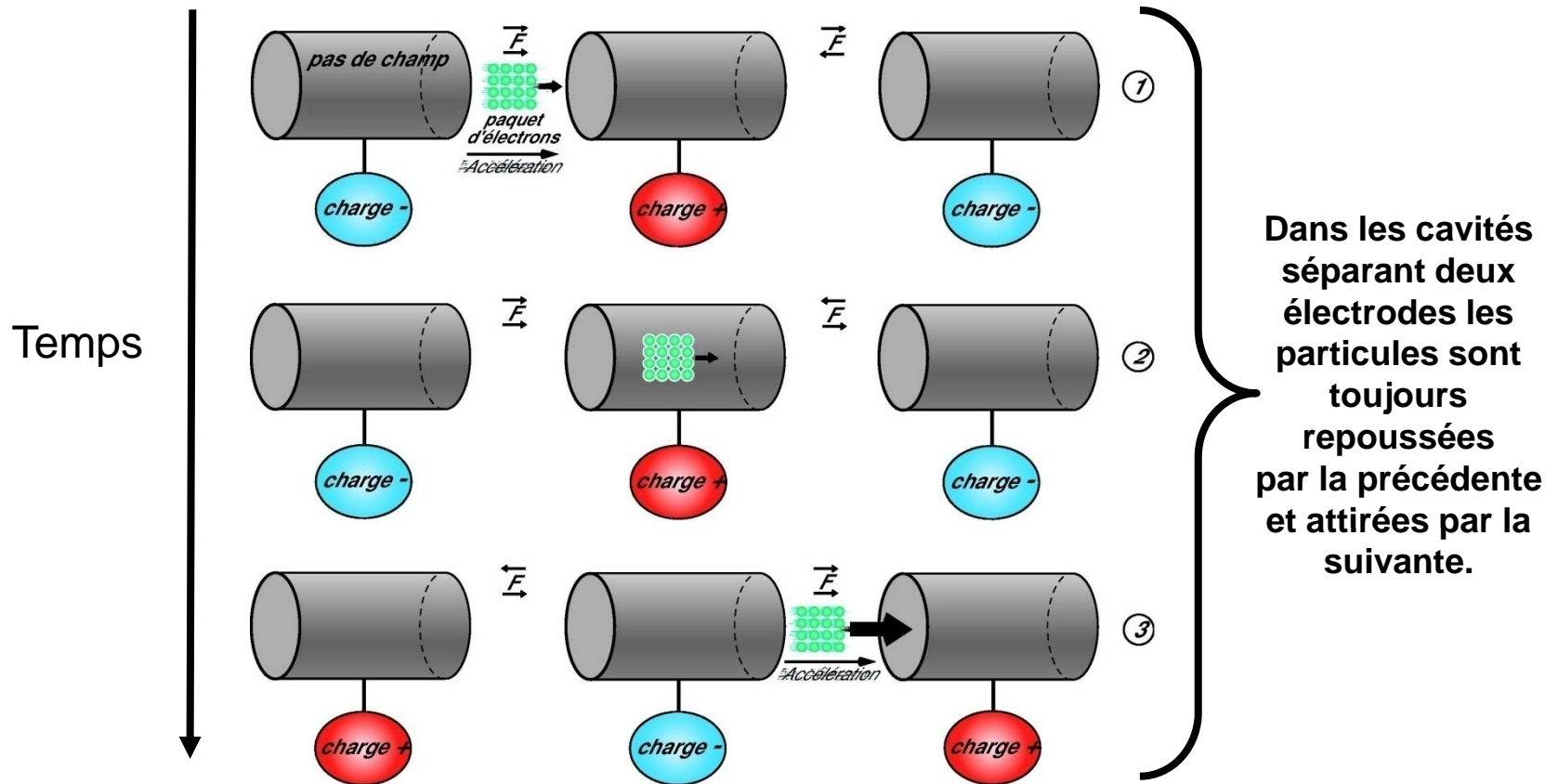
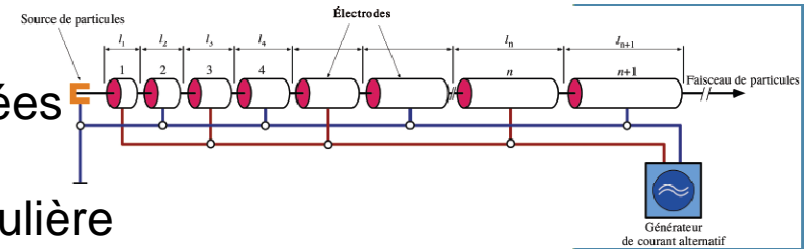
- En physique des particules on utilise des multiples de cette unité
 - le kilo électron-volt : 1 **keV** = 1 000 eV ← ~ **TV**
 - le méga électron-volt : 1 **MeV** = 1 000 000 eV
 - le giga électron-volt : 1 **GeV** = 1 000 000 000 eV ← ~ **LEP**
 - le téra électron-volt : 1 **TeV** = 1 000 000 000 000 eV ← ~ **LHC**

- Ancêtre des accélérateurs : le tube de **Crookes** (1875)
→ Découverte des rayons X (photons)
(**Röntgen** 1895)



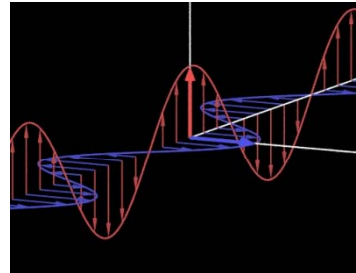
Premiers accélérateurs linéaires

- Électrodes dont les charges sont alternées
- Les charges s'inversent de manière régulière
→ les particules voient toujours un champ accélérateur



Aujourd'hui : les particules surfent !

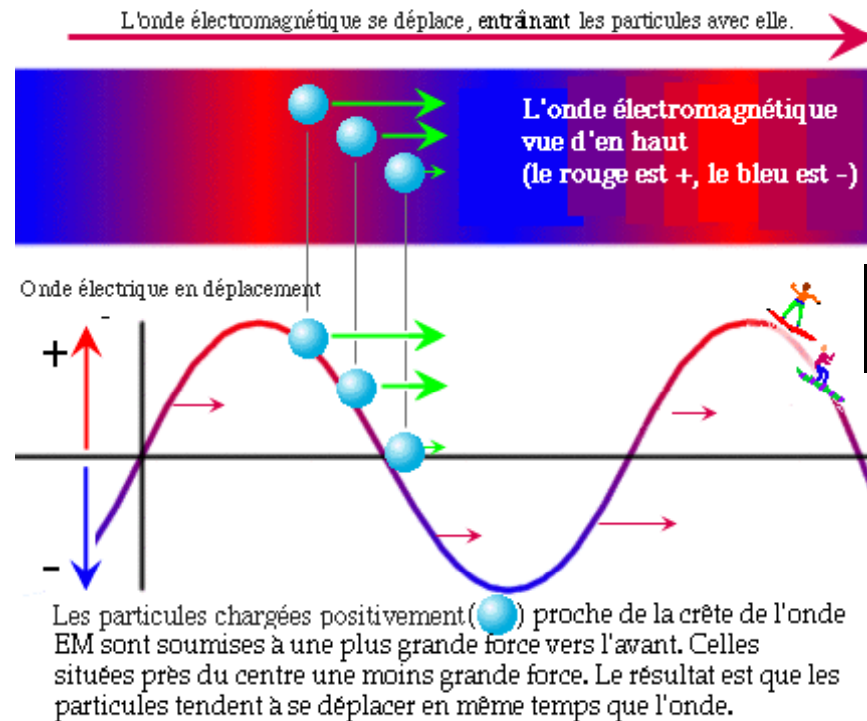
- Propagation d'une onde électromagnétique qui « emporte » les particules



Électro ...



... magnétique



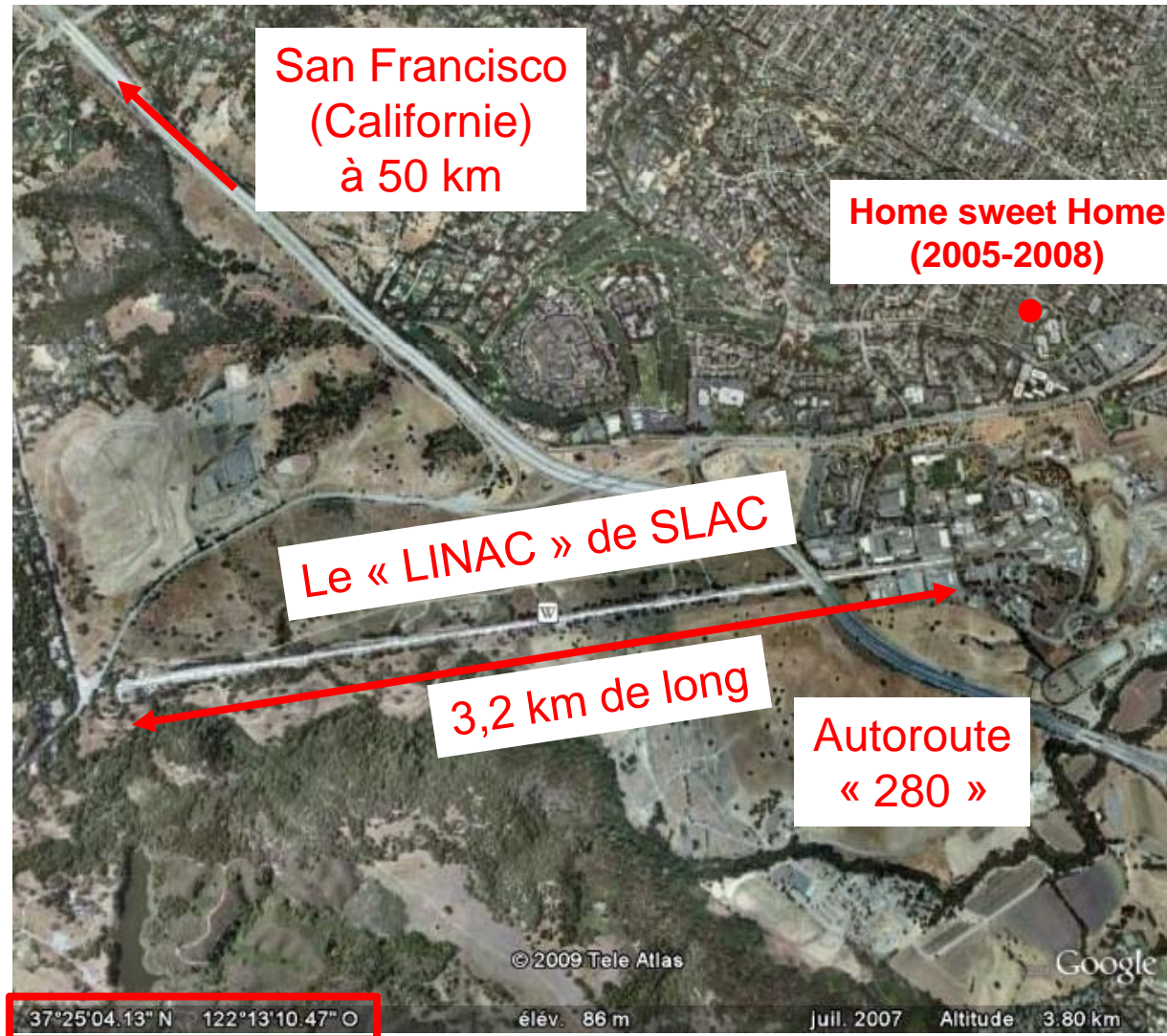
Kelly Electron



Synchro. ⇒
organisation
naturelle
en paquets

MasterClasses 2010 au LAL

Un exemple : l'accélérateur linéaire de SLAC



Latitude & Longitude

En surface (contrairement au CERN) ⇒ visible sans difficulté depuis le ciel !

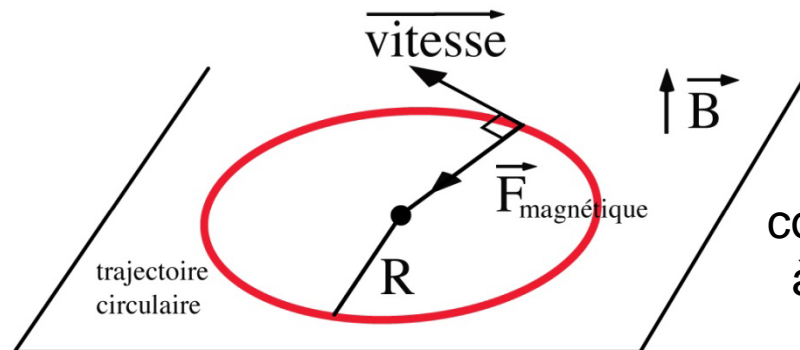
Un exemple : l'accélérateur linéaire de SLAC

- **Accélération simultanée d'électrons et de positrons** (comme au LEP) qui surfent sur les (anti-)vagues qui se succèdent
- **Quelle est la vitesse des particules en sortie ?**
 - Faisons un test !
 - Un électron et une balle sont tirés simultanément au début du LINAC
 - Quand l'électron arrive au bout des **3,2 km** la balle a parcouru moins d'**1 m** !
- **$V_{\text{électron}} = 99,999999995\%$ de la vitesse de la lumière**
 $E_{\text{électron}} \sim 10 \text{ GeV}$ (10 000 000 000 eV)



Pourquoi aller tout droit quand on peut tourner en rond ?

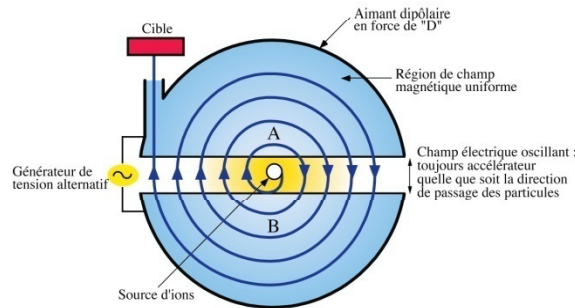
- Tout sauf une devise **Shadok** !
- **Les accélérateurs linéaires ne sont pas la panacée**
 - encombrement
 - les particules ne le traversent qu'une fois
→ pas très économique ...
- **Solution simple : faire tourner en rond les particules !**
 - grâce à un **champ magnétique** \vec{B}
 - elles sont ainsi recyclées et produisent de nouvelles collisions



Trajectoire circulaire et à vitesse constante dans le plan perpendiculaire à la direction du champ magnétique

Des accélérateurs circulaires aux collisionneurs

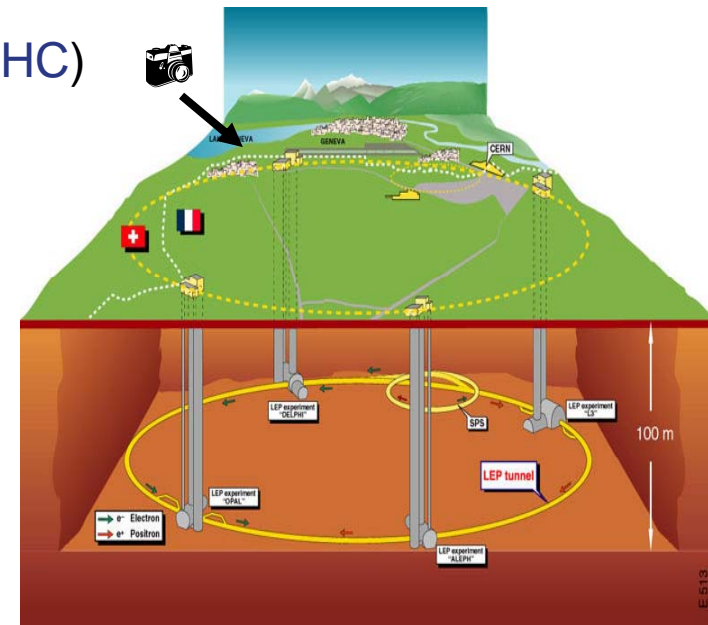
- 1^{er} accélérateur circulaire : le cyclotron de **Lawrence** en **1931**



- Champ magnétique constant
 - zone avec champ électrique → accélération
- ⇒ la trajectoire est une spirale



- **Le CERN** : de 1989 (LEP) à aujourd'hui (LHC)

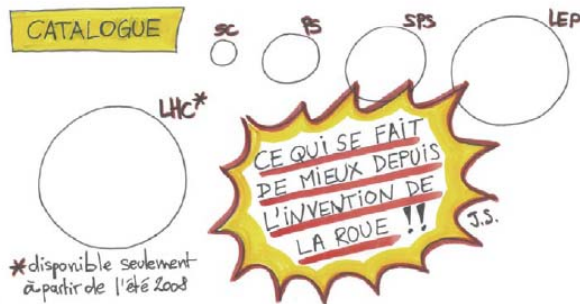


→ Le champ magnétique suit l'accélération ⇒ **trajectoires quasi-circulaires**

Les accélérateurs actuels

- Un accélérateur linéaire + un ou plusieurs accélérateurs circulaires, le dernier étant le collisionneur
 - Accélération en plusieurs étapes
 - réutilisation des accélérateurs plus simples qui servent d'injecteur pour la nouvelle machine

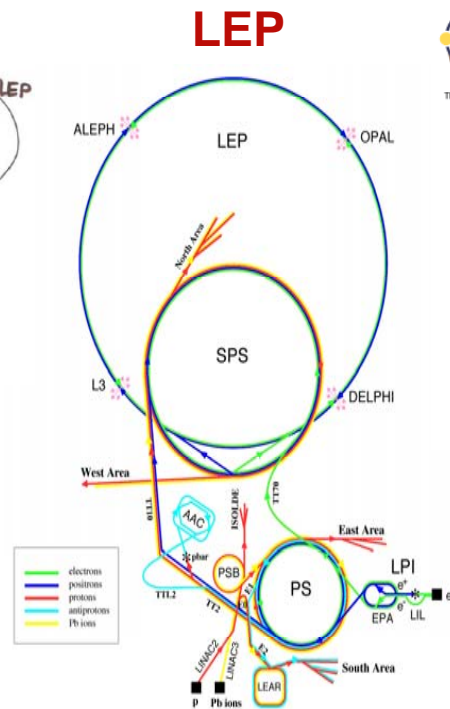
• Au CERN : *Fabrique de ronds*
(maison fondée en 1957)



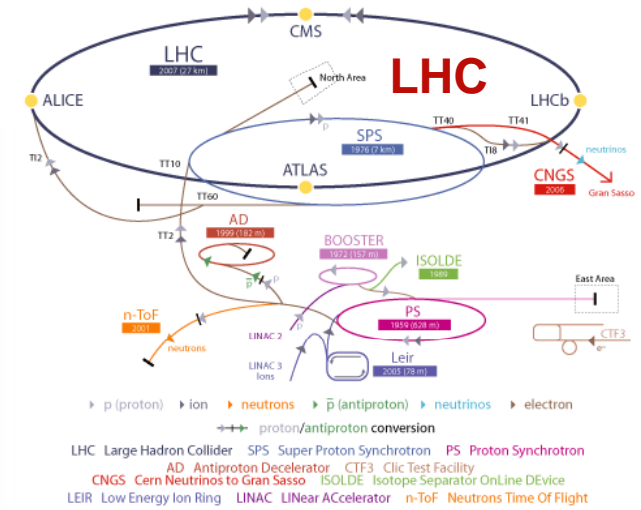
Tunnel du LEP (1991)



"Hands on Particle Physics"
International Masterclasses



CERN Accelerator Complex



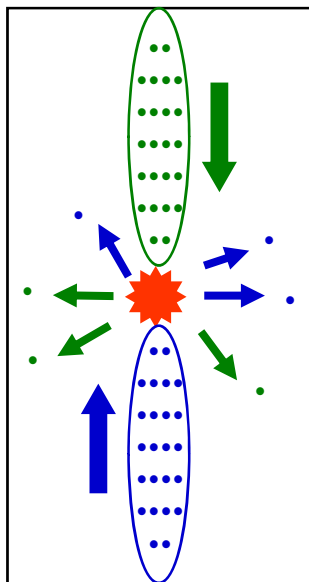
Mêmes éléments, seule la perspective change !

Où les choses se compliquent un peu ...

- **Les particules n'aiment pas tourner en rond**
 - elles perdent de l'énergie à chaque virage
 - présence de zones rectilignes où elles sont réaccélérées
- **Des particules sont sans cesse perdues** ⇒ réinjection régulières
 - Collisions avec des molécules d'air ou des poussières
 - « Sorties de pistes » : les particules qui n'arrivent plus à suivre le rythme se perdent sur les parois métalliques de la machine
- Les chiffres donnent très vite le tourni. Prenons l'exemple du **CERN** :
 - Les particules accomplissent **11 000 tours / seconde**
 - Il y aura ~ **300 000 000 000 000 de protons** en même temps dans le LHC
 - 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**
 - **Le LHC est probablement l'endroit le plus froid de l'Univers !**
 - **L'énergie stockée** dans le faisceau équivaut à celle de **60 kg de TNT**
 - **Les particules se croiseront** ~ **40 millions de fois par seconde** dans les détecteurs et chaque interaction produira ~ **20 collisions proton-proton**
 - La **puissance électrique consommée** sera environ **1/10^{ème} de celle fournie par une centrale nucléaire**

En résumé ...

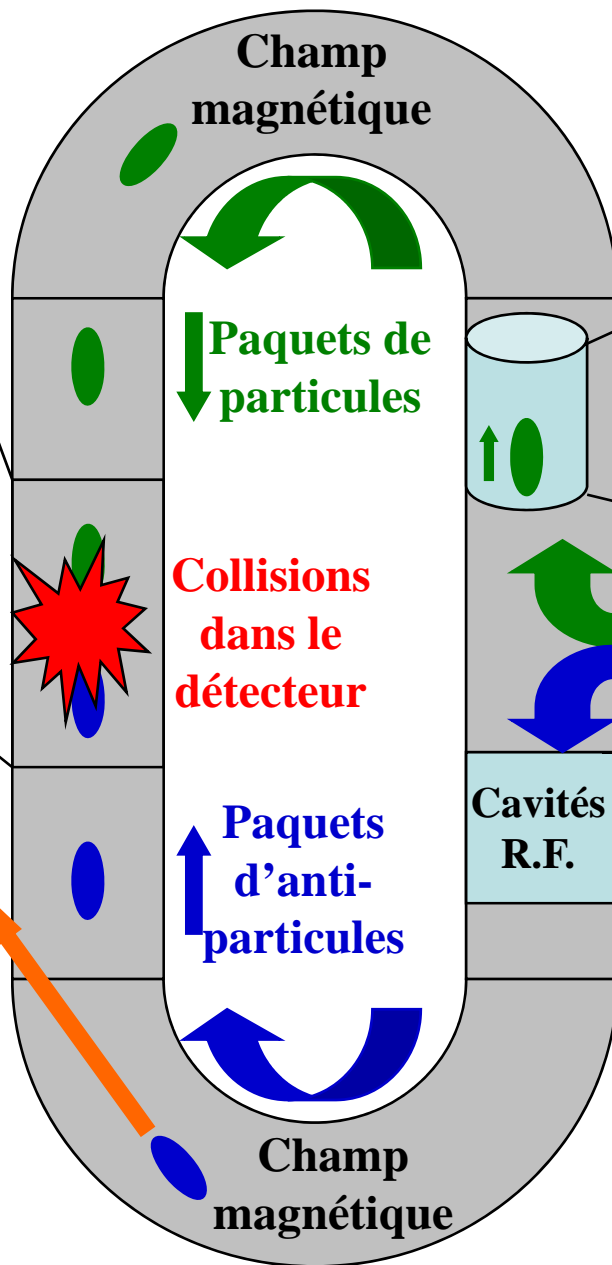
D'autres particules sont perdues



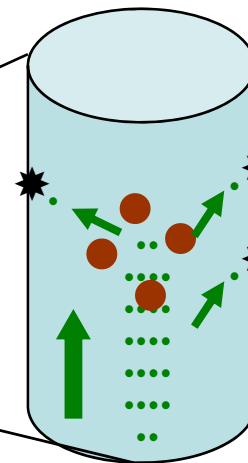
Collisions

d'autant plus fréquentes que les paquets sont denses

Émission de lumière synchrotron
⇒ perte d'énergie



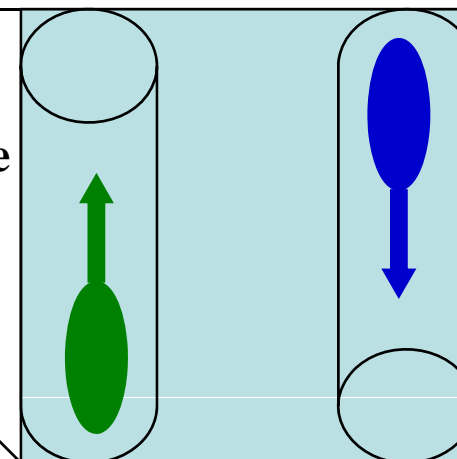
Les molécules d'air résiduelles dévient certaines des particules du paquet qui sont perdues



Chocs contre les parois

Injections de ptc accélérées depuis l'accélérateur linéaire

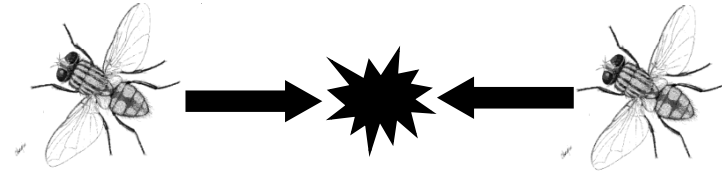
Champ électrique



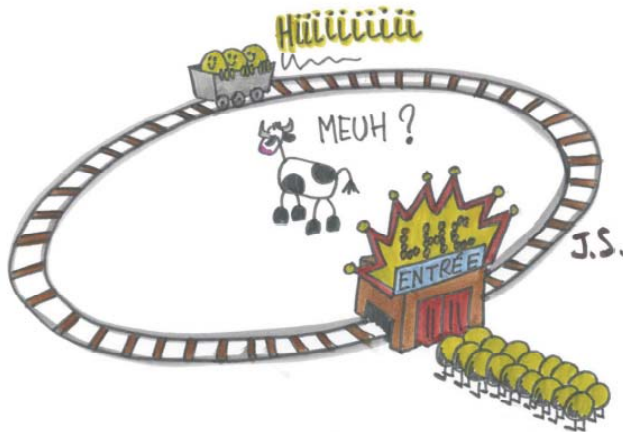
Apport d'énergie dans les cavités R.F.

Une petite question avant de conclure ...

- Le **LHC** accélère ses protons à 7 TeV (sept mille milliards d'eV)
- Convertie en unités plus habituelles, cela correspond à **l'énergie cinétique d'une mouche en vol.**

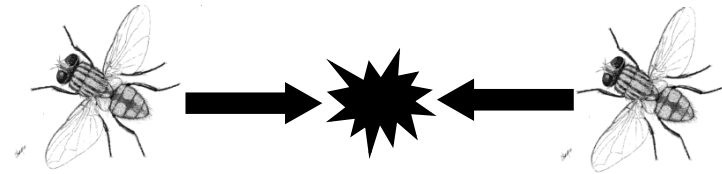


→ **Tout ça pour ça ? Pourquoi ne pas étudier des collisions mouche-mouche ?**



Une petite question avant de conclure ...

- Le **LHC** accélère ses protons à 7 TeV (sept mille milliards d'eV)
- Convertie en unités plus habituelles, cela correspond en gros à **l'énergie cinétique d'une mouche en vol**.

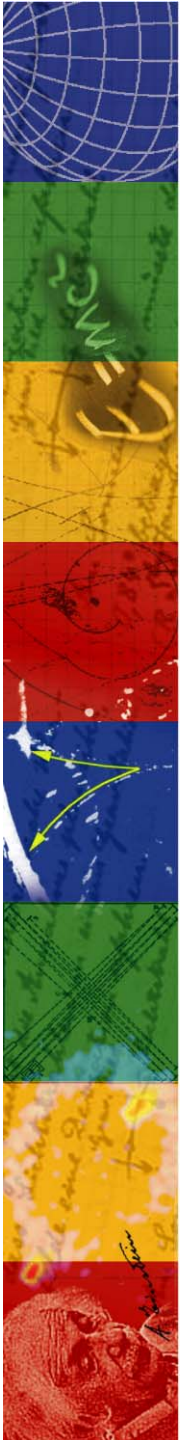


→ **Tout ça pour ça ? Pourquoi ne pas étudier des collisions mouche-mouche ?**



**Bonne dégustation
suite de visite !**





"Hands on Particle Physics"
International Masterclasses

MasterClasses 2010 au LAL

17

Où prend-on les particules ?

- Production des particules

- **d'électrons** (LEP)

- ejectés d'un filament métallique chauffé

- **de positrons** (antimatière !)

- par collision d'électrons sur une plaque métallique

- **de protons** (LHC)

- on utilise des atomes d'hydrogène

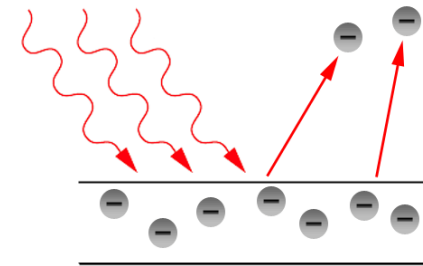
{	un proton	(charge +)
	un électron	(charge -)

- un très fort champ électrique
brise la cohésion des atomes

- les particules de charges opposées
se séparent

- on récupère les protons qui sont injectés
dans l'accélérateur

**Assez de protons pour
quelques années de
fonctionnement du LHC !**



Effet photoélectrique



De belles images ...



Aimant de focalisation (sextupole) du LEP



Installation de l'accélérateur LHC



Taille des détecteurs **ATLAS** et **CMS**



Événement

LEP



Simulation
d'événement
LHC