

CHAPITRE III

Mars 2007, Ch. de la Vaissière, F. Hubaut, O. Leroy, J. Cogan

Les instruments : machines et détecteurs

Plan

1. Caractéristiques des collisions
2. Les partenaires de la collision
3. Les collisionneurs
4. Les fonctions des détecteurs
5. Expériences hors accélérateurs

§ 3.1 - Caractéristiques des collisions

Les collisions, en faisant interagir les particules, permettent de les connaître

- Énergie de la collision
- Section efficace
- Luminosité instantanée de la machine
- Taux d'acquisition
- Luminosité intégrée
- Produits de la réaction

3.1 - Caractéristiques des collisions

Énergie de la collision E_{cm}

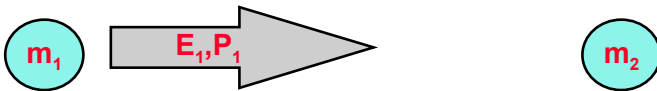
Énergie dans le « centre de masse » (c.m.)

- ▶ Dans ce référentiel, la somme des impulsions des particules est nulle
- ▶ C'est l'énergie utile dans une collision

$$E_{c.m.}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$

Collisions sur cible fixe

- ▶ Très utilisées avant l'arrivée des collisionneurs
- ▶ La seule possible quand le projectile est une particule neutre, ou dans le cas de rayons cosmiques
- ▶ Le centre de masse est en mouvement

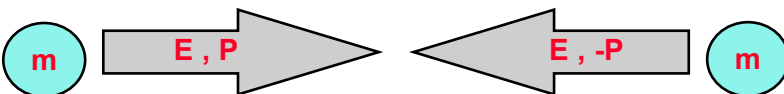


$$E_{c.m.}^2 = 2 E_1 m_2 + m_1^2 + m_2^2$$

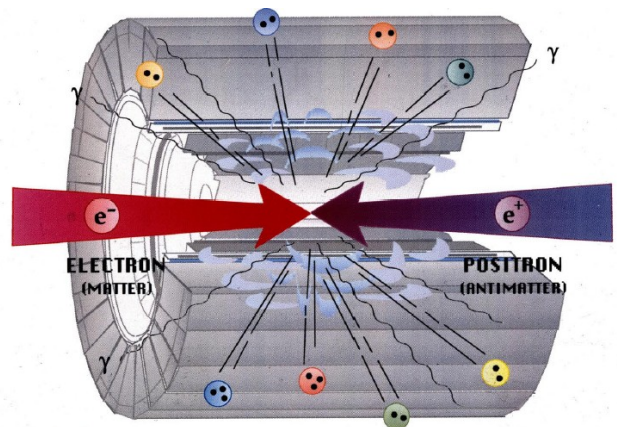


Collisions de deux particules identiques, allant en sens inverse : collisionneurs

- ▶ Centre de masse immobile
- ▶ Pas d'énergie perdue



$$E_{c.m.} = 2 E$$



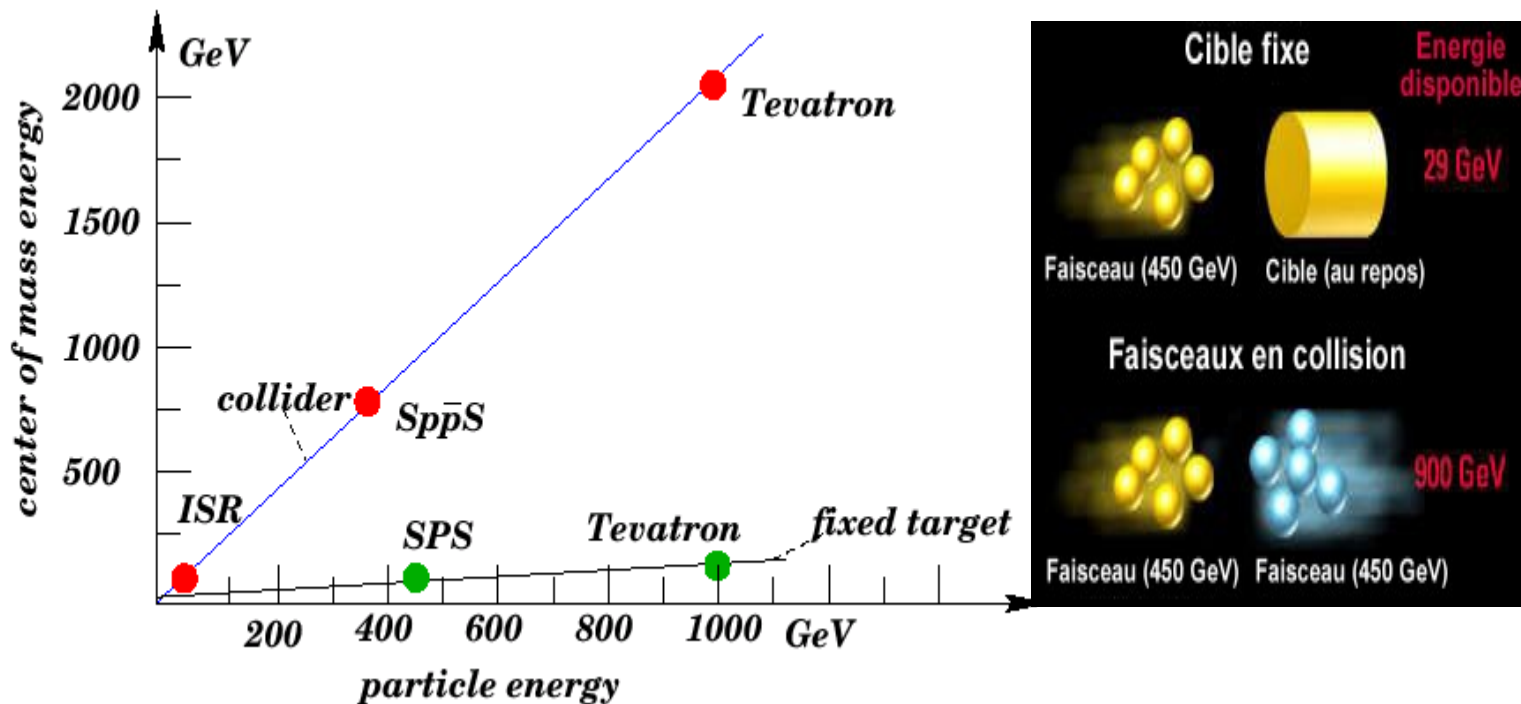
Eliane Omursal

3.1 - Caractéristiques des collisions

Cibles fixes / collisionneurs

■ Comparaison:

- ▶ Proton de 7 TeV sur proton fixe : $E_{cm} = 0.1 \text{ TeV}$
- ▶ 2 protons de 7 TeV en sens inverse : $E_{cm} = 14 \text{ TeV} \rightarrow \text{LHC}$
- ▶ Pour atteindre la même énergie avec cible fixe, il faudrait
 - $E(\text{faisceau})=105000 \text{ TeV} !!!$



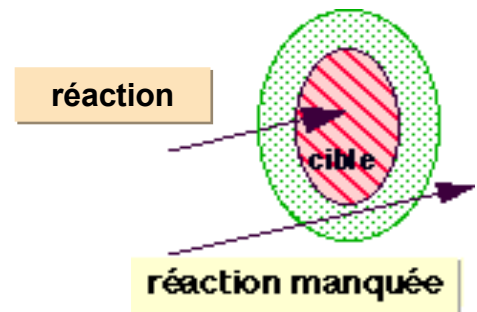
Collisionneur : plus d'énergie utile

- Energie encore plus grande dans les rayons cosmiques, mais conditions initiales pas connues

3.1 - Caractéristiques des collisions

Section efficace ou σ

- Sous le terme de **section efficace** se cache la probabilité de réaction
 - ▶ Section efficace totale : n'importe quel état final
 - ▶ Section efficace exclusive : état final particulier
- La section efficace a la dimension d'une petite surface
 - ▶ C'est la surface à travers laquelle le projectile doit passer pour que la réaction se produise



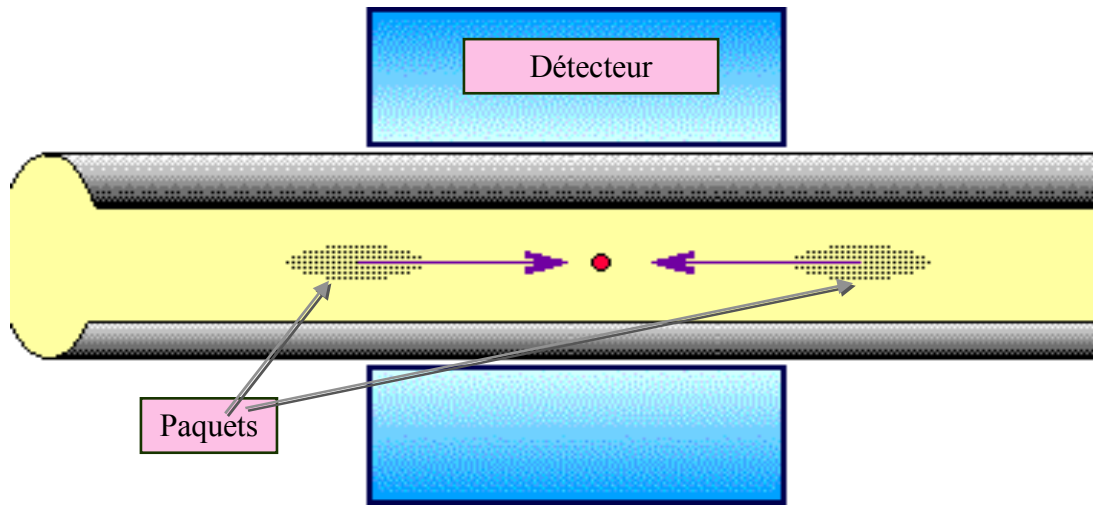
■ Unités :

- ▶ Le barn = 10^{-24} cm^2
 - C'est la section d'un gros noyau
- ▶ Le millibarn = 10^{-27} cm^2
 - Au LHC, la section efficace totale de collision de deux protons est de l'ordre de $\sigma(pp) \approx 100 \text{ mb}$
 - Pour un photon γ sur un noyau: $\sigma(\gamma p) \approx 0.1 \text{ mb}$
- ▶ Le nanobarn = 10^{-33} cm^2
 - Production d'un Z^0 au LEP à partir de collisions e^+e^- est $\sigma(e^+e^- \rightarrow Z^0) \approx 40 \text{ nb}$
- ▶ Le picobarn et femtobarn 10^{-36} cm^2 et 10^{-39} cm^2
 - Probabilités de phénomènes rares
 - Ex. $\sigma(\text{Higgs} \rightarrow \gamma \gamma) \approx 50 \text{ fb}$ au LHC

3.1 - Caractéristiques des collisions

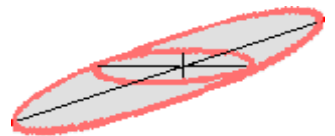
Luminosité instantanée de la machine

- Capacité de la machine à produire des collisions



- Pour augmenter la luminosité :

- Accroître le nombre de particules/paquet : 10^{11} au LHC
- Comprimer les paquets, réduire leur section
 - Ellipse de $2.5 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ au LEP
- Augmenter la fréquence de collisions des paquets
 - Au LHC, 40 millions de collisions par seconde
- Multiplier les paquets : 8 au LEP, 2835 au LHC
- Au LHC, distance entre paquets = 7.5 mètres



- Les luminosités sont exprimées par des nombres très grands

$10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ luminosité du LEP de 1990 à 95
 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ luminosité attendue au LHC

3.1 - Caractéristiques des collisions

**Taux d'acquisition =
Événements/seconde**

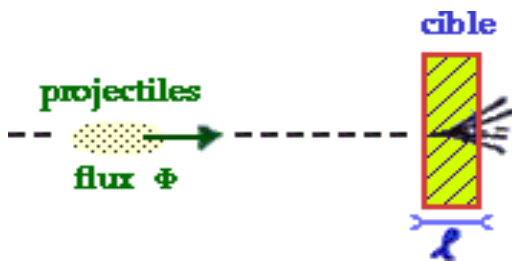
- Pour un collisionneur, taux d'acquisition = produit de la probabilité de la réaction cherchée (**section efficace**) et de la **luminosité** de la machine

$$dN/dt = L \cdot \sigma_{\text{réaction}}$$

► Exemple du top au LHC

- $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $\sigma(\text{tt}) = 850 \text{ pb} = 8.5 \cdot 10^{-34} \text{ cm}^2$
- Le LHC produira $dN/dt = 8.5$ paires tt par seconde

- Cible fixe : grande densité par rapport à une cible en mouvement



<u>Cible</u> épaisseur : densité : ρ Masse atomique : A
<u>projectile</u> flux : Φ

$$dN/dt = N_A \rho / A \cdot \Phi \sigma_{\text{réaction}}$$

- Exemple : $l = 1 \text{ cm}$, $A = 18 \text{ g mol}^{-1}$, $\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$, $\sigma(Z^0) = 40 \text{ nb}$, $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $\Phi = 10^{11} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$: taux événements par seconde $dN/dt = 140 \text{ Hz}$

Cible fixe: plus événements/seconde

3.1 - Caractéristiques des collisions

Luminosité intégrée L^{int}

- Performances du collisionneur lors d'une campagne de prise de données : elle prend en compte
 - ▶ Les périodes d'arrêt « shut-down »
 - ▶ Les temps de remplissage
 - ▶ Les fluctuations de la machine

$$L^{int} = L(\text{moyenne}) \cdot \text{Durée}$$

- Unités : inverse d'une surface
 - ▶ Les luminosités intégrées, produit de luminosités instantanées de l'ordre de $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ par des durées de l'ordre de 10^7 s, sont exprimées par des nombres énormes
 - ▶ On utilise des unités plus commodes : le nb^{-1} ou pb^{-1} ou fb^{-1}

$$\text{Ex. LHC : } 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \cdot 10^7 \text{ s} = 100 \text{ fb}^{-1}$$

▪ Exemple

- ▶ Ex : Higgs $\rightarrow \gamma \gamma$ au LHC, phénomène de petite section efficace, $\sigma = 50 \text{ fb}$, avec une luminosité intégrée de 100 fb^{-1} . On récoltera :

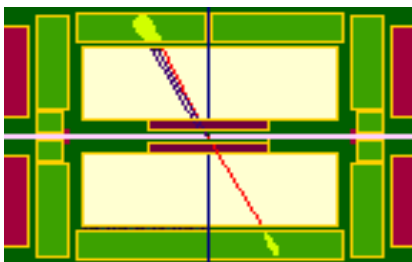
$$50 \times 100 = 5000 \text{ événements par an ... si tout va bien}$$

3.1 - Caractéristiques des collisions

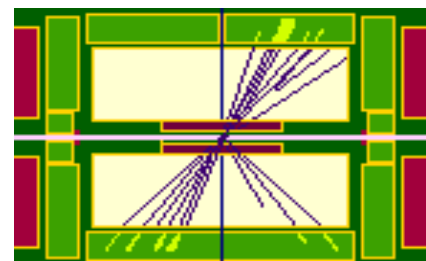
Produits de la réaction

- L'état final est caractérisé par :
 - ▶ Le nombre de particules produites (multiplicité)
 - ▶ Leur type (e, μ , π , ρ , K, ...)
 - ▶ Leur impulsion
- Topologie des événements (exemple du LEP)
 - ▶ Les **événements leptoniques** ont une topologie simple, un état final avec peu de particules
 - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
 - $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
 - $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
 - ▶ Les **événements hadroniques** ont une topologie compliquée, un état final avec beaucoup de particules sous forme de jets
 - $e^+e^- \rightarrow$ quark antiquark \rightarrow jets

Événement leptonique $\tau^+\tau^-$



Événement hadronique

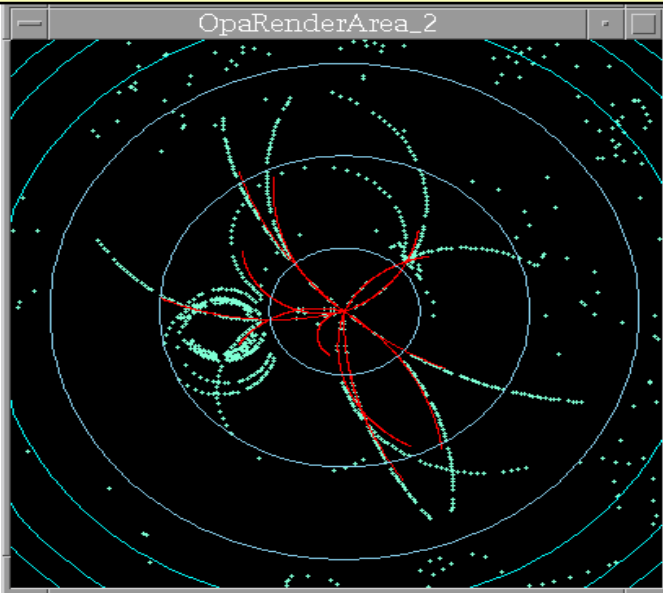


3.1 - Caractéristiques des collisions

Machines leptoniques et hadroniques

- Machine leptonique (e^+e^-) (ex. LEP, SLAC)

Événement BABAR, $E_{cm} = 10.58$ GeV

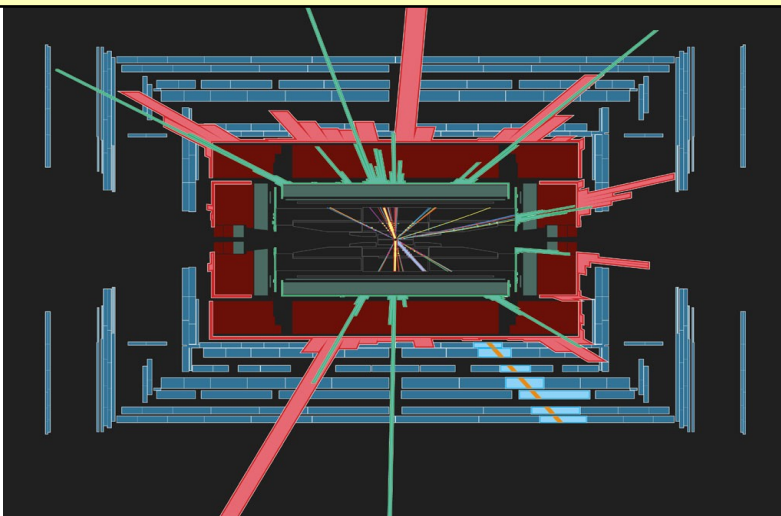


Une topologie simple

Une dizaine de particules chargées par événement

- Machine hadronique (pp ou pp) (ex. LHC, Tevatron)

Événement ATLAS, $E_{cm} = 14000$ GeV



Une topologie complexe

Une centaine de particules chargées par événement

§ 3.2 - Les partenaires de la collision

Quelles particules fait-t-on entrer en collisions ?

- Faisceaux de particules
- Faisceaux d'électrons et de positrons
- Faisceaux de protons et d'antiprotons
- Faisceaux de pions, kaons, etc...
- Faisceaux de neutrinos
- Sources naturelles

3.2 - Les partenaires de la collision

Faisceaux ou « beams »



- Définition d'un faisceau :
Ensemble de particules suivant des trajectoires voisines
- Paquets de particules :
 - ▶ Lors du processus accélération, les accélérateurs regroupent les particules par paquets ou « bunches »
- Faisceaux chargés peuvent être
dirigés, focalisés, réglés en énergie
- Faisceaux neutres : inhomogènes en énergie
(Sous-produits de faisceaux chargés)
- Autres sources
 - ▶ Réacteurs nucléaires
 - ▶ Rayons cosmiques
- Faisceaux de tests d'appareillages
 - ▶ Etude de réponses des détecteurs aux diverses particules
- Collisions faisceau-faisceau :
 - ▶ électron - positron
 - ▶ électron (ou positron) - proton
 - ▶ proton - antiproton
 - ▶ proton - proton

3.2 - Les partenaires de la collision

Faisceaux d'électrons et positrons

- Electrons et positrons sont stables et chargés
 - ▶ Ils peuvent être accélérés
 - ▶ Ils peuvent être guidés vers une cible
 - ▶ Ils peuvent tourner dans l'anneau d'un collisionneur et être maintenus au centre d'un tube à vide

- Production des électrons : elle est facile
 - ▶ La matière première est abondante
 - ▶ Les électrons sont faciles à arracher des atomes
 - ▶ Les faisceaux d'électrons font partie de la vie courante (ex: tube de télévision)

- Production des positrons (= anti-électrons)
 - ▶ L'antimatière n'existe pas naturellement
 - Il faut **accumuler** des positrons dans de petits anneaux dits de «refroidissement», où ils sont compactés en paquets homogènes en énergie

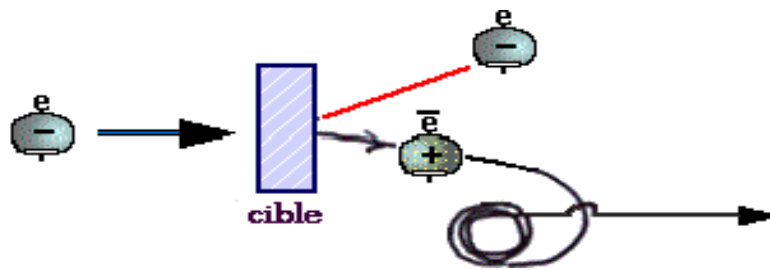
 - ▶ Les positrons disparaissent en s'annihilant avec la matière
 - Il faut les **confiner** dans le vide

3.2 - Les partenaires de la collision

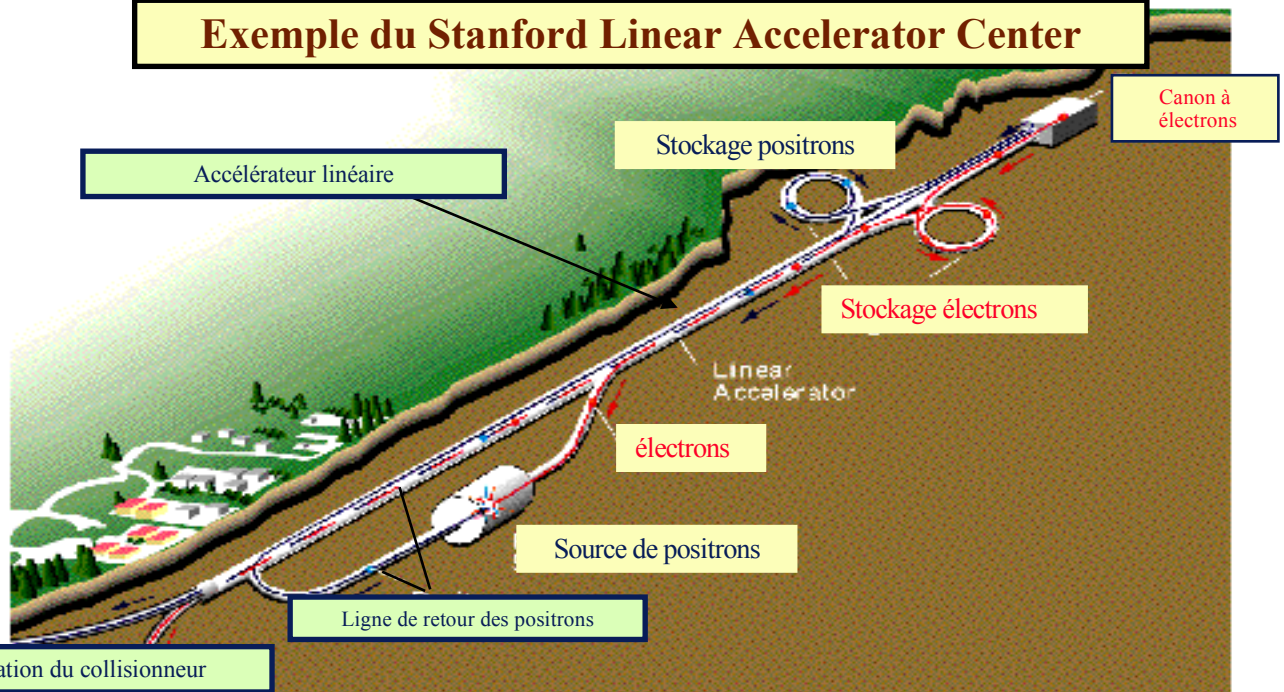
La production de positrons

■ Le cycle complexe des positrons :

- 1) Accélération d'électrons sur une cible « lourde »
- 2) Production de paires e^+e^-
- 3) Collection des positrons et stockage provisoire
- 4) Accumulation des positrons et homogénéisation de leurs caractéristiques (énergie, quantité de mouvement)
- 5) Lancement des paquets de positrons et accélération



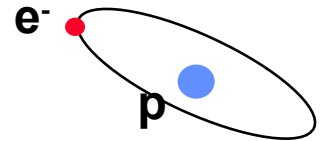
Exemple du Stanford Linear Accelerator Center



3.2 - Les partenaires de la collision

Faisceaux de protons et antiprotons

- Protons et antiprotons sont stables et chargés
- Production des protons : elle est facile
 - ▶ Simple épluchage d'atomes d'hydrogène
- Production d'antiprotons:
 - ▶ Au CERN les antiprotons sont produits lors de la collision sur une cible d'un faisceau intense de protons de quelques GeV en provenance du PS
 - ▶ ceux-ci sont dirigés sur des cibles fixes ou stockés pour être injectés dans le collisionneur
- Stockage des antiprotons
 - ▶ Il faut accumuler les antiprotons s'ils doivent être envoyés dans un collisionneur
 - ▶ Avant d'être accélérés ceux-ci doivent être «refroidis», c'est-à-dire rassemblés en paquets de quantité de mouvement homogènes



Simon Van der Meer, inventeur d'une méthode de stockage et de refroidissement des antiprotons
prix Nobel 1984



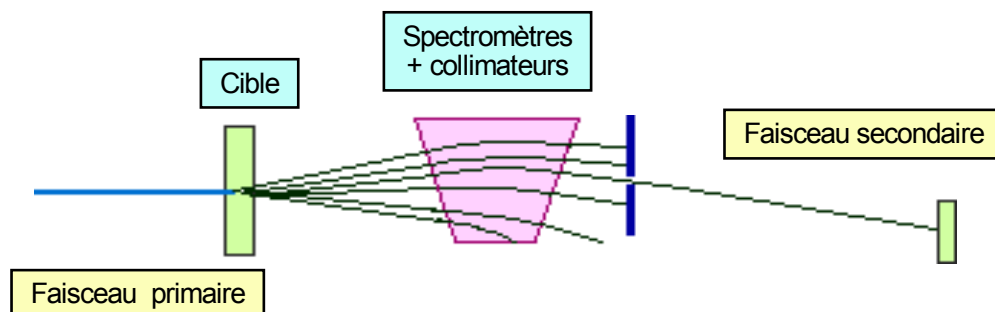
3.2 - Les partenaires de la collision

Hadrons instables (π, K, Σ, \dots)

- ▣ Ce sont des faisceaux instables

- ▣ Production :

- Cible primaire bombardée par des protons. Nombreuses particules secondaires séparées par spectromètres et collimateurs, puis dirigées vers cible secondaire.



- ▣ On met à profit la dilatation relativiste du temps

- un kaon au repos vit, en moyenne, $\tau = 1.2 \cdot 10^{-8}$ s
- accéléré, il vit $\Gamma\tau$, ou Γ est le « facteur de Lorentz ». Avec Γ assez grand, le kaon vit suffisamment longtemps pour faire un faisceau

Ex.: Un kaon d'impulsion $p = 100$ GeV parcourt $\ell = \tau p/m = 750$ m

- ▣ Utilisation :

- uniquement sur **cible fixe**
- faisceaux de π et K très utilisés de 1960 à 1985, à l'époque des chambres à bulles, du PS et du SPS
- maintenant utilisés principalement pour tester la réponse des appareillages aux pions, kaons, ... = faisceaux tests ou test-beam
- faisceaux de **kaons neutres** utilisés par NA48, KTeV
- faisceaux d'**hypérons** utilisés pour une mesure précise des temps de vie : Σ , Ξ et Ω

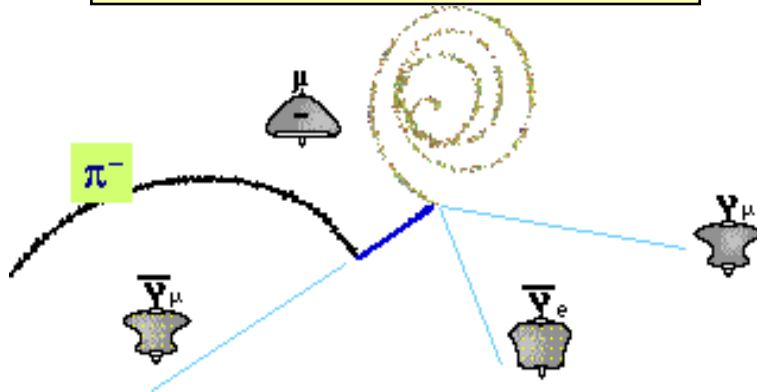
3.2 - Les partenaires de la collision

Faisceaux de neutrinos

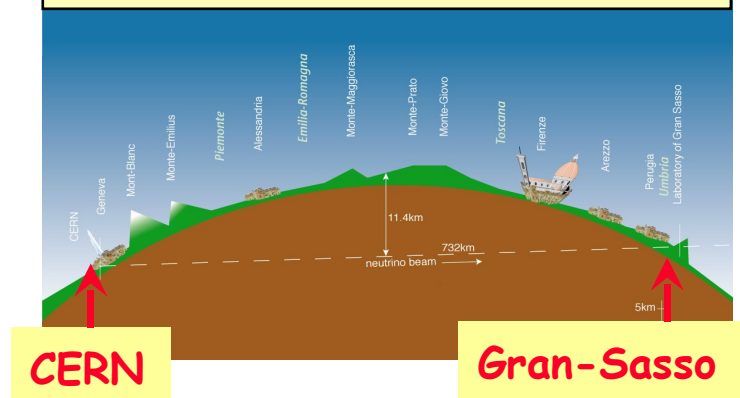
■ Faisceaux de neutrinos auprès d'accélérateurs :

- ▶ Les faisceaux de neutrinos (principalement **neutrinos-mu**) proviennent de la désintégration en vol de mésons π

Désintégration en cascade d'un méson π^- en μ^- qui se désintègre à son tour en électron



Faisceau de ν_μ envoyés depuis le CERN vers le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie



- ▶ Utilisés récemment dans les expériences « long-baseline » sur les neutrinos (K2K au Japon, Minos aux Etats-Unis, Icarus et Opéra en Europe)
- ▶ Projets de « super-faisceaux » et d'usines à neutrinos

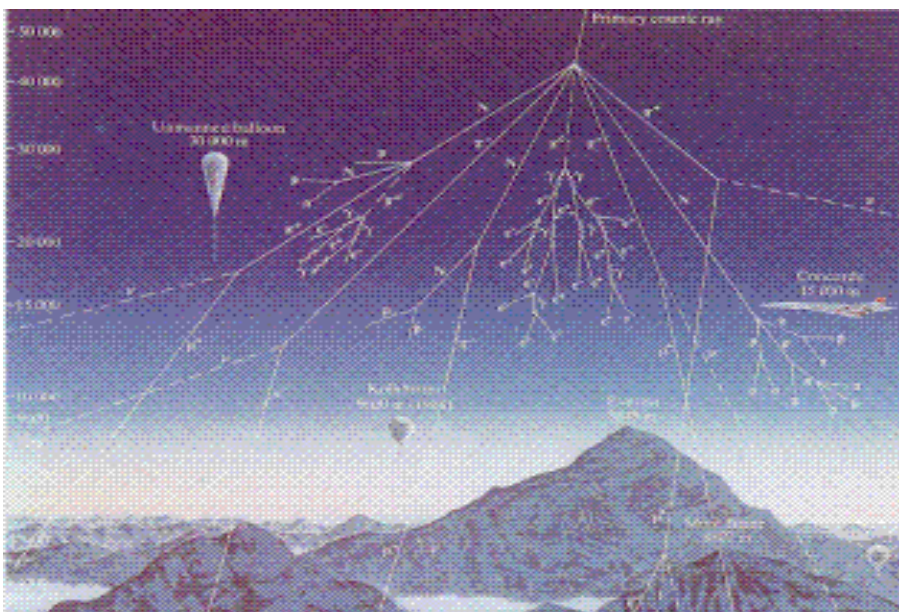
■ Neutrinos de basse énergie en provenance des réacteurs nucléaires

- ▶ Principalement antineutrinos-e ($\bar{\nu}_e$) par radioactivité β
- ▶ Faisceaux très intenses, mais les probabilités d'interaction sont extrêmement faibles
- ▶ Exemples : Chooz en France, Kamland au Japon

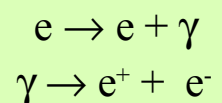
3.2 - Les partenaires de la collision

Sources naturelles

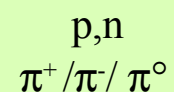
- Le soleil, source de neutrinos de basse énergie
Les réactions thermonucléaires dans le soleil produisent des ν_e
- Sources galactiques et extragalactiques
 - ▶ Accélérateur naturel à l'échelle des étoiles : très hautes énergies!
 - ▶ Certaines particules cosmiques possèdent des énergies supérieures au milliard de TeV...
- Rayonnement cosmique primaire
 - ▶ Protons
 - ▶ Photons
 - ▶ Noyaux
 - ▶ Neutrinos
- Au niveau du sol : muons cosmiques
Très utilisés pour les tests d'appareillages hors périodes de faisceaux



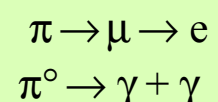
collis. électrom.



collis. sur noyaux.



Désintégrations



§ 3.3 - Les collisionneurs

Où l'on passe en revue ces machines et leur utilisation

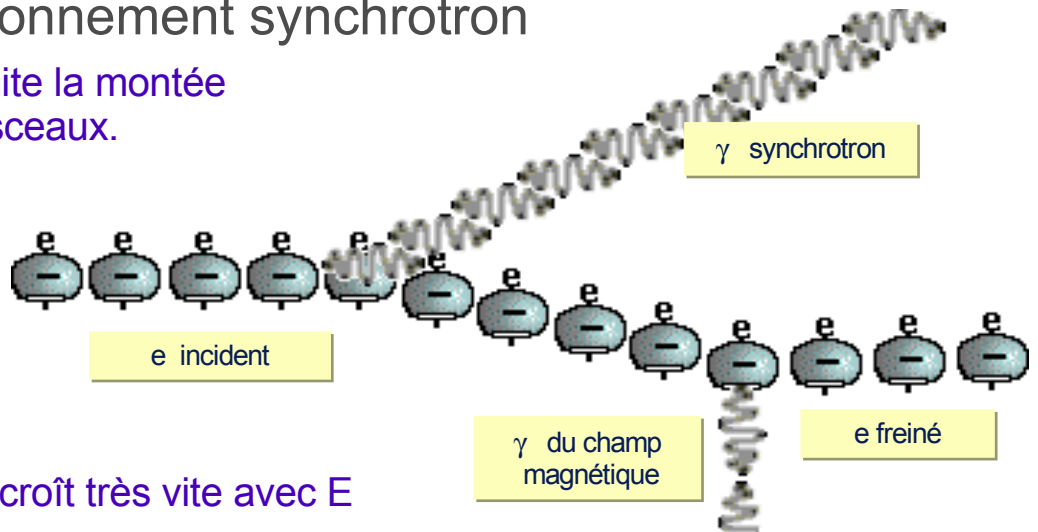
- Les collisionneurs permettent d'atteindre de beaucoup plus grandes énergies utiles que les expériences traditionnelles sur cible fixe
- Les particules doivent être stables et chargées : on ne peut remplir un collisionneur qu'avec des électrons, positrons, protons, antiprotons
- Ces machines se classent en 4 principales catégories :
 - ▶ Collisionneurs électron-positron (ex. LEP)
 - ▶ Collisionneurs électron (ou positron) –proton (ex. HERA)
 - ▶ Collisionneurs antiproton-proton (ex. Tévatron)
 - ▶ Collisionneurs proton-proton (ex. LHC)

3.3 - Les collisionneurs

Machines e^+e^-

- ▣ L'énergie est toute dans le centre de masse
 - état final assez simple
 - pas d'interaction forte
- ▣ Faibles sections efficaces
 - taux d'acquisition faibles
- ▣ Problème : Rayonnement synchrotron
 - Ce phénomène limite la montée en énergie des faisceaux.

} Mesures précises



- La perte d'énergie croît très vite avec E

Perte d'énergie synchrotron

$$\Delta E \propto (E/m)^4 / R^5$$

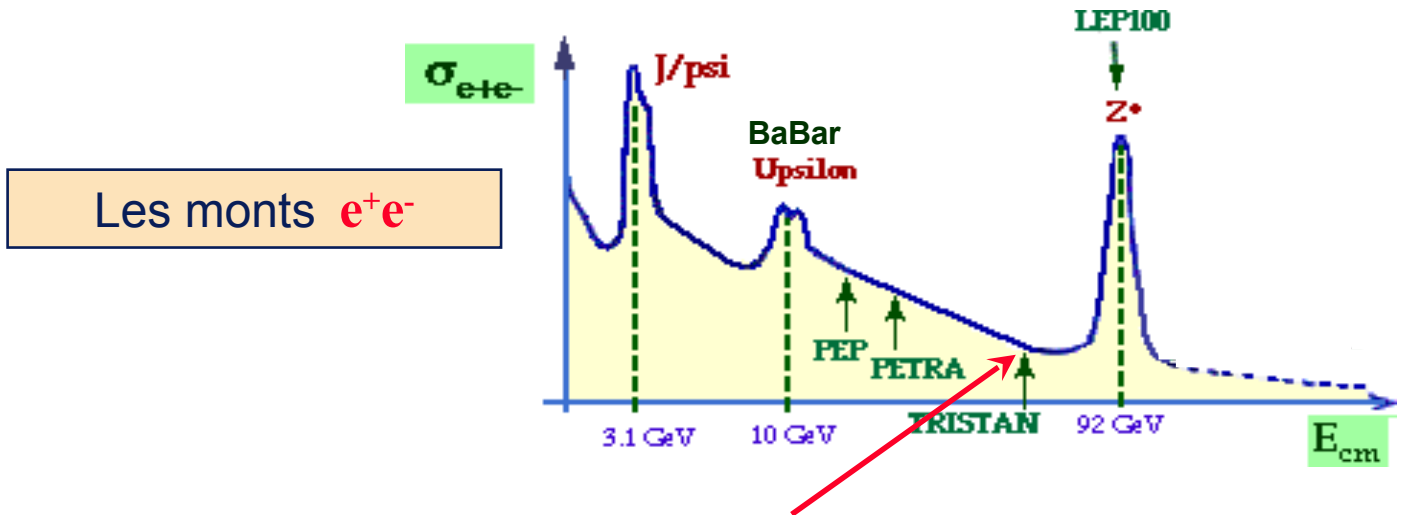
- Elle pénalise les électrons (m petit) par rapport aux protons
- Solutions :
 - augmenter le rayon R : au LEP, R = 4.3 km pour 100 GeV
 - Futur : Etude de collisionneurs linéaires pour éviter cela

Collisionneurs $\mu^+ \mu^-$

3.3 - Les collisionneurs

e^+e^- à haute énergie : le LEP et le SLC

- La probabilité d'interaction $\sigma_{e^+e^-}$ varie énormément avec l'énergie E_{cm} de la collision
- Les physiciens utilisent les «pics» de la section efficace pour leurs machines

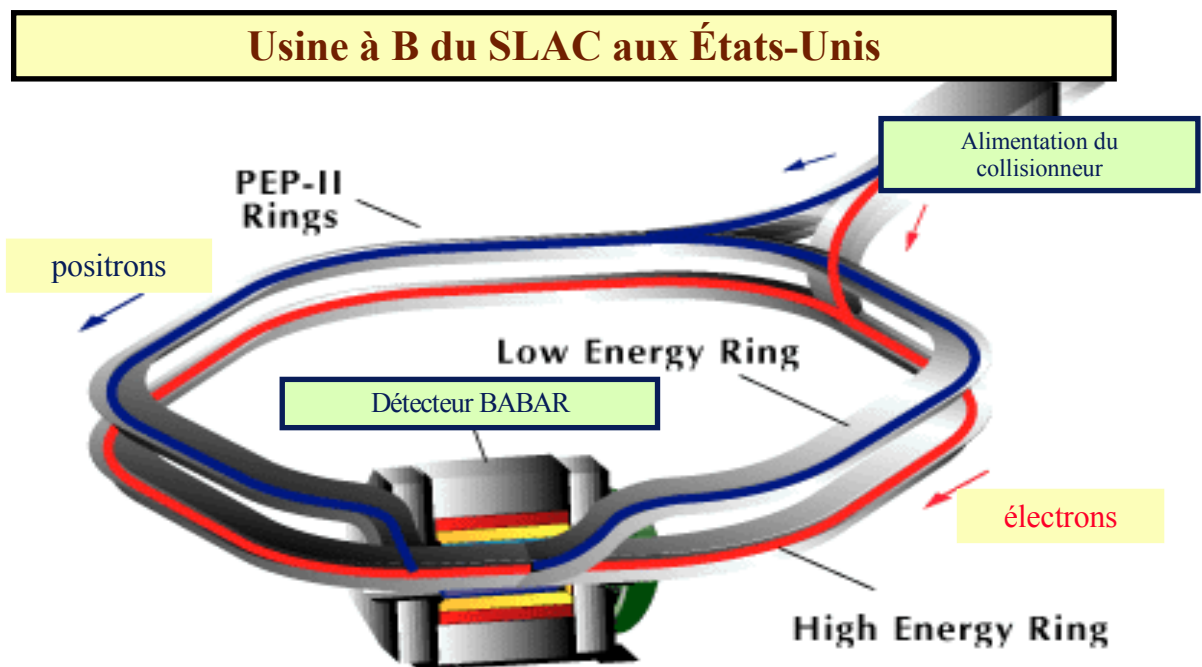


- Il vaut mieux bien choisir son point de fonctionnement !!
- Le LEP au CERN et le SLC à Stanford : usines à Z^0
 - ▶ A l'énergie de **92 GeV**, maximum isolé de la section efficace
 - ▶ A cette énergie, la paire e^+e^- produit une particule très intéressante pour les interactions faibles : le Z^0
 - $\sigma(Z^0) = 40000 \text{ pb}$. Pour $L_{int} = 100 \text{ pb}^{-1}$, le LEP produit **4 millions** de Z^0 , une véritable usine
- Terre inconnue au delà de 215 GeV
 - 215 GeV, énergie atteinte en 2000. Arrêt pour préparer le LHC...

3.3 - Les collisionneurs

e^+e^- à basse énergie : PEP II et KEKB

- On désire étudier des désintégrations très rares des mésons B porteurs de quarks **b**
 - ▶ Parmi tous les quarks **b** produits, la proportion de désintégrations intéressante est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-8}
 - ▶ Il faut produire des millions de mésons B
- On utilise des collisions e^+e^- asymétriques
 - ▶ Des paires de mésons B sont produites en abondance à l'énergie de 10.5 GeV, dite du «Upsilon(4S)» = **usines à B**
 - ▶ On choisit des faisceaux d'énergie différente. Ceci facilite l'identification des mésons B en leur donnant du «mouvement»

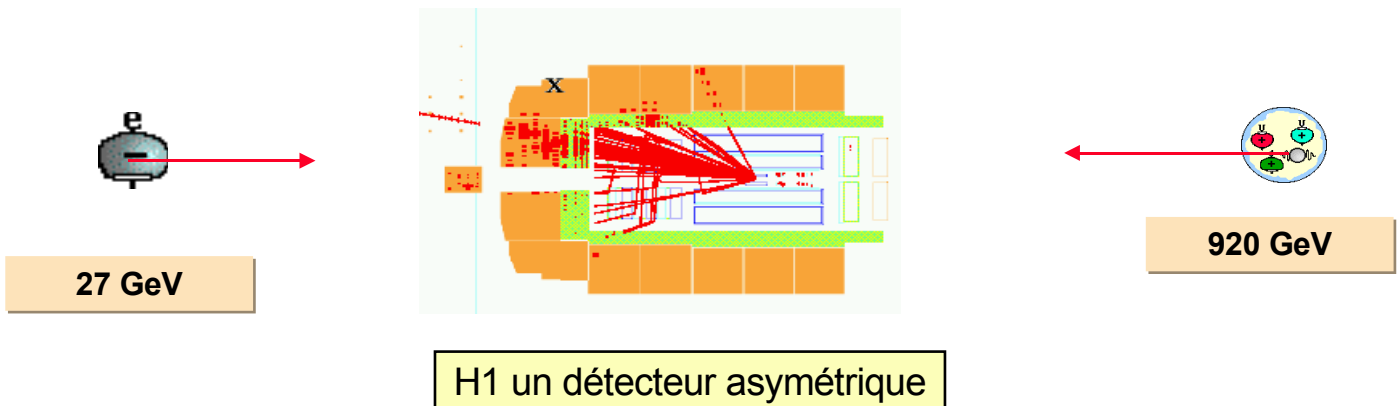


Les énergies étant différentes, électrons et positrons ne peuvent circuler dans le même anneau

3.3 - Les collisionneurs

$e^{\pm}p$ à haute énergie : HERA

- Projectile propre : l'électron n'a pas de structure
 - ▶ Il constitue une sonde idéale pour la matière nucléaire
- Cible complexe
 - ▶ Le proton est complexe. Il s'agit de comprendre sa structure fine.
- Le collisionneur HERA à Hambourg
 - ▶ Il a pris le relais de l'accélérateur linéaire de Stanford qui a joué un rôle de pionnier (Le SLAC a alimenté ensuite des collisionneurs e^+e^- : PEP, SLC et maintenant PEP-II).
 - ▶ L'énergie utile dans HERA est beaucoup plus élevée, et permet de sonder de très petits détails du proton (10^{-18} mètres !!)
- Les détecteurs H1 et ZEUS
 - ▶ Détecteurs asymétriques, car collisions asymétriques
 - ▶ électrons ou positrons de 27 GeV - protons de 920 GeV
 - ▶ 318 GeV d'énergie utile



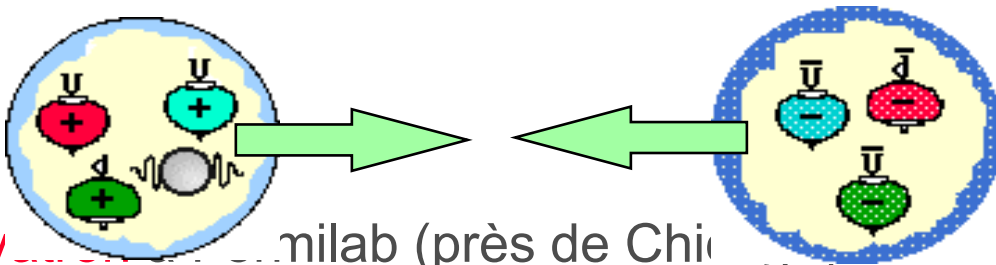
3.3 - Les collisionneurs

Machines Antiproton-proton

- Energies très élevées dans le centre de masse
 - ▶ Les protons peuvent être accélérés à plus grande énergie que les électrons (rayonnement synchrotron faible)
 - ▶ SPS au CERN : Maximum = 0.90 TeV
 - ▶ Tevatron à Fermilab : ~2 TeV
- Interaction forte, donc sections efficaces importantes

$$\sigma (\text{proton - antiproton}) \approx 1 \text{ million de fois } \sigma (e^+e^-)$$

- ... et taux d'acquisition élevés
 - ▶ Machines beaucoup plus bruyantes que e^+e^-
 - ▶ Sélection des événements et déclenchements : conditions extrêmes
- Collision complexe de quarks et de gluons

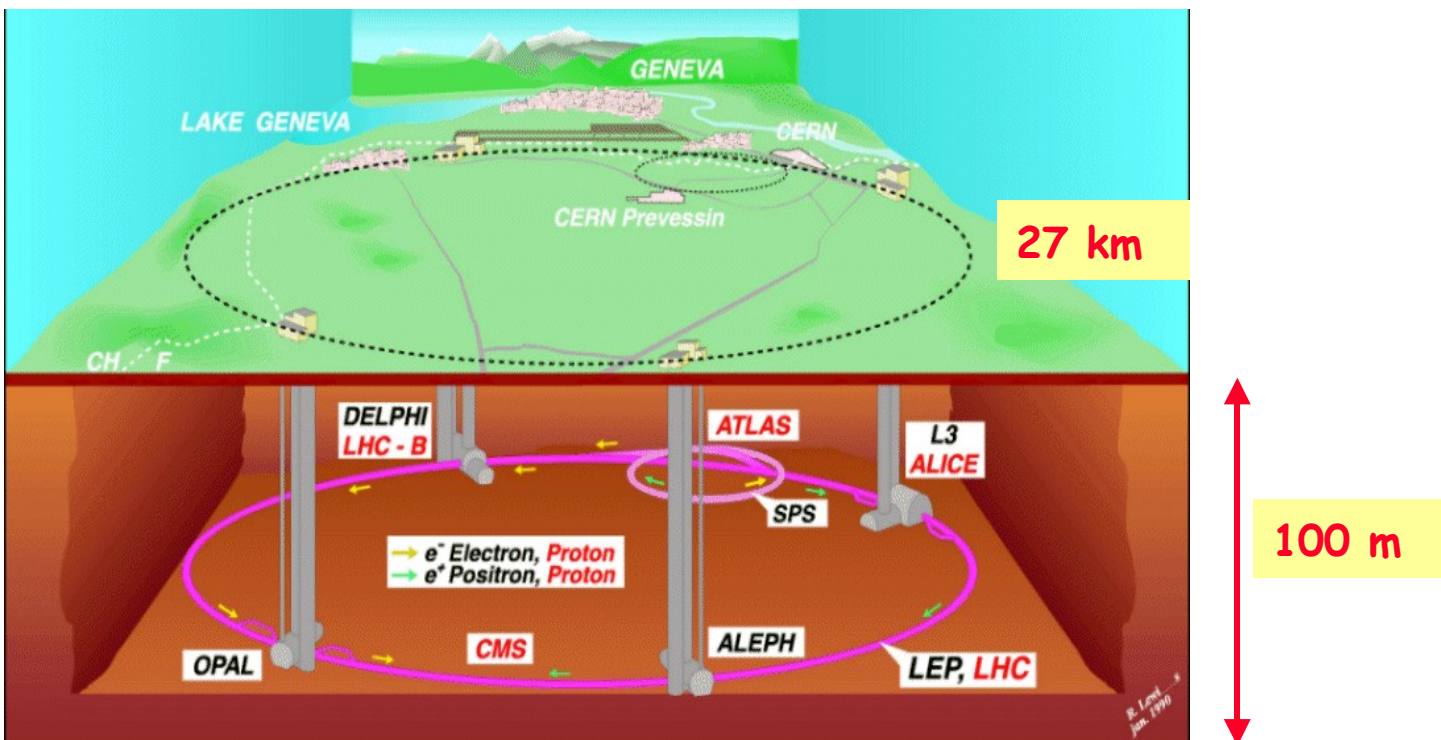


- Le Tevatron à Fermilab (près de Chicago)
 - ▶ Découverte du quark top, produit par une collision d'un quark et d'un anti-quark.
 - ▶ Une partie seulement de la collision est utilisée pour produire le quark top, le reste étant emporté par d'autres quarks et gluons

3.3 - Les collisionneurs

Très hautes énergies en proton-proton : le LHC

- Proton contre proton :
 - ▶ Il faut deux tubes à vide (deux faisceaux de même charge, en sens inverse, ont besoin de champs magnétiques opposés)
 - ▶ Energie colossale : **14 TeV**
- Installation :
 - ▶ L'anneau utilise le tunnel creusé pour le LEP. Deux tubes à vide situés dans le même aimant à «double ouverture».
 - ▶ Démarrage en 2007
- Quatre détecteurs : ATLAS, CMS, LHCb, ALICE
- Le gigantisme à tous points de vue
 - ▶ Evénements très complexes



3.3 - Les collisionneurs

Un événement simple au LHC

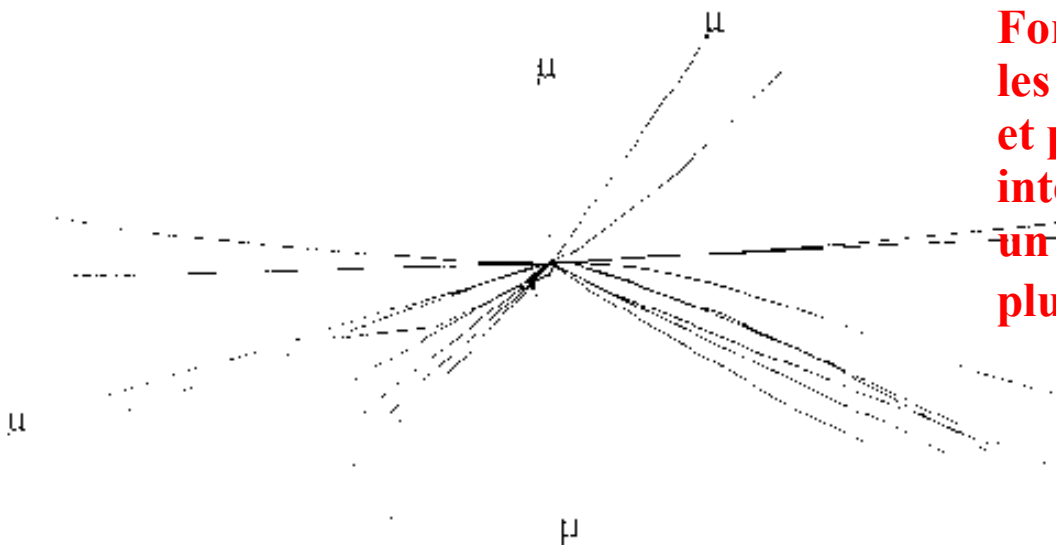
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$$

En principe un événement simple avec 4 traces chargées

30 minimum bias events + $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



all charged particles with $|\eta| < 2.5$



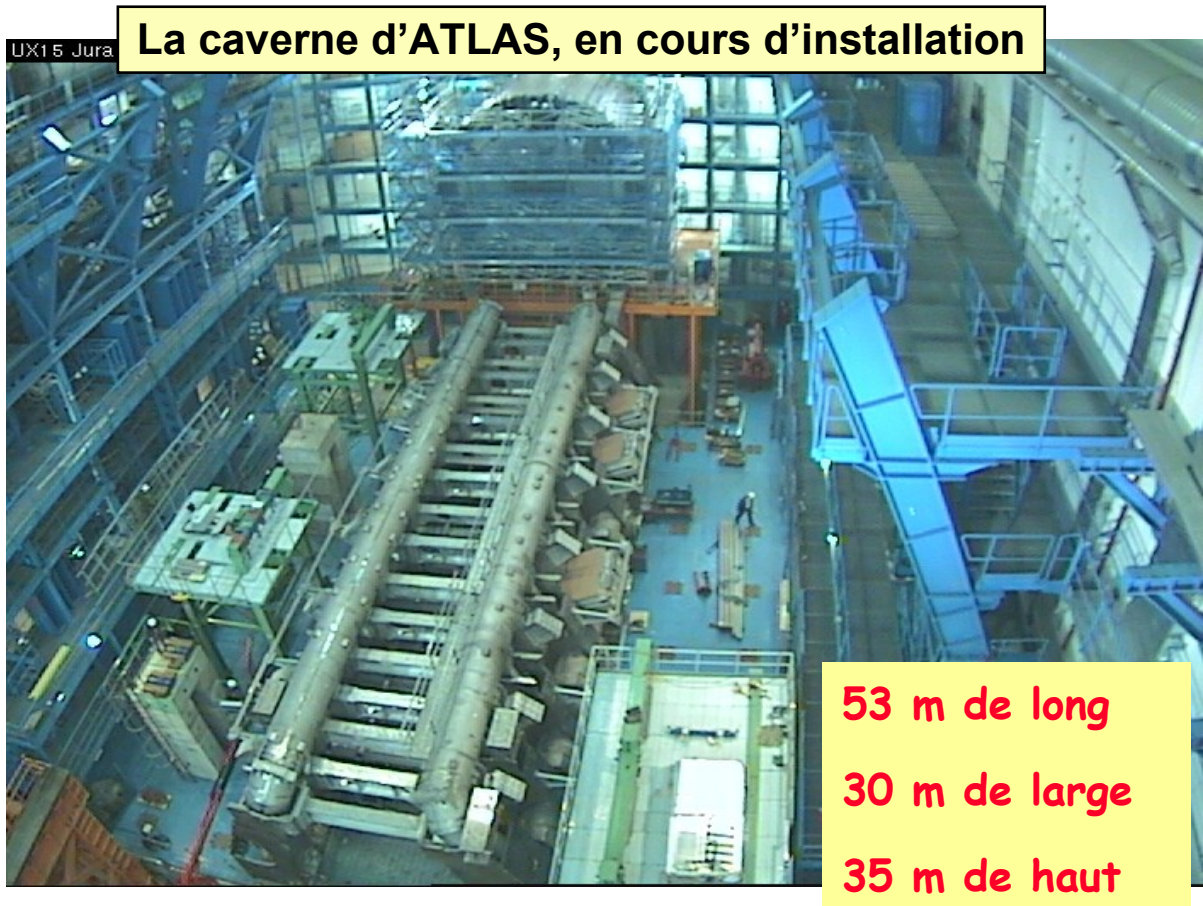
reconstructed tracks with $p_t > 2.0$ GeV

Fort heureusement les événements et particules intéressantes ont un grand P_T et sont plutôt centrales

3.3 - Les collisionneurs

LHC, projet mondial

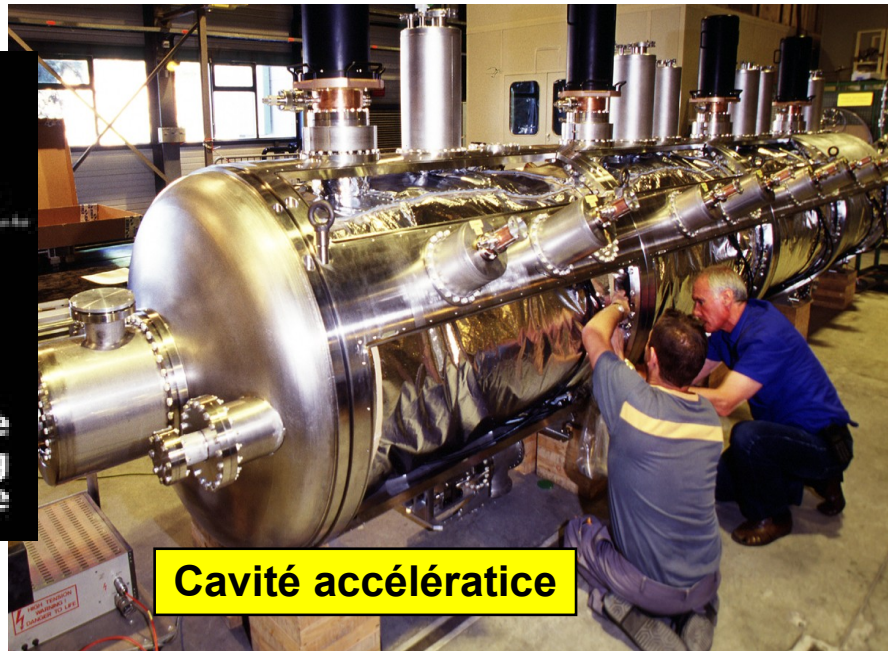
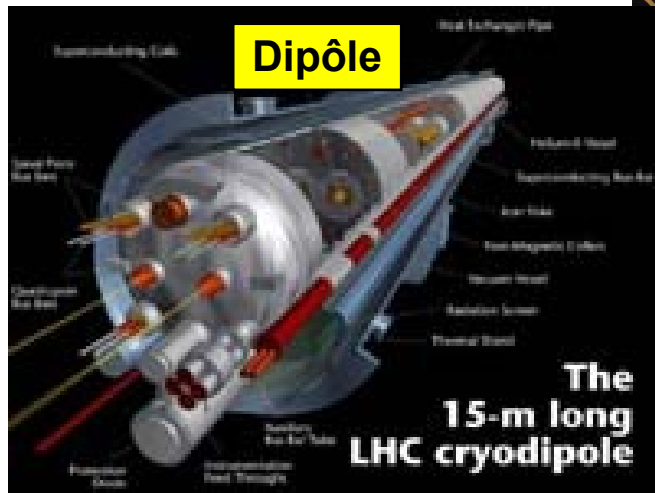
- Le projet LHC dépasse le cadre européen : les japonais, les américains, les chinois, ... y participent
- Une machine mondiale qui mettra plus d'une décennie à être construite, avec des détecteurs et défis techniques en proportion



3.3 - Les collisionneurs

L'accélérateur LHC

Le LHC, la plus grande installation supraconductrice du monde : 1.8 K, hélium superfluide sur 27 km



3.3 - Les collisionneurs

Le complexe du CERN

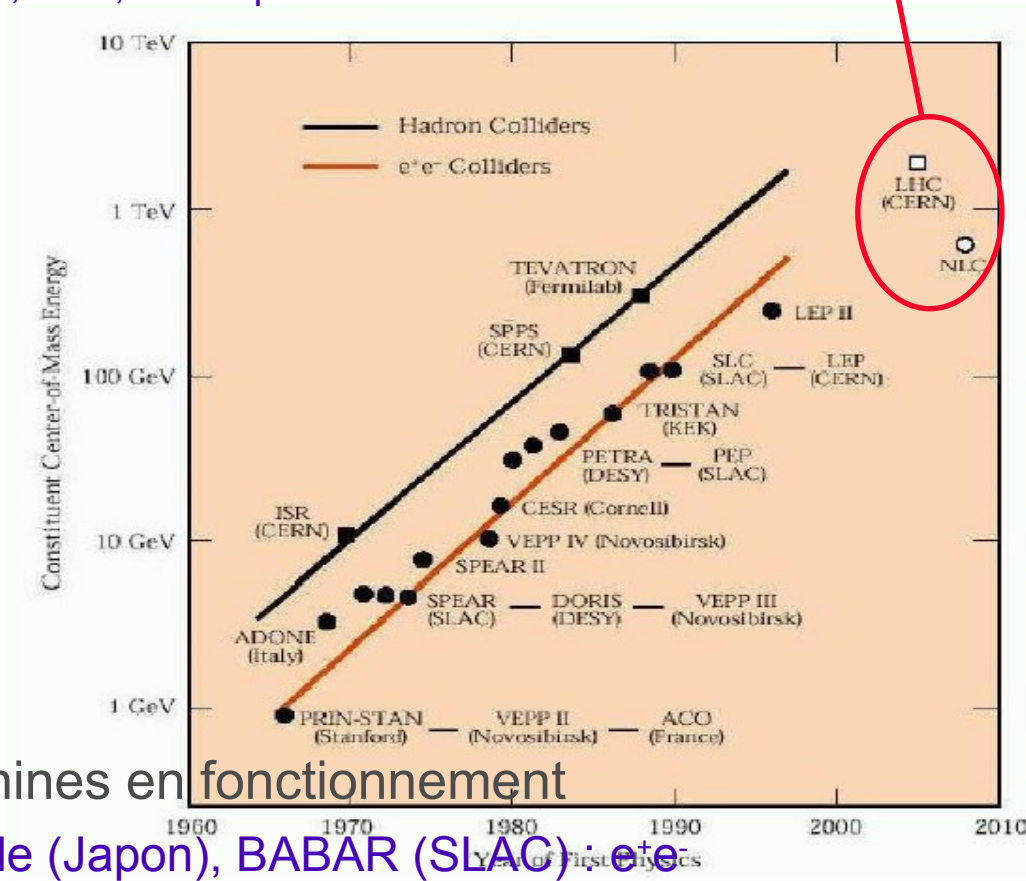
- 1954 : Premier synchrotron à protons (**PS**)
 - Il atteindra 30 GeV. Expériences sur cible fixe
- 1976 : Mise en fonctionnement du Super Synchrotron à protons de 300 GeV ou **SPS**
 - Le SPS est alimenté par le PS
 - Premier collisionneur proton-proton : les ISR
- 1981 : Transformation du SPS en collisionneur pp–
 - Introduction d'antiprotons
- 1980 -1990: Construction de l'anneau du **LEP**
 - Faisceaux d'électrons et de positrons de 90 GeV
- 2007 : Réutilisation du tunnel du LEP pour **LHC**
 - Collisionneur de proton-proton de très haute énergie



3.3 - Les collisionneurs

Evolution des machines

- Malheureusement, la loi linéaire n'est plus vérifiée
 - Coût, délai, technique



Machines en fonctionnement

- Belle (Japon), BABAR (SLAC): e⁺e⁻
- Tevatron (Chicago) : p-anti p
- Hera (Hambourg) : e-p

Futures Machines

- LHC : proton-proton (2007)
- FLC : e⁺e⁻ (2015?)

§ 3.4 - Les fonctions des détecteurs

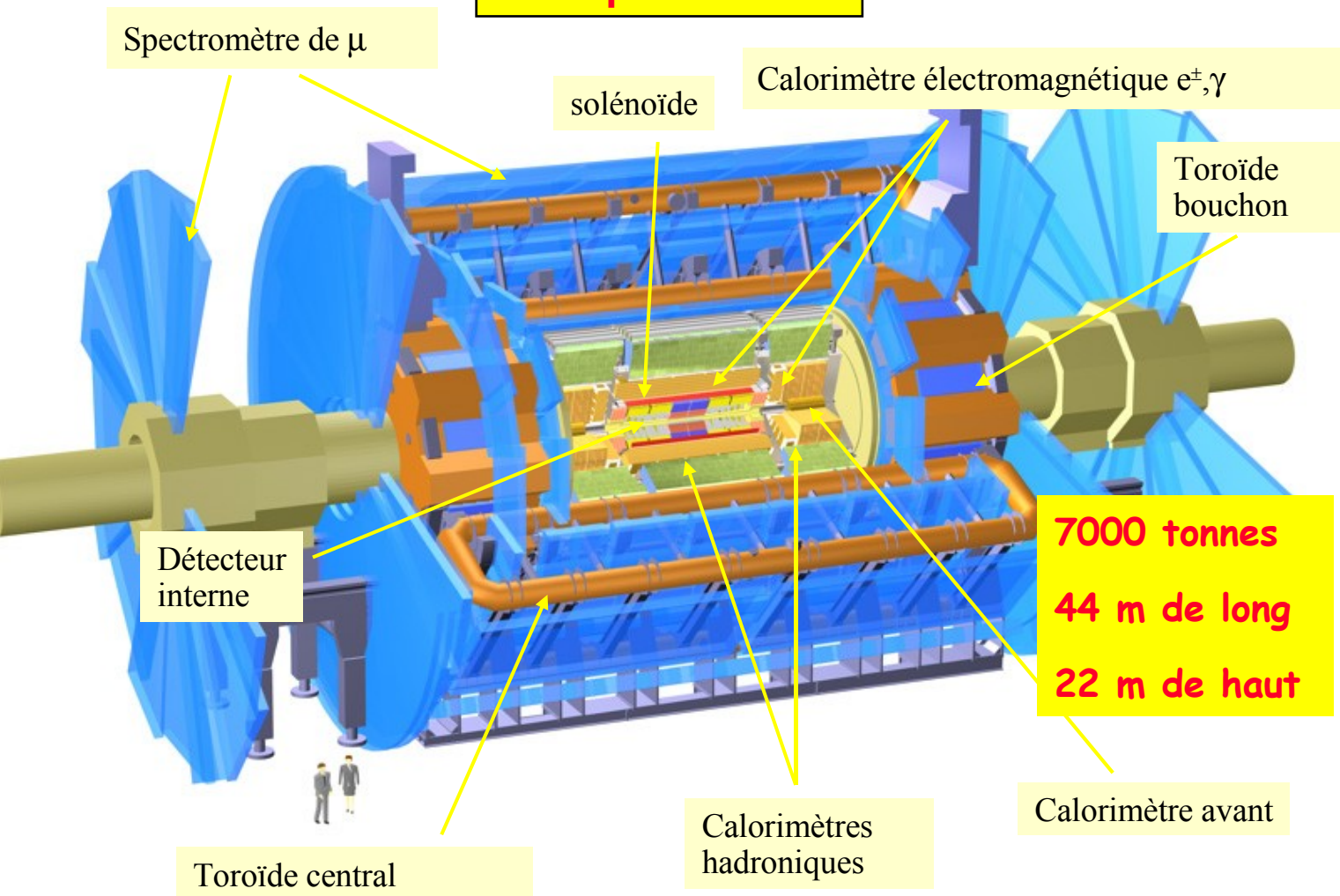
Quelques principes. Les principales fonctions des détecteurs :

- Assemblages de sous-détecteurs
- Mesures de trajectoires et de quantité de mouvement
- Mesures d'énergie
- Identification de particules
- Problèmes d'acceptance
- Déclenchements et sélection d'événements

Assemblages de sous-détecteurs

- L'anatomie d'un gros détecteur : structure en oignon
 - ▶ Couches internes : mesure des trajectoires
 - ▶ Aimant : courber les particules chargées
 - ▶ Calorimètres : arrêter et mesurer l'énergie des particules
 - ▶ A l'extérieur, chambres détectant les muons
- Ces détecteurs essaient de couvrir tout l'espace (4π)

Exemple : ATLAS



3.4 - Les fonctions des détecteurs

Les trajectographes (1)



Mesurer la quantité de mouvement P

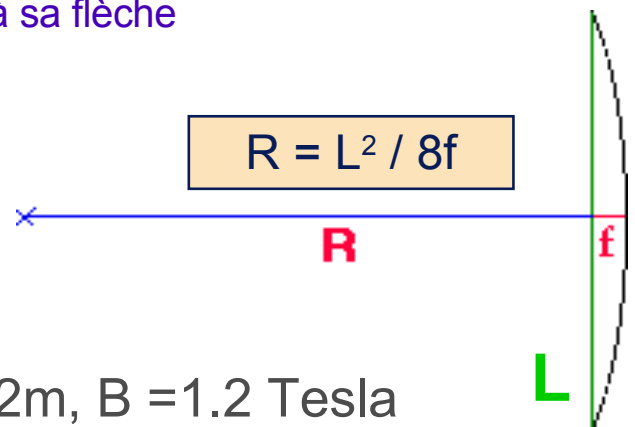
- Mesure de P = mesure de trajectoire (traces chargées)
 - ▶ Valeur de P proportionnelle au rayon de courbure

$$P \text{ (GeV)} = 0.3 B \text{ (tesla)} R \text{ (m)}$$

- ▶ Le rayon de courbure d'un arc est lié à sa flèche



Reconstitution de la trajectoire à partir de pointés dans divers détecteurs

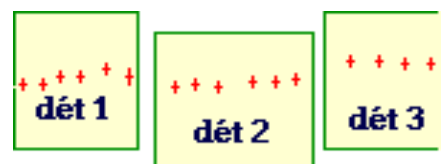


- Exemple détecteur LEP : L = 2m, B = 1.2 Tesla

P(GeV)	R(m)	f(cm)
1.0	2.8	18.
10.0	27.8	1.8
45.0	125.	0.4

- Pour avoir une bonne mesure de P

- ▶ Mesurer assez long
- ▶ Bien aligner les détecteur
- ▶ Champ magnétique intense
- ▶ Minimisation de la matière (quasi vide)



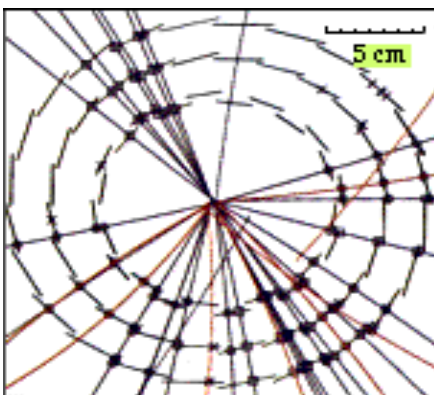
3.4 - Les fonctions des détecteurs

Les trajectographes (2)

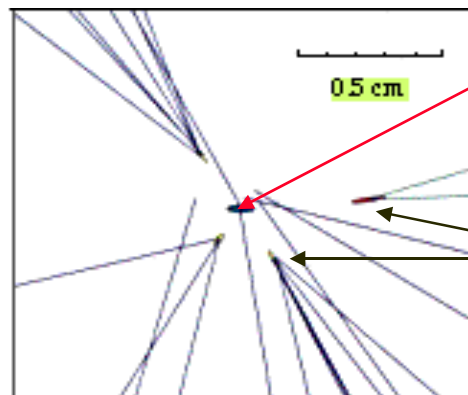


Mesurer les courtes durées de vie

- ▣ Très courts parcours et «**micro vertex**»
 - Observer les désintégrations de mésons «charmés» et «beaux» avec des détecteurs «micro vertex»
- ▣ **Défi** : voir des parcours de 1 mm en extrapolant de 5 cm
 - La zone où se produisent les désintégrations est dans le tube à vide, à quelques cm de la première couche du détecteur
 - Le détecteur comprend 2 à 3 couches minces destinées à fournir des pointés très précis
 - Précision d'un pointé micro vertex : une dizaine de microns avec des micro pistes de silicium



Le tube à vide et les pointés du micro vertex de DELPHI



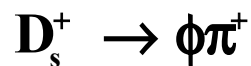
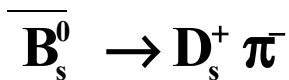
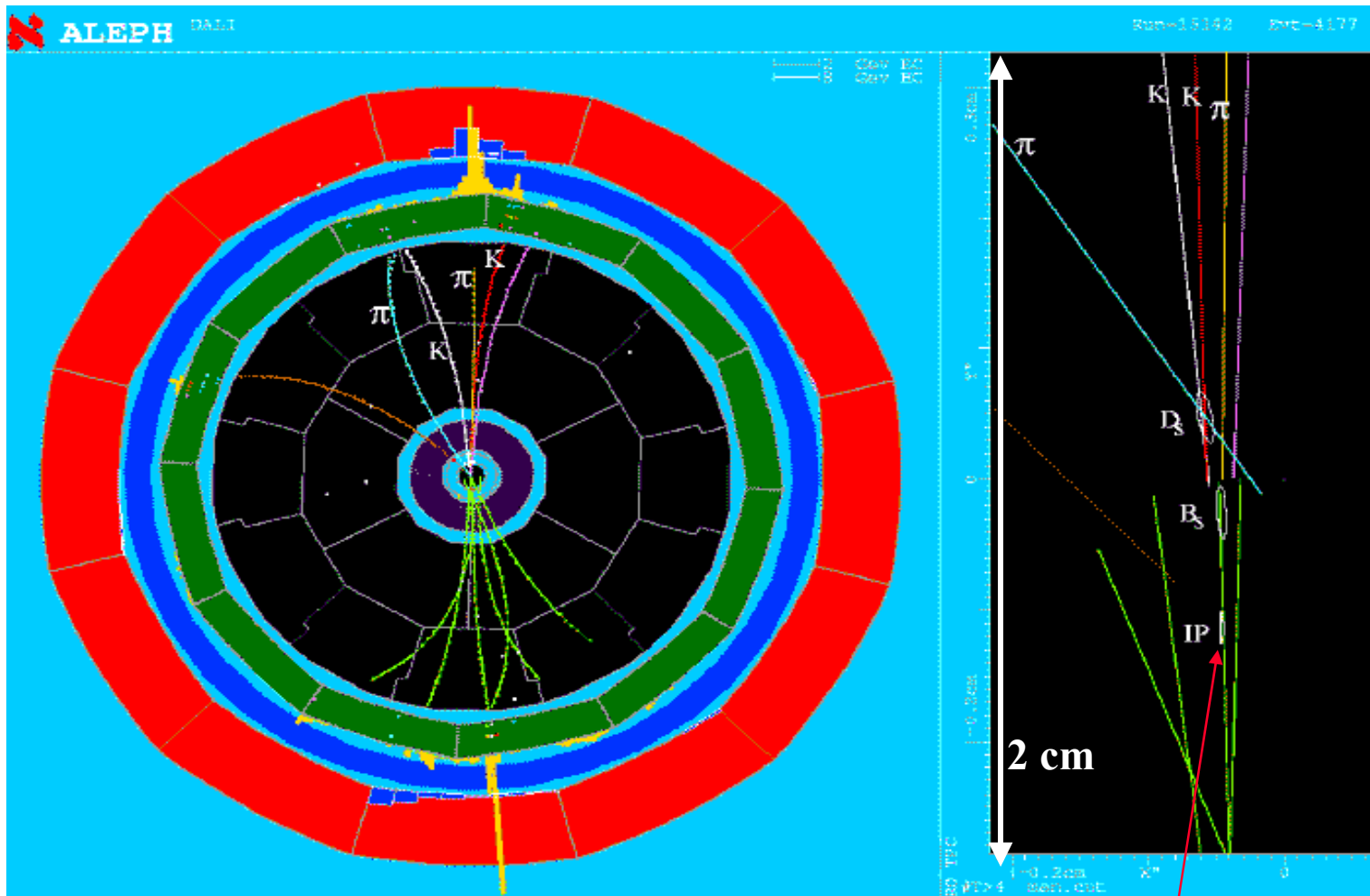
Agrandissement

3.4 - Les fonctions des détecteurs

Trajectographie dans ALEPH

Vue dans le plan perpendiculaire au faisceau

Zoom sur la partie centrale

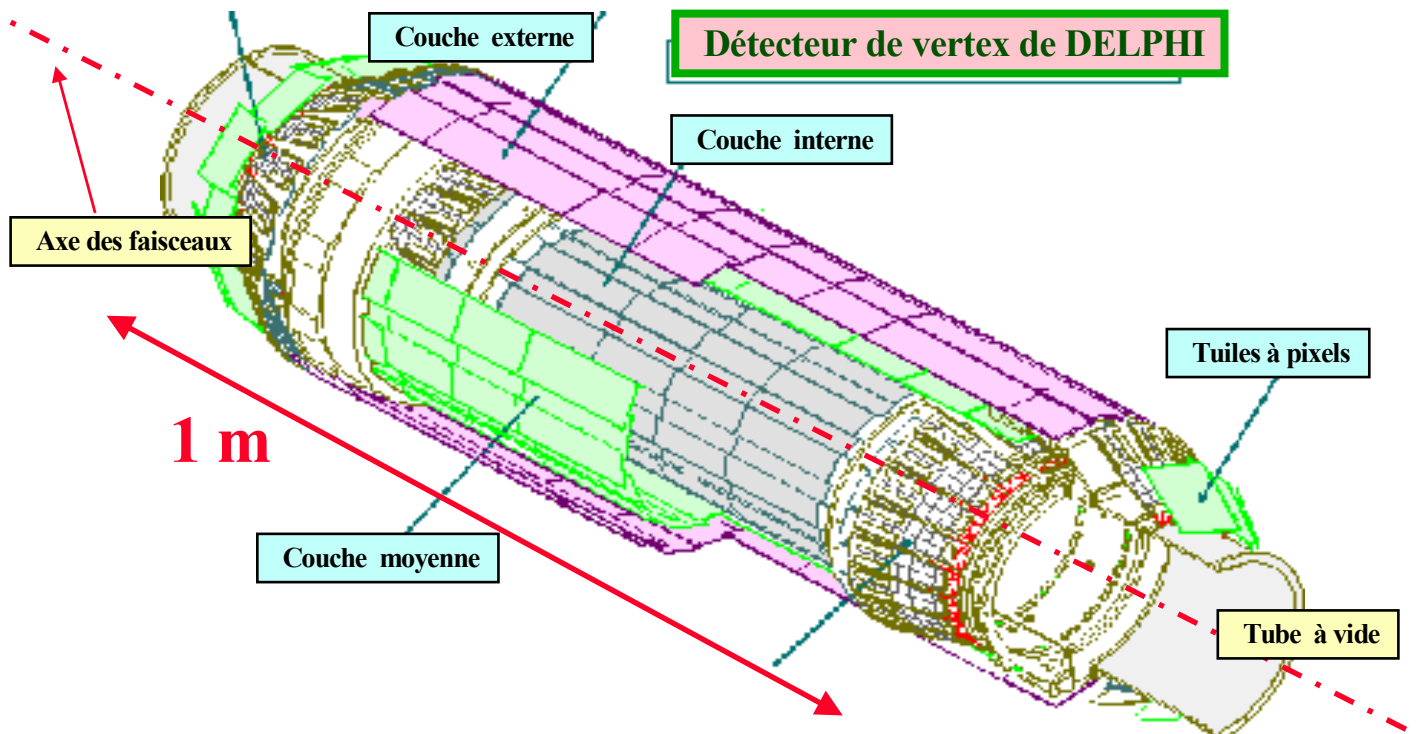


Point de collision

3.4 - Les fonctions des détecteurs

Un détecteur de vertex (DELPHI LEP 200)

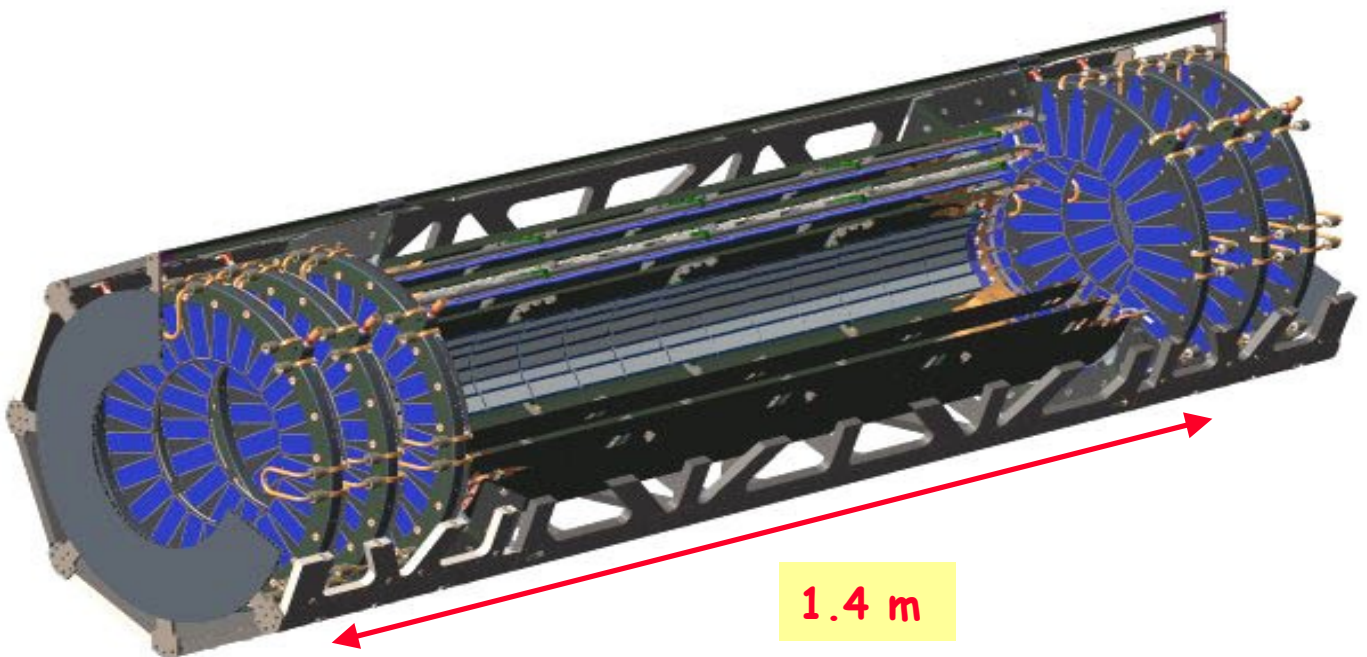
- Couverture de la partie centrale
 - ▶ Trois couches cylindriques de micro pistes pour la mesure des coordonnées
 - x,y perpendiculaires au faisceau
 - z le long du faisceau
- Couverture des parties avant et arrière
 - ▶ détecteurs à pixels et micro pistes inclinés pour garder une bonne incidence pour les particules le long de l'axe des faisceaux
- Il faut un alignement très précis des multiples composantes (tuiles) du détecteur



3.4 - Les fonctions des détecteurs

Le détecteur de vertex d 'Atlas

- Pixels au lieu de micro pistes
- 3 couches à $R=5, 9, 12$ cm
soit ~ 100 millions de canaux électroniques !
- 3 disques pour pour détecter les particules a petits angles
- Résolution $60 \mu\text{m}$ le long de l'axe du faisceau
et $12 \mu\text{m}$ dans le plan perpendiculaire au faisceau
- Insertion du détecteur de pixels indépendante du
reste du détecteur



3.4 - Les fonctions des détecteurs

Le système calorimétrique



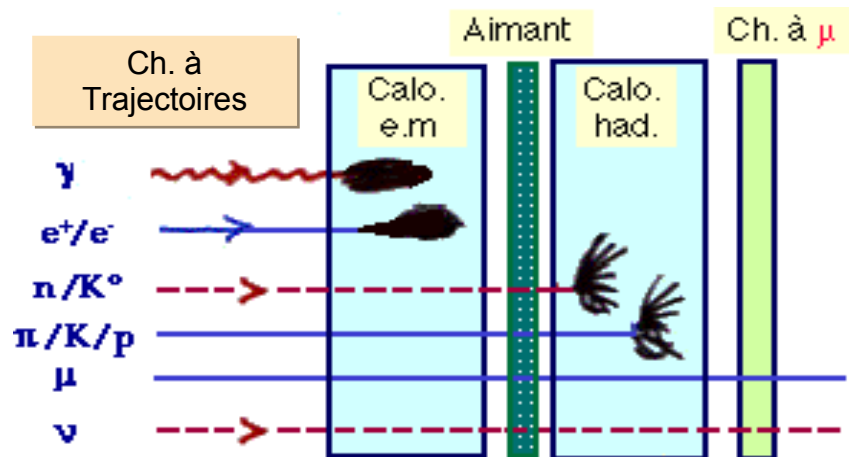
Identification des particules



Mesure de leur énergie

- ▣ Passage des particules dans la matière :
 - Les électrons sont vite arrêtés par la matière, car leur masse est faible et ils rayonnent beaucoup de photons
 - Les autres particules «rayonnent» peu, mais interagissent nucléairement, ... sauf les muons
 - Les muons sont donc les plus pénétrants (sauf neutrinos)
- Dispositif classique de **3 couches de calorimètres**
 - Calorimètre électromagnétique (gerbes $e^+ e^- \gamma$)
 - Calorimètre hadronique
 - Chambre à muons

Traversée des couches de détecteurs par diverses particules



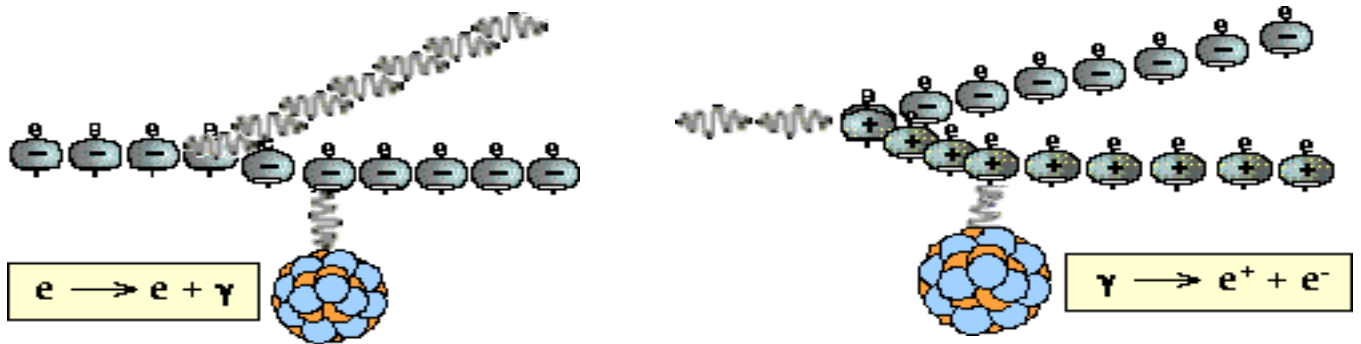
- ▣ Schéma idéalisé :
 - Un neutron ou un pion peuvent interagir dès le calorimètre électromagnétique, les gerbes se chevaucher, etc...

3.4 - Les fonctions des détecteurs

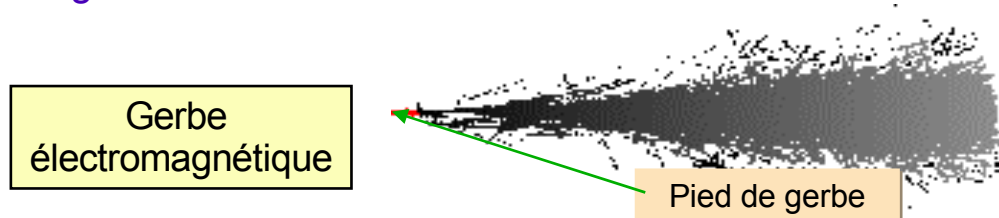
Calorimètres électromagnétiques (1)

- Deux phénomènes arrêtent γ , électrons et positrons à proximité de noyaux lourds :

- Rayonnement de freinage : $e \rightarrow e + \gamma$
- Production de paires : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



- Ils multiplient le γ ou e^+ ou e^- initial en une gerbe d'électrons et positrons de basse énergie



- Gerbes : photons, électrons, positrons et π^0

- Le fait que l'impact soit précédé d'une trajectoire différencie une particule chargée (e^+ / e^-) et un γ
- On utilise des métaux lourds (Pb) intercalé avec un milieu «détecteur» (par ex. Argon liquide)
- Les particules chargées cèdent leur énergie au milieu par ionisation

Somme énergies recueillies = $E(\text{particule primaire})$

3.4 - Les fonctions des détecteurs

Calorimètres électromagnétiques (2)

➤ Mesure de l'énergie

– Photons, électrons, positrons sont relativistes : $E \approx P$

■ Les gerbes électromagnétiques sont spécifiques des γ et e^+ / e^-

▶ La propriété des électrons de rayonner beaucoup de photons est liée à leur faible masse. Les autres particules «rayonnent» peu

■ Précision de la mesure en énergie :

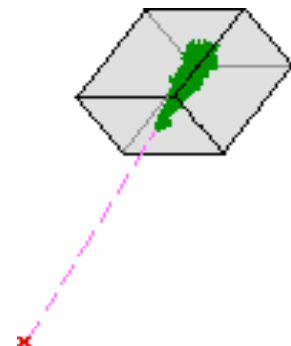
▶ Exemple d'un bon calorimètre : SPACAL H1

$$\sigma_E / E = 1.0 \% + 7\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$$

▶ Pour un photon de 10 GeV, la précision est de 3%

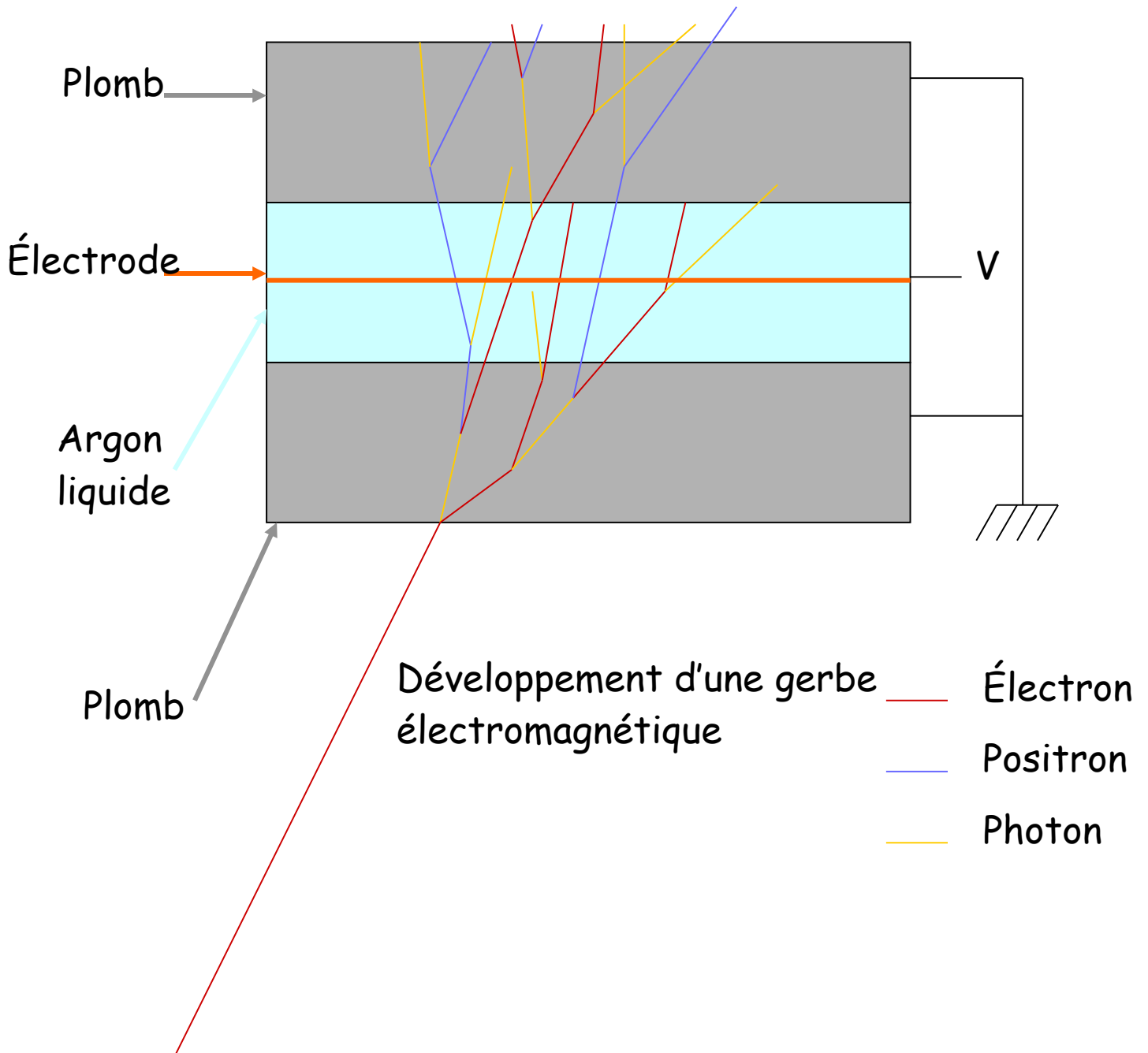
➤ Mesure de la direction : le pied de gerbe fournit la direction d'un gamma

Reconstitution de la direction d'un gamma en connectant le point d'interaction et le pied de gerbe



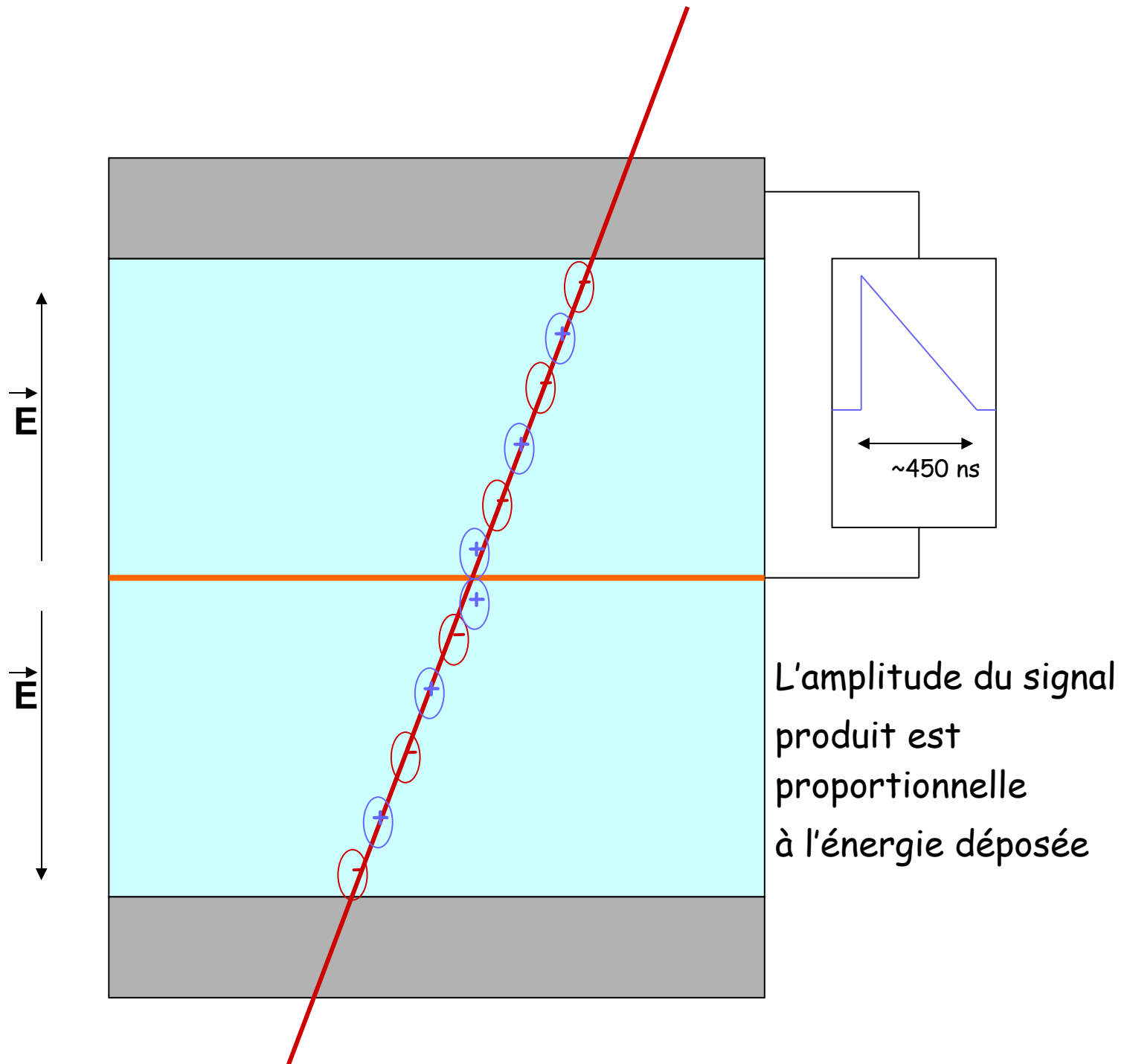
3.4 - Les fonctions des détecteurs

Principe de fonctionnement (1)



3.4 - Les fonctions des détecteurs

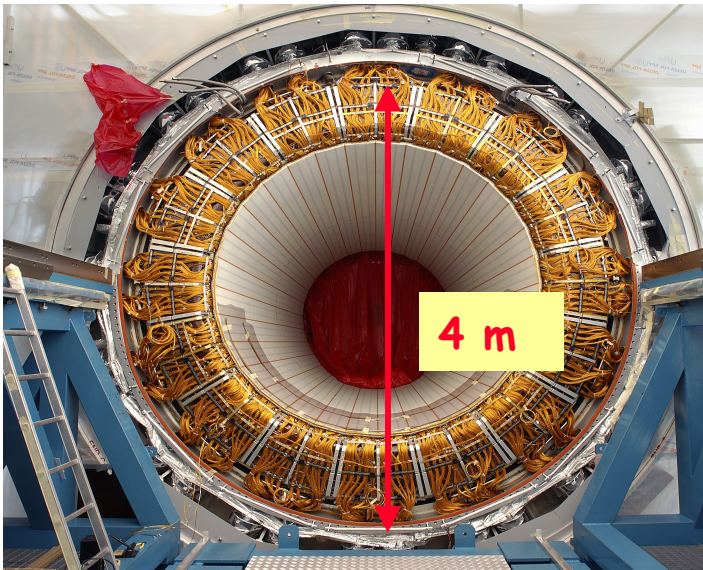
Principe de fonctionnement (2)



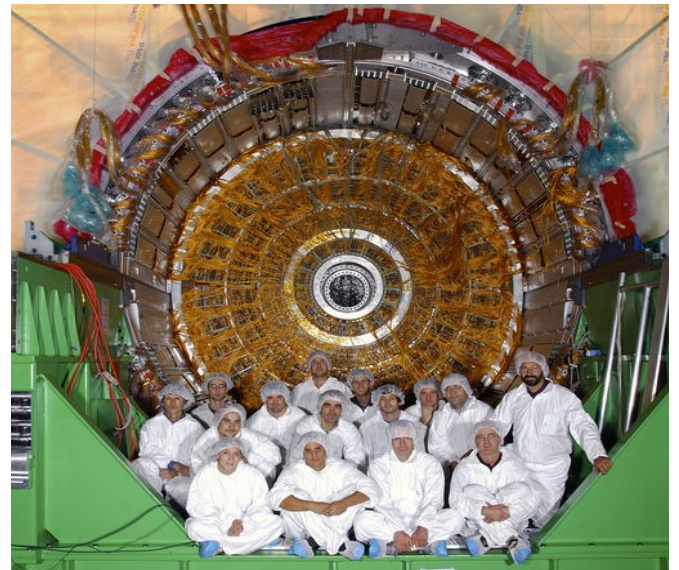
3.4 - Les fonctions des détecteurs

Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS

partie centrale



partie « tonneau »



Géométrie en accordéon



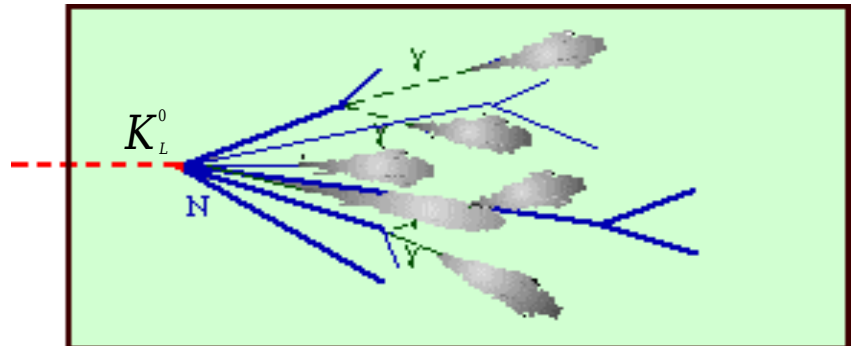
3.4 - Les fonctions des détecteurs

Calorimètres hadroniques

■ Le mécanisme des gerbes hadroniques

- ▶ Les hadrons génèrent aussi des gerbes en traversant des matériaux lourds
- ▶ le mécanisme est plus complexe que celui des gerbes électromagnétiques. Les hadrons ne sont pas ou peu sujets au rayonnement de freinage, mais ils interagissent fortement avec des noyaux. Lors de ces interactions des π^0 , puis des γ sont aussi produits qui génèrent des sous-gerbes électromagnétiques

Neutron produisant une gerbe dans la ferraille instrumentée d'un calorimètre hadronique



■ Les calorimètres hadroniques

- ▶ Situés après les calorimètres électromagnétiques
- ▶ Matériaux lourds : ex. ATLAS = 2900 tonnes !

■ La précision sur l'énergie est médiocre

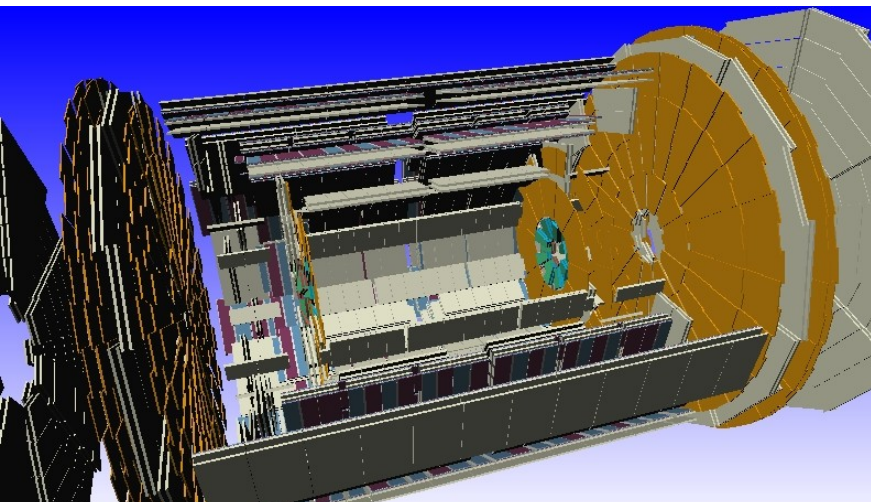
- ▶ Exemple d'un calorimètre typique

- ▶ Pour un neutron $\sigma_E / E = 2.0 \% + 50 \% / \sqrt{E (\text{GeV})} \%$

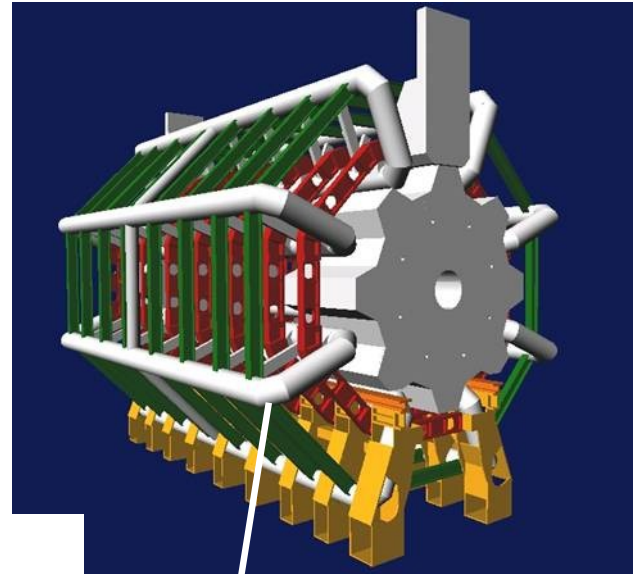
3.4 - Les fonctions des détecteurs

Le spectromètre à muons

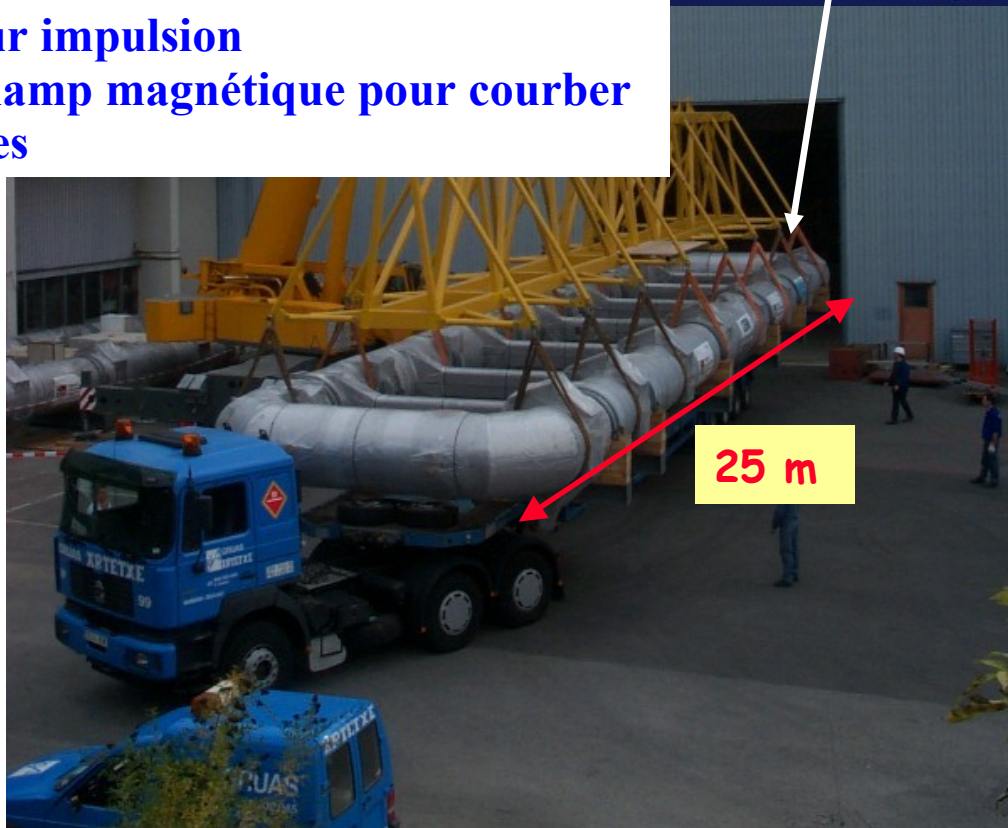
Spectromètre à muons



Aimant toroïdal



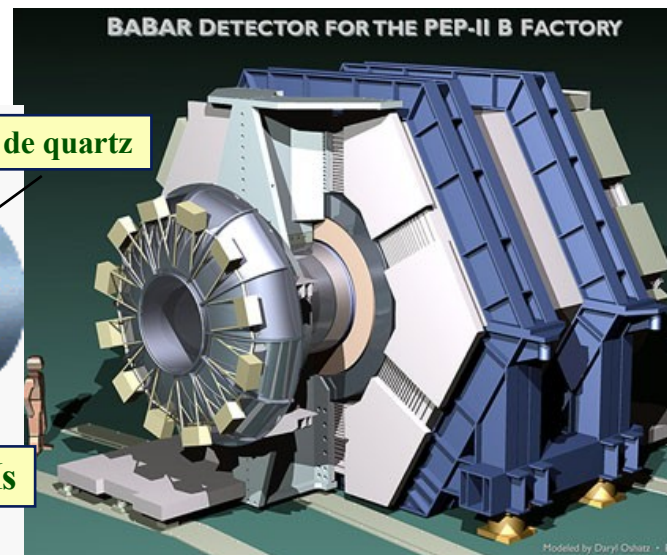
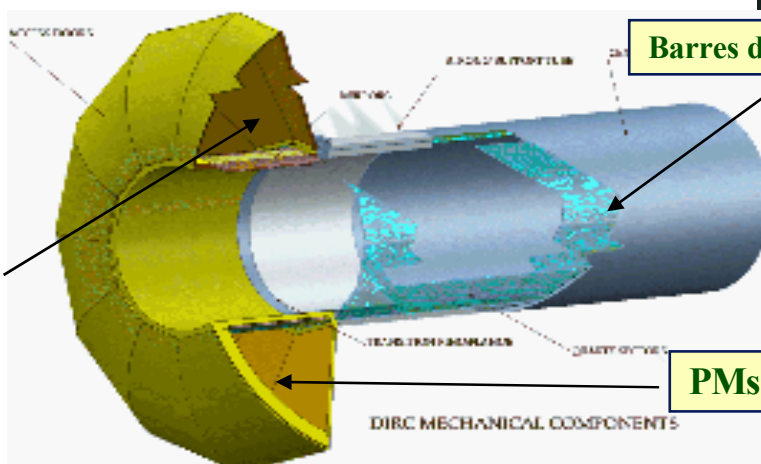
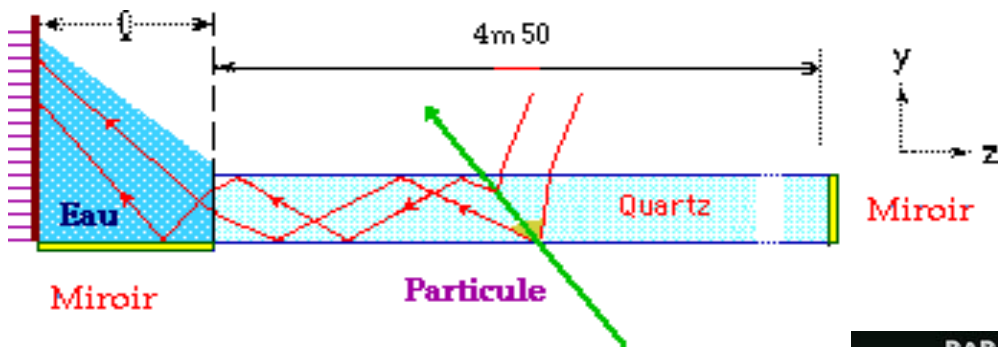
- Reconstruire les traces des muons
- Mesurer leur impulsion
- Créer un champ magnétique pour courber les trajectoires



3.4 - Les fonctions des détecteurs

Un détecteur Čerenkov : le DIRC

- Il est important de distinguer les π et les K jusqu'à 4 GeV dans l'expérience BaBar
- Solution originale du DIRC
 - ▶ Lumière Čerenkov générée dans de minces barreaux de quartz
 - ▶ Elle est récoltée, sur le côté, par réflexions multiples
 - ▶ La lumière finit par pénétrer dans une «piscine» remplie d'eau et vient frapper une mosaïque de PMs
 - ▶ Il faut tenir compte des réflexions multiples pour mesurer l'angle Čerenkov



3.4 - Les fonctions des détecteurs

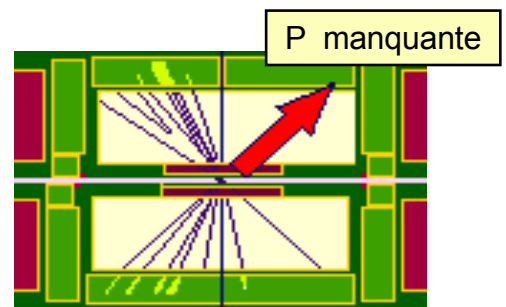
Acceptance d'un détecteur

■ Idéal de tout détecter : Bilan de collision

- ▶ On doit retrouver l'énergie totale E_{tot} et la quantité de mouvement P_{tot} ($P_{\text{tot}} = 0$ dans un collisionneur)

$$E_{\text{manquante}} = E_{\text{tot}} - \sum E$$
$$\rightarrow \qquad \qquad \qquad \rightarrow$$
$$P_{\text{manquante}} = - \sum P$$

(\sum signifie la somme sur les particules vues)

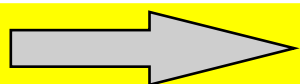
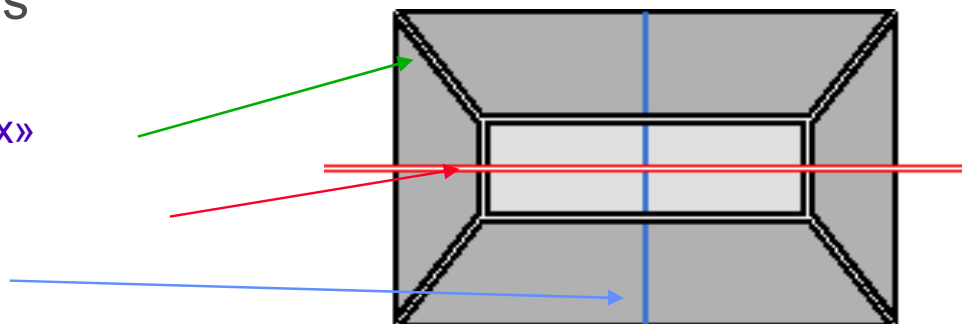


■ Problèmes des trous

- ▶ Quand une E et P manquants sont observés, est-ce dû à :
 - Une particule passée dans un trou ? Non reconstruite ?
 - une particule qui n'a pas laissé de traces ? un neutrino ?
- ▶ Pour s'assurer du dernier cas, il faut éliminer les causes de pertes, réduire les zones mortes, boucher les trous

■ Causes de pertes

- ▶ Chemins de câbles
- ▶ Les trous «faisceaux»
- ▶ Zones mortes



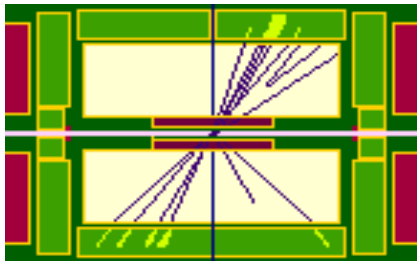
Détecteurs hermétiques

3.4 - Les fonctions des détecteurs

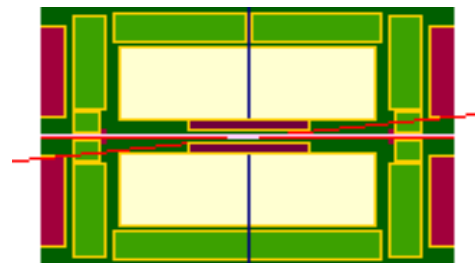
Déclenchements (triggers)

- La mentalité du chercheur d'or : ex. du LEP
 - ▶ Pépite : Evénements Z^0 avec une fréquence ≈ 1 Hz
 - ▶ Cailloux à éliminer : 500 fois plus fréquents
 - ▶ Aiguille dans une botte de foin
- Déclencher l'électronique et remplir les bandes magnétiques avec des événements utiles
- Niveaux de déclenchement
 - ▶ Décider très rapidement du déclenchement de la lecture de milliers de voies
 - ▶ Plusieurs niveaux de décision

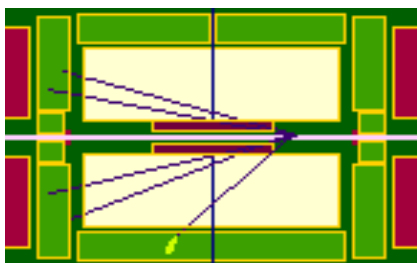
Collision des faisceaux
LEP toutes les 5.6 μ s
LHC toutes les 25 ns
(événements empilés)



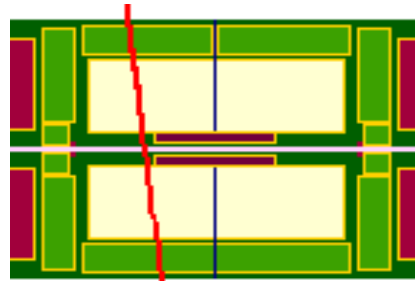
Evt Z^0 : beaucoup de particules et région centrale



Collision à distance e^+e^-
avant / arrière



Collision avec un noyau
Toutes les particules d'un côté



Muon cosmique
Collision hors temps et non centrale

3.4 - Les fonctions des détecteurs

Déclenchements (triggers)

- Au LHC, les triggers engendrent des défis pour électronique
 - ▶ Exemple: le trigger à muons de LHCb reçoit l'équivalent de 150 CDROM par seconde qu'il doit traiter en temps réel
 - ▶ Les informations proviennent d'un volume de 800 m³ et sont acheminées via 1200 fibres optiques à 1.6 Gb/s
 - ▶ Carte: 18 couches, 11000 traversées et 2000 composants
 - ▶ 4 crates de 13 cartes



§ 3.5 - Expériences hors accélérateurs

Ces expériences, héritières de l'étude des rayons cosmiques, sont en plein développement

■ Expériences d'astroparticules

- ▶ Elles visent à détecter et étudier les flux de particules en provenance du ciel

■ Exemple des expériences neutrinos

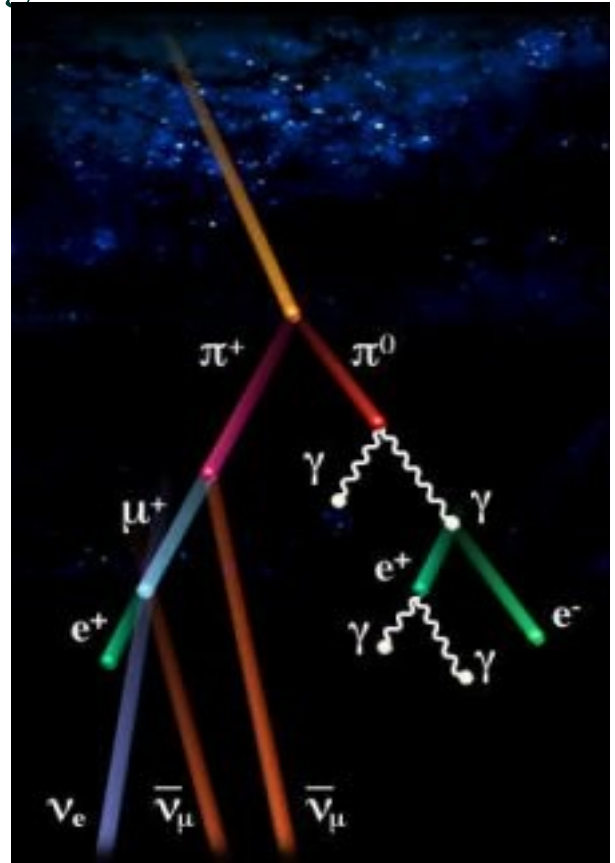
- ▶ Interactions très rares (signal très faible)
- ▶ Bruit de fond important provenant principalement du rayonnement cosmique
- ▶ Il faut se débarrasser des particules les plus pénétrantes (les muons)
- ▶ Pour cela, on enterre les expériences et on blinde les détecteurs

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Les rayons cosmiques

- Un rayon cosmique interagissant dans l'atmosphère déclenche une chaîne de collisions et désintégrations

- Productions de mésons π chargés
- Désintégrations en cascade de mésons π produisant des **muons** et des **neutrinos**
- Gerbes électromagnétiques provenant de gammas ou mésons π^0 neutres...
- ...qui se transforment en gammas, électrons et positrons

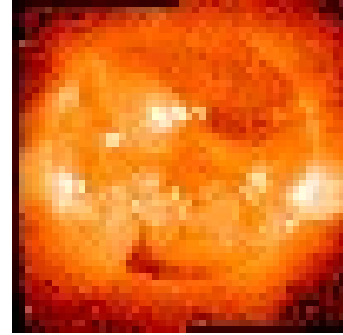


- Les particules chargées génèrent de la **lumière Čerenkov**
 - ... si elles vont plus vite que la lumière dans l'atmosphère
- Cas des neutrinos
 - Des neutrinos ne produisent pas de gerbes et peuvent traverser la terre. Ils interagissent très peu.

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Cas particulier des neutrinos

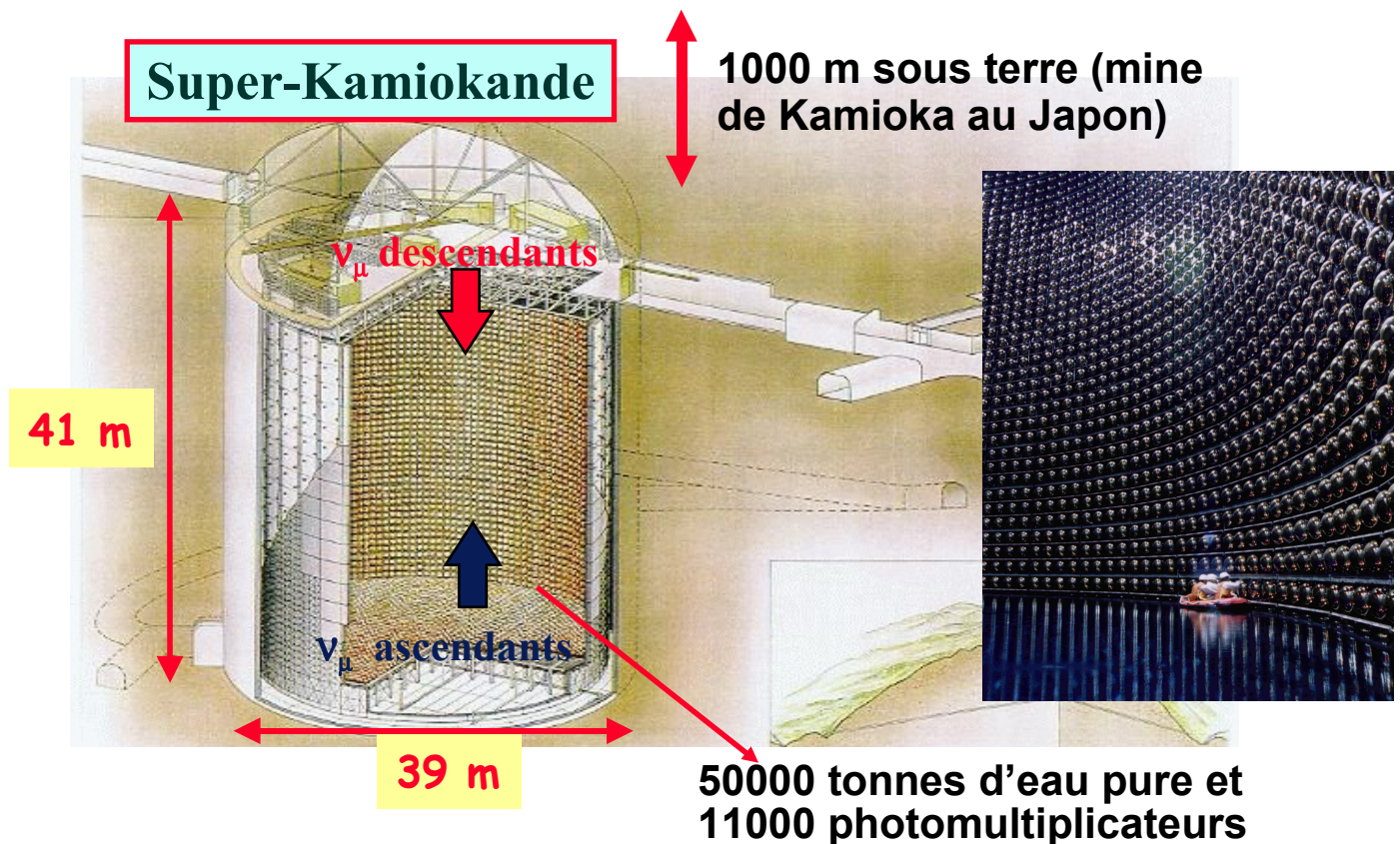
- Neutrinos atmosphériques : ν_{μ} et ν_e
 - ▶ Ce sont des sous-produits des gerbes cosmiques
 - ▶ ex. : expérience (Super-)Kamiokande
 - Neutrinos solaires : ν_e
 - ▶ Le soleil est une usine à neutrinos (neutrinos mous)
 - ▶ Ces neutrinos, en interagissant, ne produisent que des électrons
 - ▶ ex. : expériences Gallex, Sage, SNO
 - Neutrinos galactiques et extragalactiques : ν_{μ} et ν_e
 - ▶ Ils sont issus de l'explosion d'étoiles (supernovæ), et d'éventuelles autres sources (noyaux actifs de galaxie, pulsars) (exemple de la supernovæ 1987-A).
 - ▶ ex.: Amanda au pôle sud, puis projet Antarès
- ⇒ Une expérience observe plusieurs types de neutrinos
- ▶ Elle n'a pas le choix (signal + bruit de fond)
 - ▶ Ex. : (Super-)Kamiokande
 - au départ étude des neutrinos solaires
 - puis neutrinos atmosphériques,
 - et maintenant neutrinos de faisceaux d'accélérateurs...



3.5 - Expériences hors accélérateurs

Exemple : Super Kamiokande

- Les neutrinos-e en provenance du soleil semblent moins nombreux que prévus = déficit des neutrinos solaires
- Pourquoi?

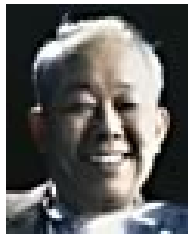


➡ cela permet de mesurer les flux ascendants et descendants de neutrinos (muoniques et électroniques)

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Oscillations de neutrinos

- Résultat (1998) : les neutrinos muoniques ascendants sont moins nombreux que ceux qui descendent
 - ▶ on en attend le même nombre
- Interprétation : les neutrinos muoniques se transforment en traversant la terre en d'autres neutrinos : ils « oscillent »
- C'est un des résultats les plus importants de ces dix dernières années
- Confirmation par SNO (Canada) en 2001
- Confirmation par KamLAND en décembre 2002, avec des neutrinos provenant de réacteurs nucléaires



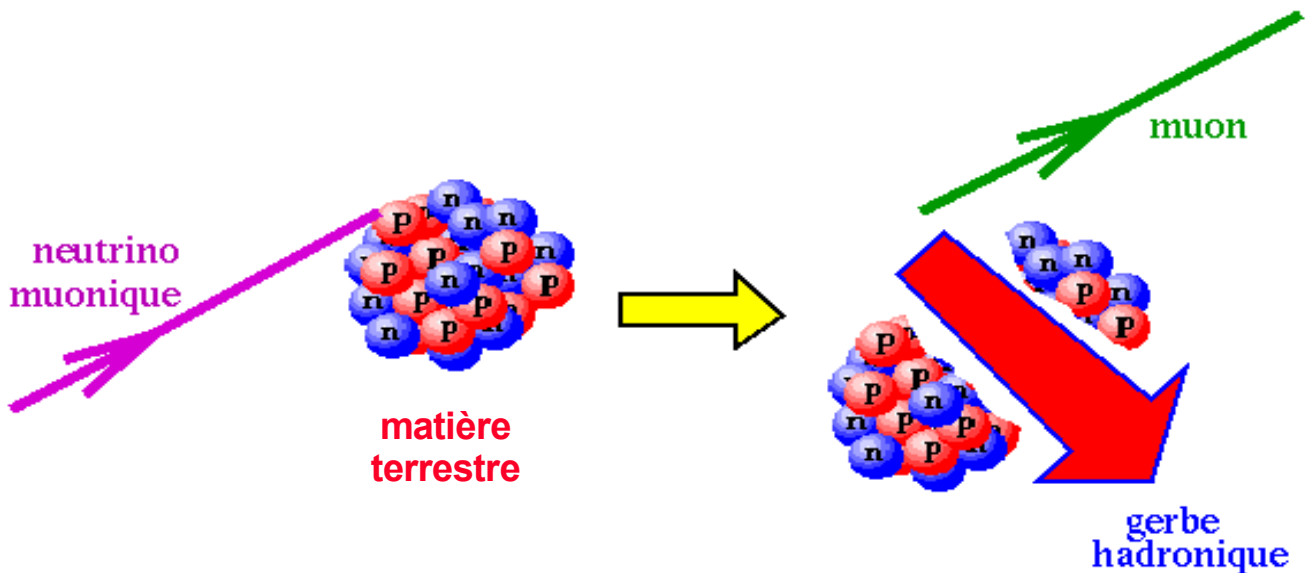
R. Davis et M. Koshiba
Prix Nobel 2002

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Exemple : l'expérience Antarès

Son objectif : construire un télescope à neutrinos de haute énergie

- principe de la détection des neutrinos :



Le muon de haute énergie peut parcourir de grandes distances (ex. 5 kilomètres à 100 TeV)

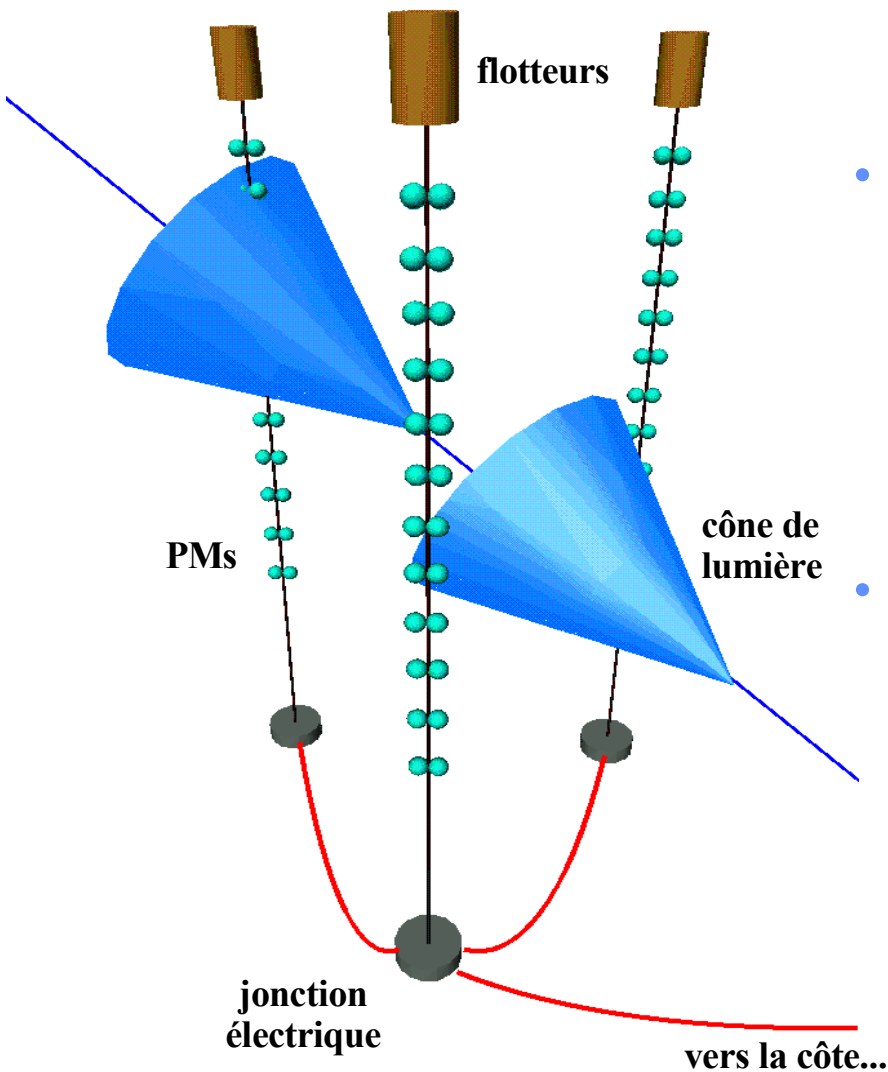
➡ même si l'interaction a lieu loin du détecteur, ce dernier peut voir le muon,

➡ le long parcours du muon augmente d'autant le volume effectif de détection.

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Expérience Antarès (principe)

On recueille alors la *lumière Čerenkov* produite par le muon à l'aide d'un réseau de photomultiplicateurs (PMs) enfoui sous la mer.

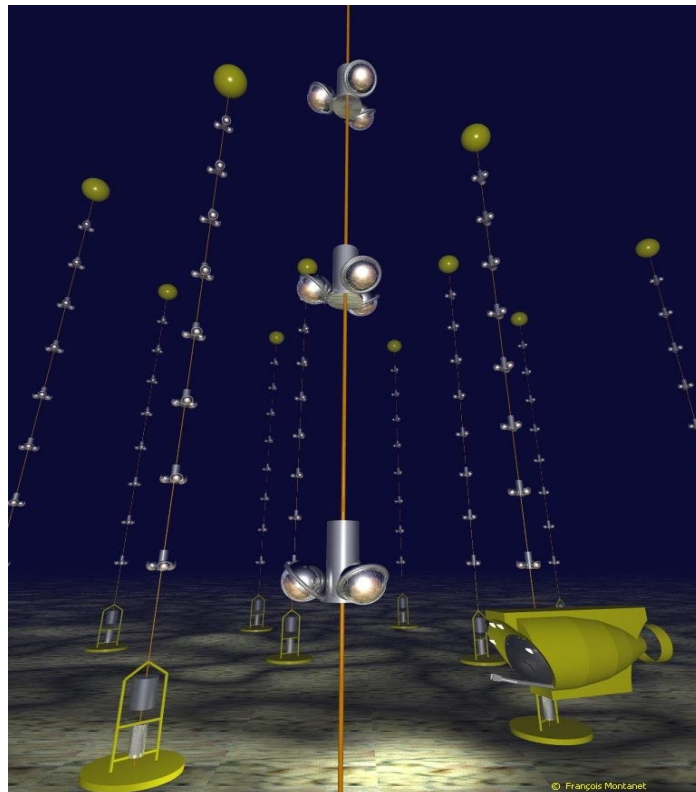


- La quantité de lumière recueillie donne l'énergie du muon **(et celle du neutrino)**
- Le développement dans le temps du sillage lumineux donne la direction du muon **et du neutrino**

3.5 - Expériences hors accélérateurs

Expérience Antarès (site)

- La terre sert de **cible** pour les neutrinos et de **filtre** pour bloquer les autres particules,
- La mer (ou la glace dans le cas d'AMANDA) sert de **milieu détecteur** du rayonnement Čerenkov et de **filtre** pour réduire le flux de muons atmosphériques (produits par interaction du rayonnement cosmique primaire avec l'atmosphère)
- Dans le cas d'Antarès, les lignes de détecteurs sont immergées au large de Toulon



3.5 - Expériences hors accélérateurs

Expérience Antarès (résumé)

