

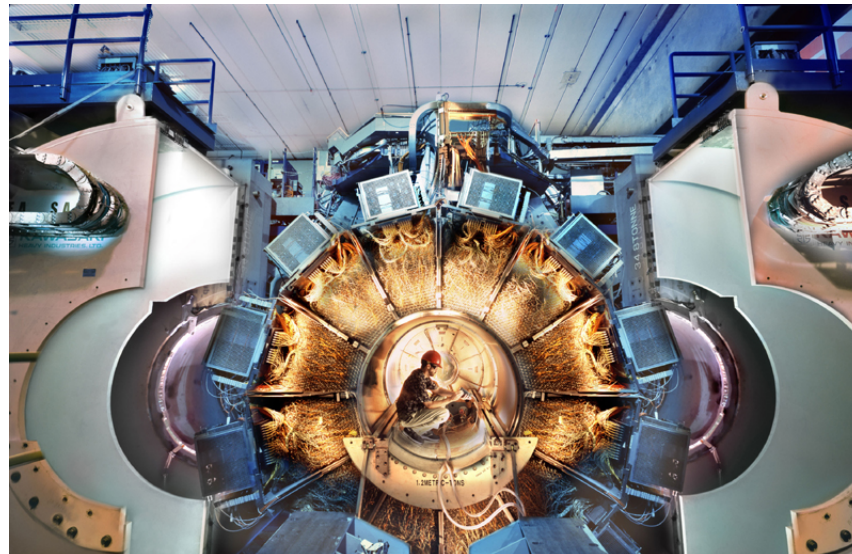
Détecteurs : généralités

Exemple du détecteur BaBar à SLAC

19 janvier 2016 – Troyes
Formation PAF académie de Reims

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

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



Comprendre le monde,
construire l'avenir®

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



L'expérience BaBar

- **Objectifs**

- Réaliser de nombreuses mesures de précision
- Rechercher des phénomènes rares

→ Accumulation du plus grand nombre d'évènements possibles, collisions « propres »

- Prise de données principale à l'énergie de 10.58 GeV
 - Masse de la **résonance $\Upsilon(4S)$** qui se désintègre en paires de **mésons**^(*) B chargés (B^+B^-) ou neutres ($B^0\bar{B}^0$) en égales proportions
- Les mésons sont des **particules instables** : $c\tau = 454.4 (492) \mu\text{m}$ pour le B^0 (B^+)
- Les mésons neutres **oscillent** : $B^0 \Leftrightarrow \bar{B}^0$
- La masse de l' $\Upsilon(4S)$ est à peine supérieure à deux fois la masse d'un méson B
 - B's produits presque au repos en cas de collisions de faisceaux de même énergie

→ Impossible de les identifier – « vertex déplacés »

→ **Solution : faisceaux asymétriques !**

$$9.0 \text{ GeV } e^- \leftrightarrow 3.1 \text{ GeV } e^+$$

$$\beta = \frac{p_{\Upsilon(4S)} \times c}{E_{\Upsilon(4S)}} = \frac{E_- - E_+}{E_- + E_+}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E_- + E_+}{2\sqrt{E_- E_+}}$$

- Emulation / compétition avec l'expérience **Belle** au Japon

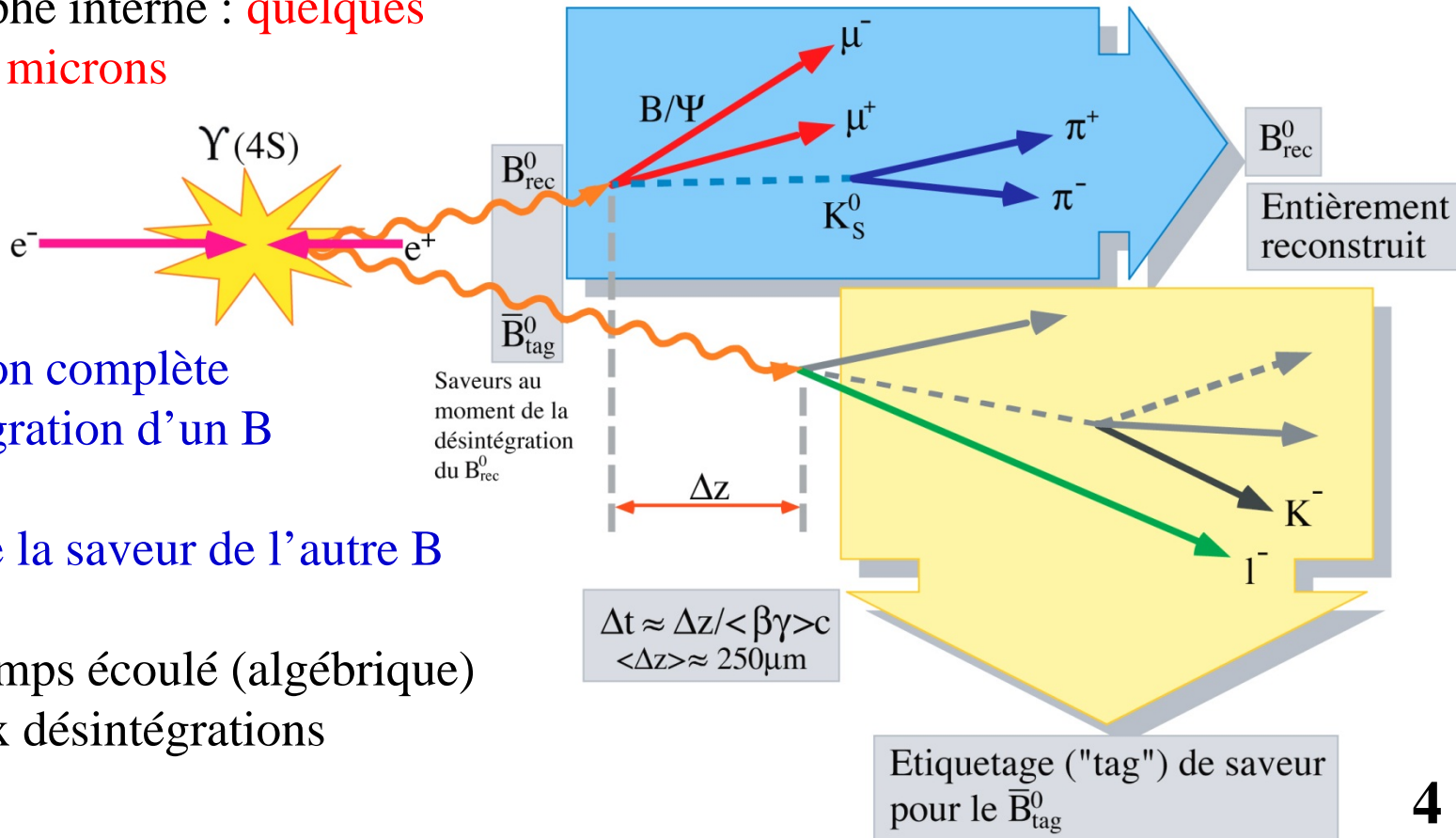
(*) Un méson est formé de deux quarks. Exemples : $B^+ = u\bar{b}$ et $B^0 = d\bar{b}$ $\beta\gamma = \frac{E_- - E_+}{2\sqrt{E_- E_+}}$

L'analyse « de base » de BaBar

- Les mésons B parcourent en moyenne $\sim 250 \mu\text{m}$ avant de désintégrer

- $\langle d \rangle \approx v \times \gamma \tau = \boxed{\beta\gamma} \times c\tau \approx 250 \mu\text{m}$
 $= 0.56$

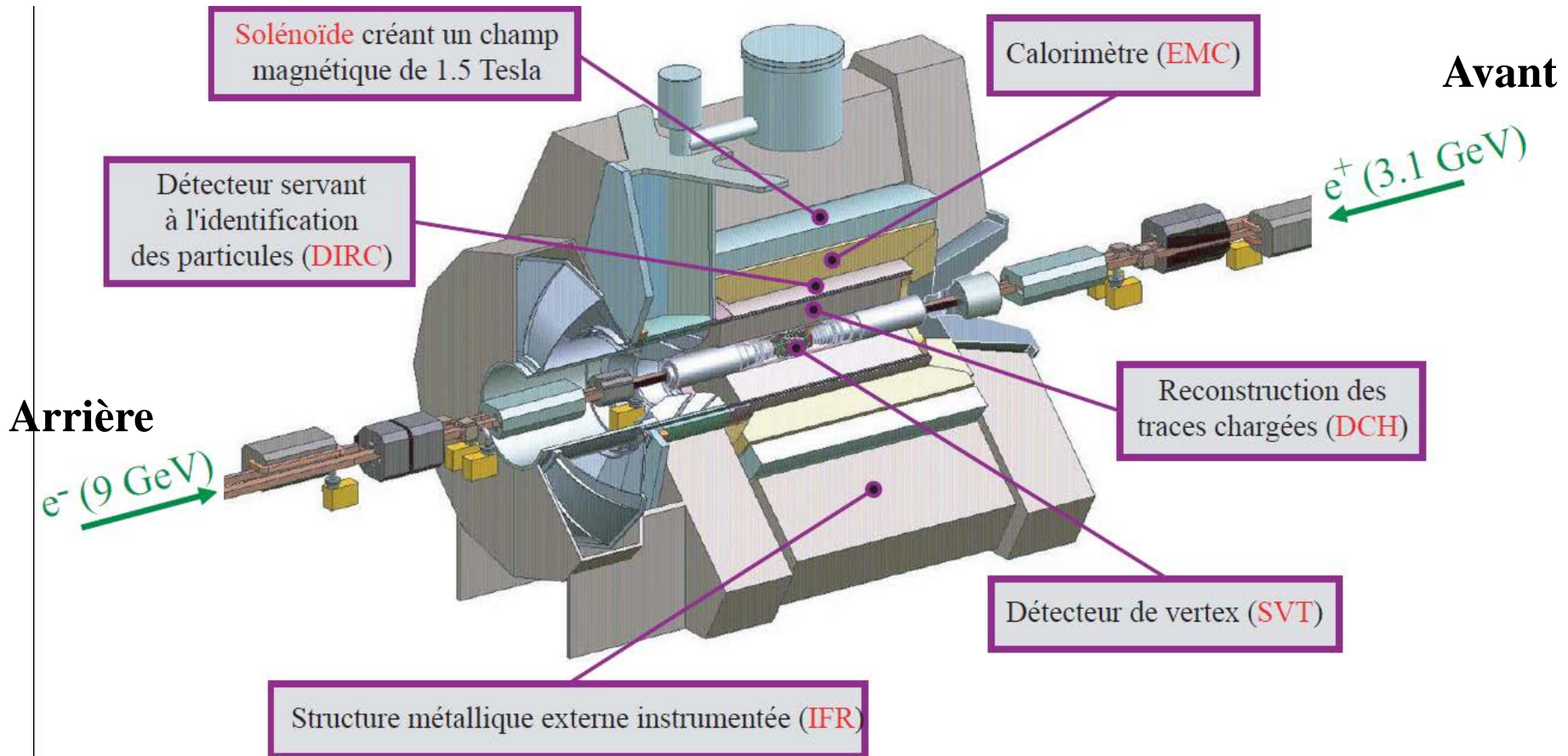
- **Précision** nécessaire pour le trajectographe interne : **quelques dizaines de microns**



- Reconstruction complète de la désintégration d'un B
- Etiquetage de la saveur de l'autre B
- Mesure du temps écoulé (algébrique) entre les deux désintégrations

Le détecteur BaBar – vue 3D

- « Allure » commune à de nombreux détecteurs de physique des particules
 - **Structure en poupée russe**, chaque couche a son utilité propre ; **champ magnétique**
 - « **Tonneau** » + « **bouchon** » (à l'avant)



- Credo : **hermiticité**, **efficacité**, **précision**, **matériel « minimal »**, **robustesse**

Le détecteur BaBar – vue de côté

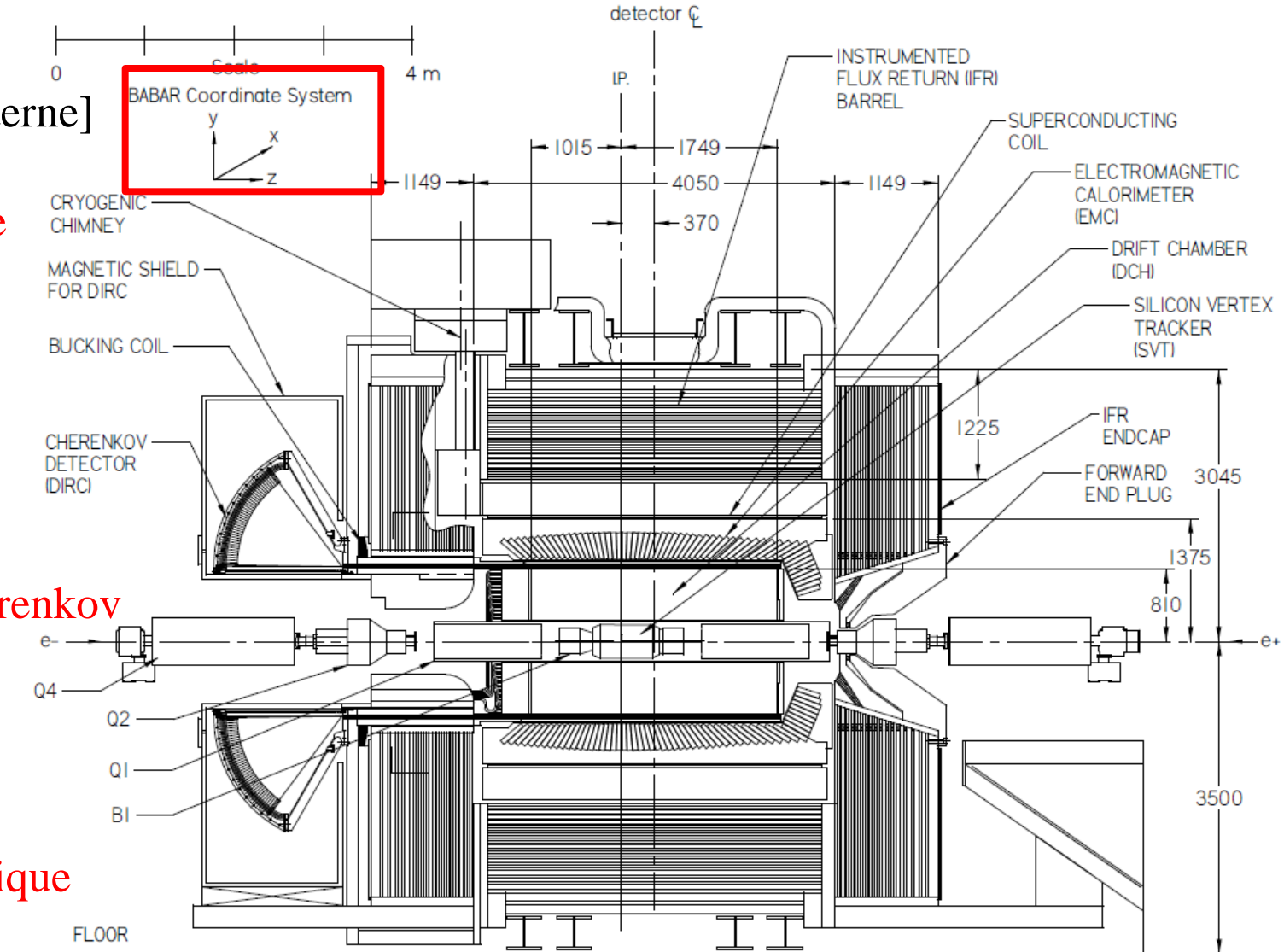
- Couches
[interne → externe]

- Trajectographe
 - Détecteur de vertex en silicium
 - Chambre à dérive

- Détecteur Cherenkov pour séparer pions et kaons

- Calorimètre électromagnétique

- Chambres à muons



Détecteur au silicium

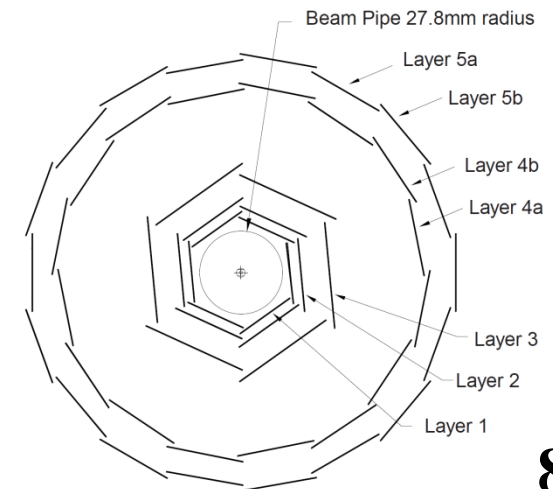
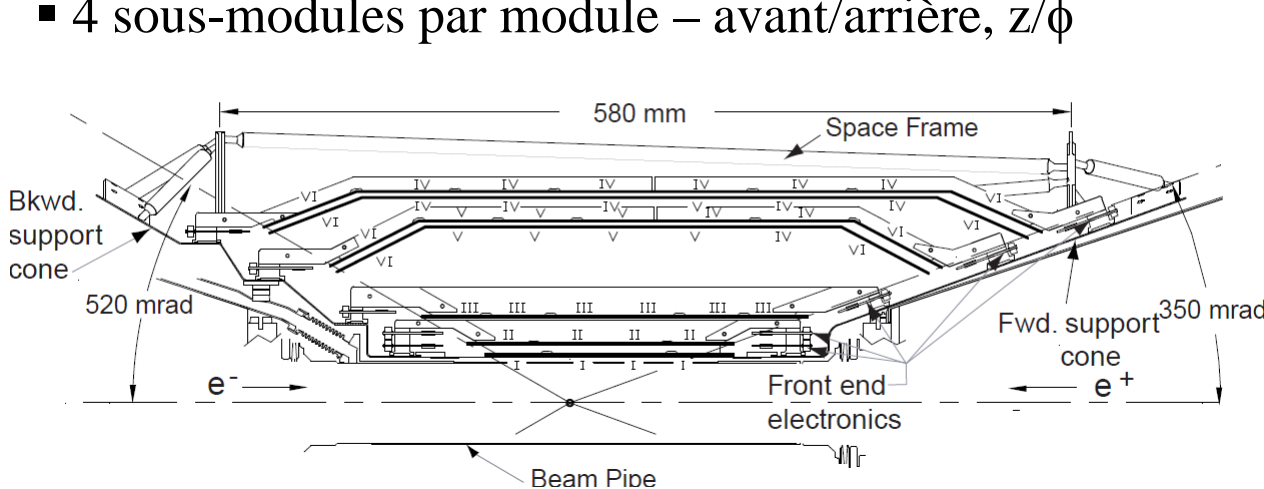
- Le silicium permet une **création de charges libres avec un dépôt d'énergie très faible**
- Principe : **une particule chargée qui traverse le silicium y crée des charges par ionisation**. Celles-ci vont migrer, sous l'effet d'un champ électrique, vers les deux faces, où elles sont collectées. En segmentant ces faces à l'aide de **pistes**, seules celles qui se trouvent au voisinage du passage de la particule fournissent un signal et ceci permet de mesurer la position de cette dernière.
- Réalisation des **plaques de silicium**
 - **Aussi minces que possible**, pour minimiser leur interaction avec les particules
 - Problèmes : **résistance mécanique, force du signal**
- Précision au niveau de quelques (dizaines de) microns
- Aujourd'hui (LHC)
 - Electronique de lecture incorporée au silicium
 - Ensemble du détecteur résistant aux radiations

Principe de fonctionnement

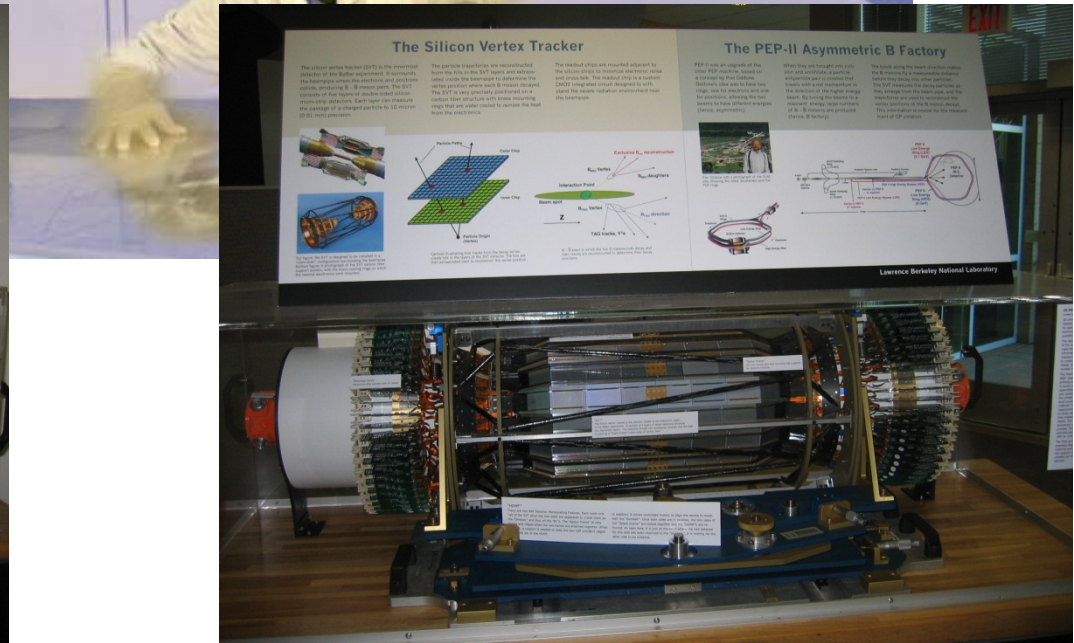
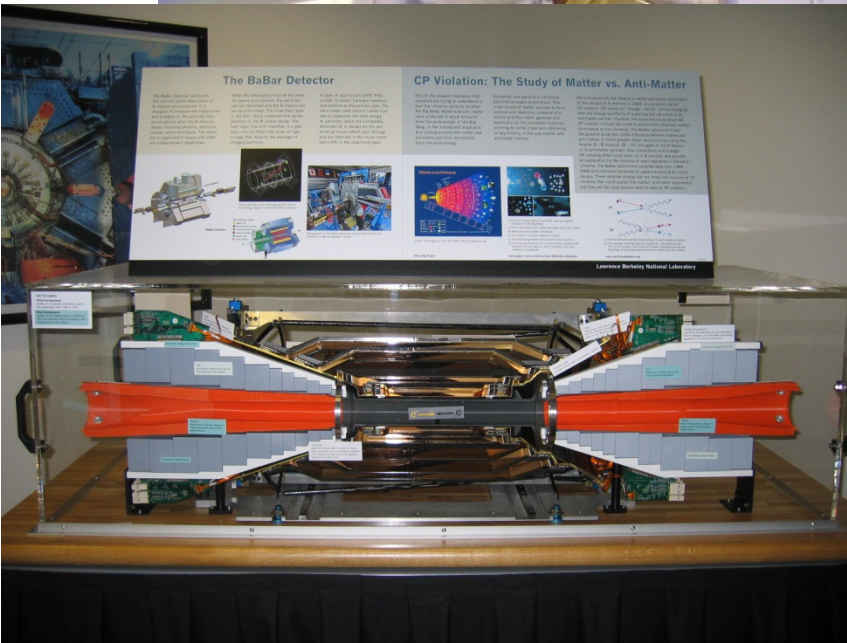
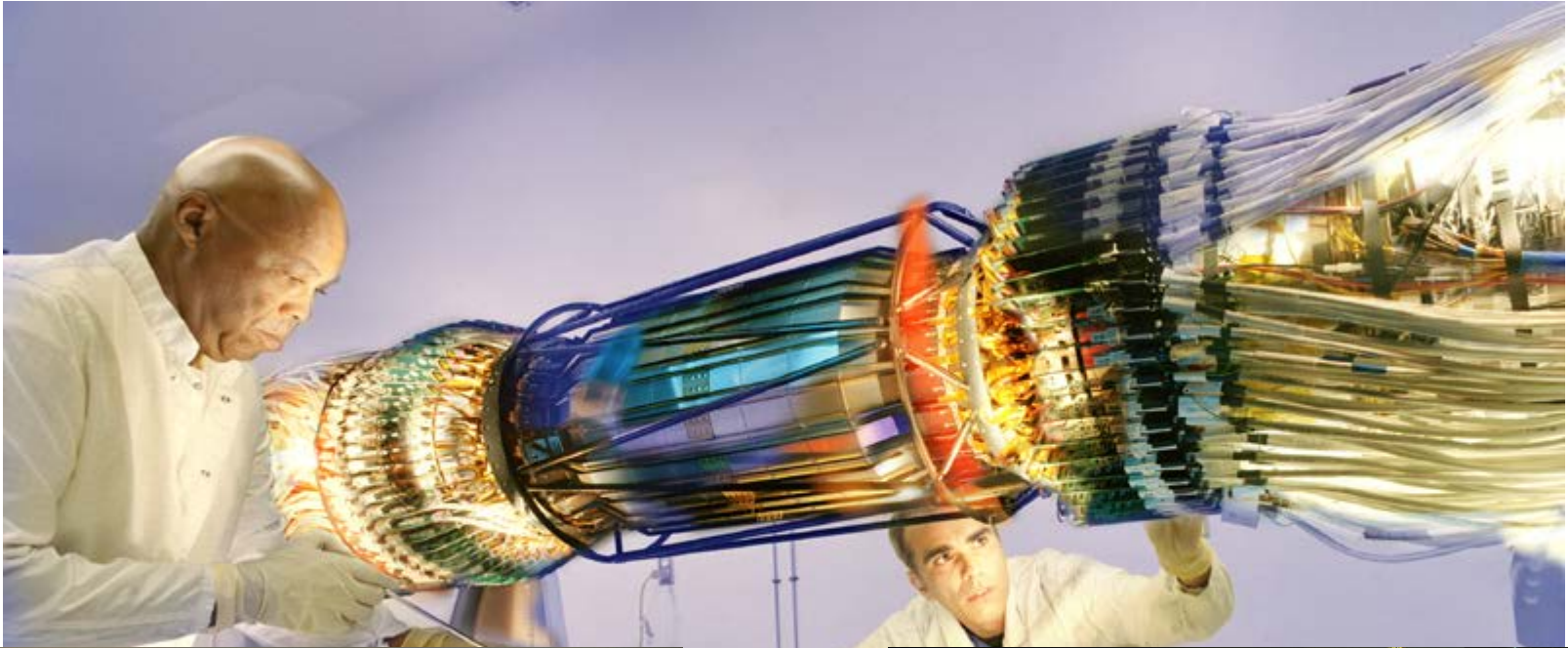
Dans le cristal de silicium, les électrons assurant la liaison entre les différents atomes (4 par atome) peuplent des niveaux d'énergie très voisins formant la bande de valence. Les niveaux d'énergie supérieurs sont également regroupés en une bande dite de conduction située 1,1 eV au dessus de la précédente. Au zéro absolu, la bande de conduction est vide. À température finie des électrons peuvent, par agitation thermique, passer de la bande de valence à celle de conduction. Soumis à un champ électrique ces électrons vont donner un courant électrique. Si l'on plante au sein du silicium des atomes ayant plus d'électrons sur leur couche externe (5 par exemple) les électrons excédentaires vont se placer dans un niveau très proche de la bande de conduction dans laquelle ils peuvent passer aisément. La conduction du cristal est alors définie par la concentration en atomes implantés. On dit que le silicium est dopé n (négativement). On peut de même réaliser un dopage p (positif) par implantation d'atomes ayant 3 électrons sur leur couche externe. Si l'on met en contact, dans un même cristal, deux zones dopées respectivement n et p, les porteurs de charge négative de la première vont migrer du côté p et inversement. Au voisinage du contact entre les deux zones se crée une région dépourvue de porteurs de charge. Par application d'un champ électrique il est possible d'étendre ce phénomène et on peut obtenir des lames qui n'ont pas de charges mobiles, sur toute leur épaisseur. Un tel milieu est sensible à l'apparition de toute nouvelle charge.

Le détecteur de vertex de BaBar

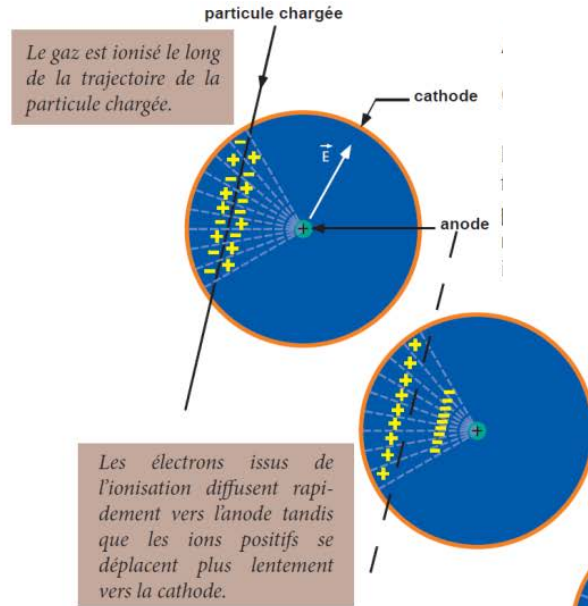
- **Cinq couches double-face à différents rayons**
 - Pistes parallèles à l'axe des faisceaux \Rightarrow Mesure de ϕ
 - Pistes perpendiculaires \Rightarrow Mesure de z [position longitudinale]
- Les **trois couches internes** mesurent les vertex (déplacés)
- Les **deux couches externes** font le lien avec la chambre à dérive
 - Structure en arche : minimise la quantité de silicium pour couvrir l'angle solide croisement à angle plus important aux bords de l'acceptance
- **Segmentation du détecteur**
 - de 6 à 16 modules par couches – chevauchement aux bords pour éviter les « trous »
 - 4 sous-modules par module – avant/arrière, z/ϕ



Le détecteur de vertex de BaBar



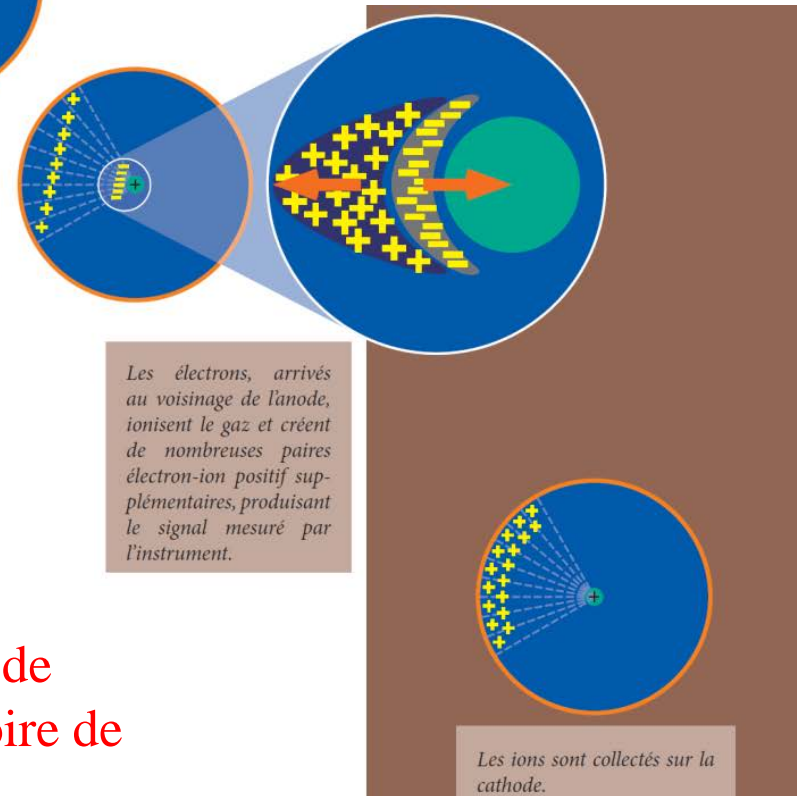
Principe de fonctionnement d'une chambre à fils



- Exemple d'un instrument avec un seul fil

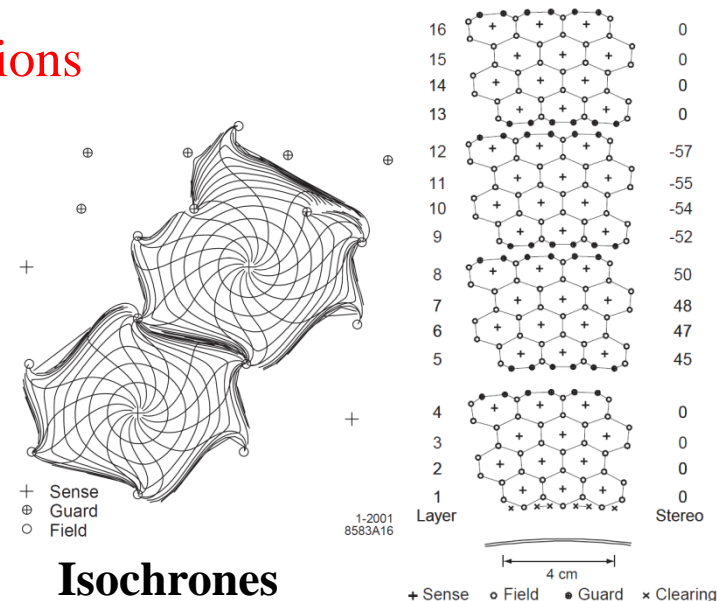
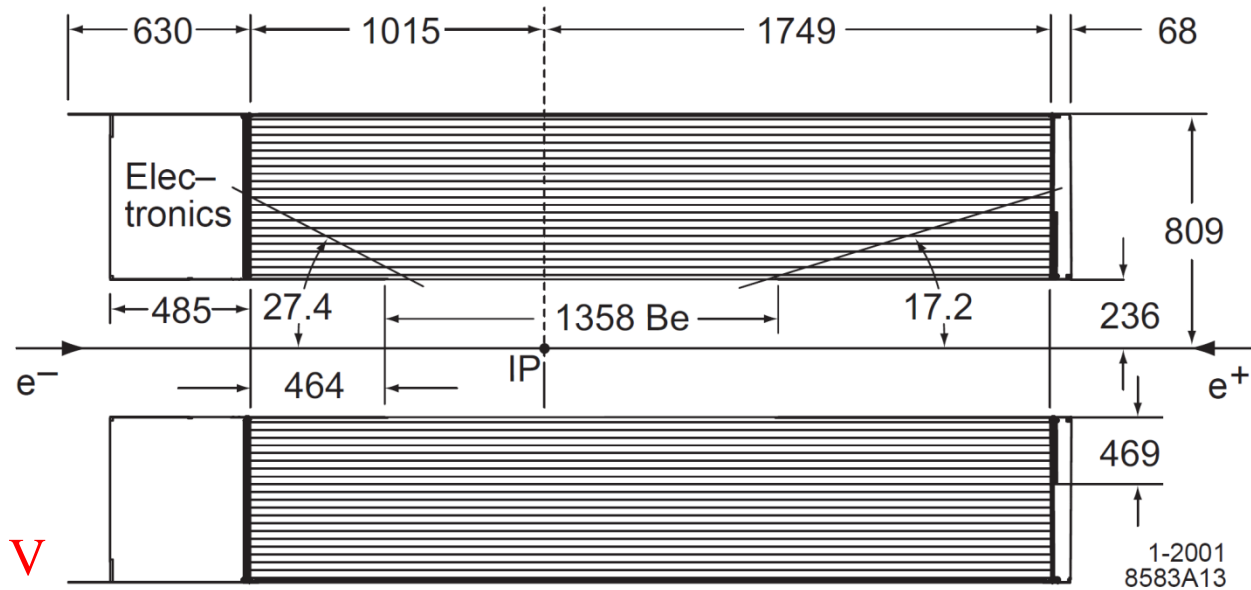
- Une **chambre à dérive** est constituée d'un **volume de gaz soumis à un champ électrique**. Une particule chargée traversant ce volume arrache des électrons aux atomes de gaz : ces électrons libérés **dérivent** ensuite en suivant les lignes de champ électrique vers les fils de détection.

L'emplacement des fils touchés et le temps de dérive permettent de reconstruire la trajectoire de la particule initiale.

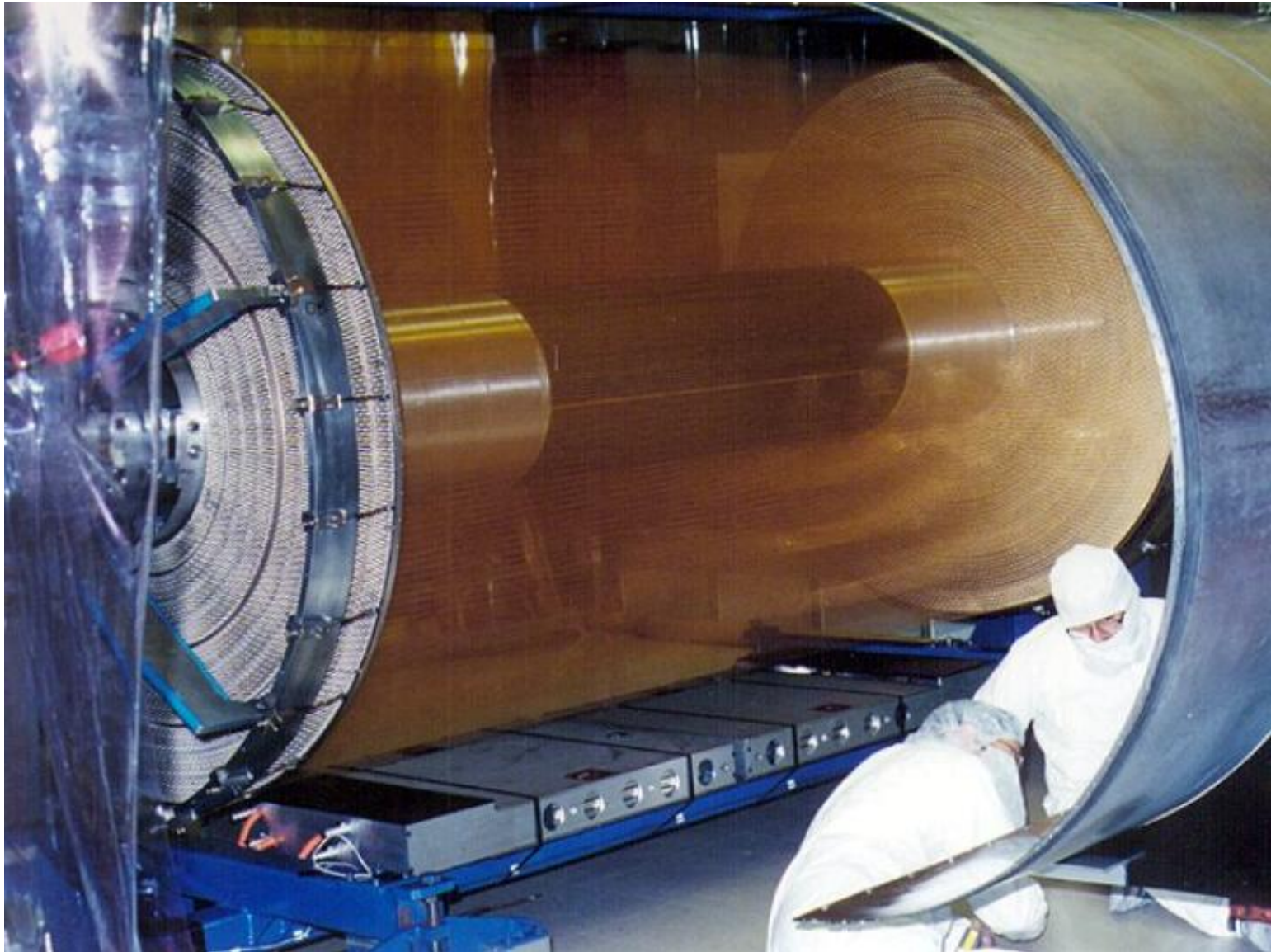


La chambre à dérive de BaBar

- Vue longitudinale
- 40 couches
- 7104 cellules hexagonales
- Gaz : He (80%)
isobutane (20%)
- Haute tension : ~ 1930 V
pour un courant de ~ 10 - 20 μ A
- Mesure des trajectoires (impulsion) en trois dimensions
 - Fil touché
 - Distance par rapport au fil (temps de dérive)
 - Calibration temps distance
 - Certains fils ont un petit angle / axe des faisceaux
 - Information longitudinale
- Mesure de dE/dx
 - Pour l'identification des particules



La chambre à dérive de BaBar



dE/dx

- **Formule de Bethe-Bloch**

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

- **Ne dépend que de β**

- La relation $\beta \leftrightarrow$ impulsion dépend de la masse de la ptc

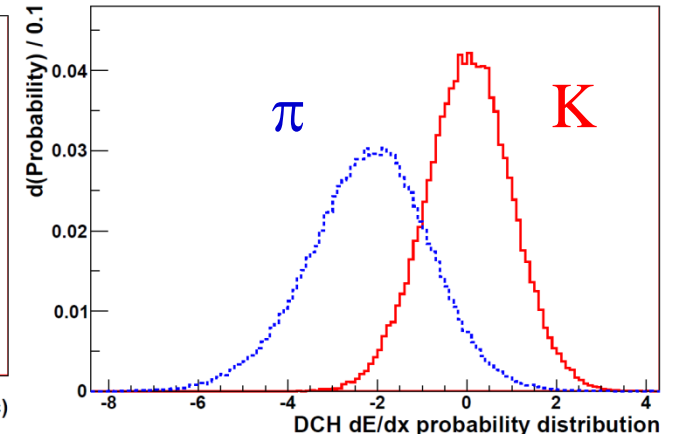
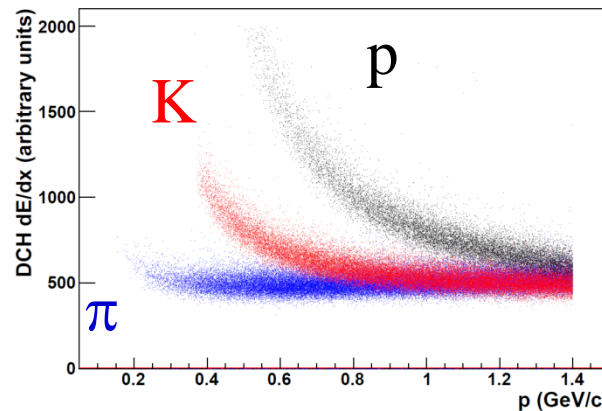
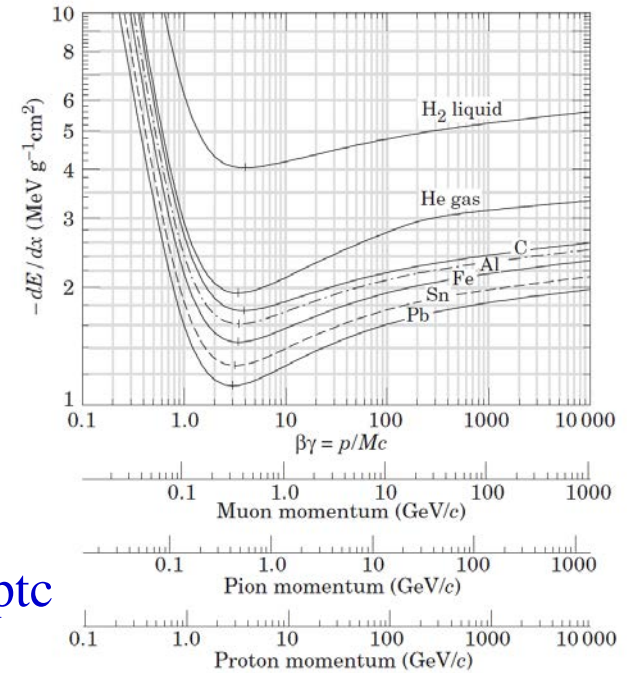
- **Unité : $\text{MeV g}^{-1} \text{cm}^2$**

- Multiplier par la masse volumique du matériau donne un dE/dx en MeV/cm

- Différences observées expérimentalement

- Exemple de BaBar

→ Utiles pour classifier les particules :
« **identification** »



Calorimètres

- **Mesure de l'énergie des particules** – par « destruction »
- Différents types d'interaction \Rightarrow calorimètre **électromagnétique** ou **hadronique**
- Un **photon** ou un **électron** interagit **électromagnétiquement** avec les atomes et leurs noyaux. Le processus d'interaction dépend de l'énergie mise en jeu. On obtient une **cascade de particules secondaires** : **électrons**, **positrons**, **photons**. Les probabilités d'interaction augmentent avec le numéro atomique du matériau – ex du plomb ($Z=82$)
- **Les hadrons développent leurs gerbes selon des processus variés faisant intervenir l'interaction forte**. Suivant l'énergie de la particule primaire, une fraction de 30% à 50% se transformera en particules électromagnétiques (électrons, photons), tandis que le reste de la gerbe sera constitué de fragments de noyaux ou encore de muons et de neutrinos. **Ces gerbes sont longues, larges et irrégulières**, ce qui les différencie des gerbes électromagnétiques. Souvent, elles possèdent des **ramifications multiples** à cause des neutrons qui interagissent seulement après un certain temps de vol. Ainsi, de petits dépôts d'énergie peuvent s'étendre assez loin du cœur de la gerbe ce qui rend souvent la détermination de l'énergie totale de celle-ci assez difficile. Pour absorber efficacement et le plus localement possible les gerbes hadroniques, on utilise des **calorimètres très denses** – fer, uranium tungstène.

Calorimètres

- Calorimètre **homogène** ou à **échantillonnage**



Schéma de **calorimètre homogène** : le même milieu permet le développement de la gerbe ainsi que la mesure de son énergie. À l'arrière du détecteur, des photomultiplicateurs (PMT) collectent le signal.

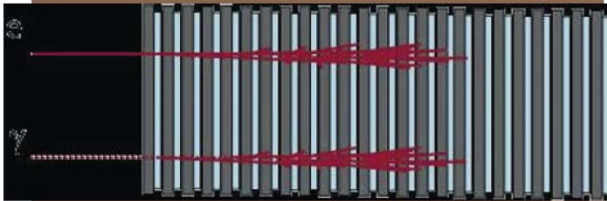
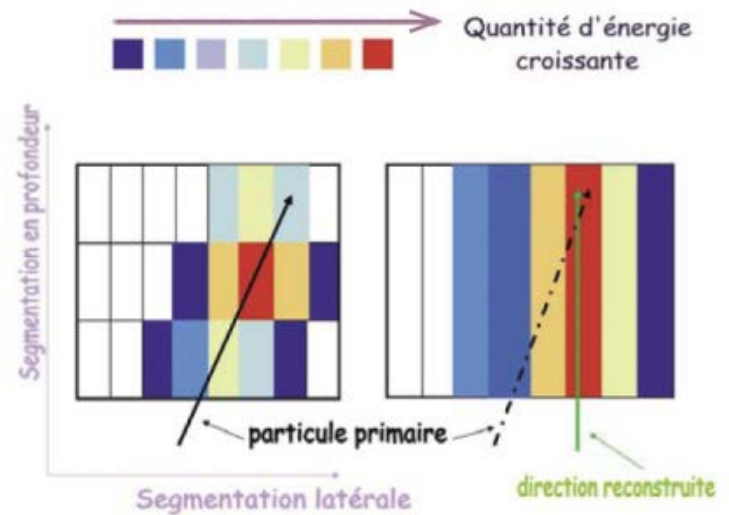


Schéma de **calorimètre à échantillonnage** qui alterne modules détecteurs et modules absorbeurs.

- Segmentations **latérale** et **longitudinale**



- Importance de **l'étalonnage du calorimètre**
 - Correspondance signal mesuré \leftrightarrow énergie ptc
 - Inclut les effets du détecteur, de l'électronique et les performances du traitement des données
 - Simulation, faisceaux tests
 - Interactions du détecteur avec des particules
→ Suivi périodique

- Paramètre clef : la **résolution en énergie** du calorimètre

Le calorimètre électromagnétique de BaBar

- Cristaux d'iodure de Sodium, dopés au Thalium – CsI(Tl)
 - 6580 au total, répartis en 56 anneaux
- Deux zones
 - Tonneau
 - Bouchon avant
- Géométrie quasi-projective
- Longueur des cristaux : de 16 à 17.5 fois leur longueur de radiation
- Mesure précise de l'énergie des particules entre quelques MeV et la dizaine de GeV

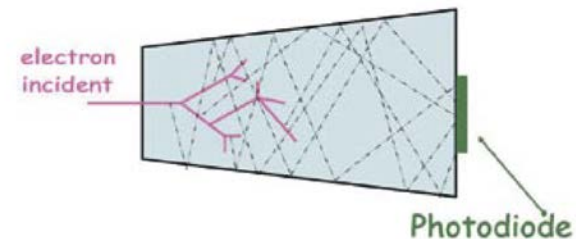
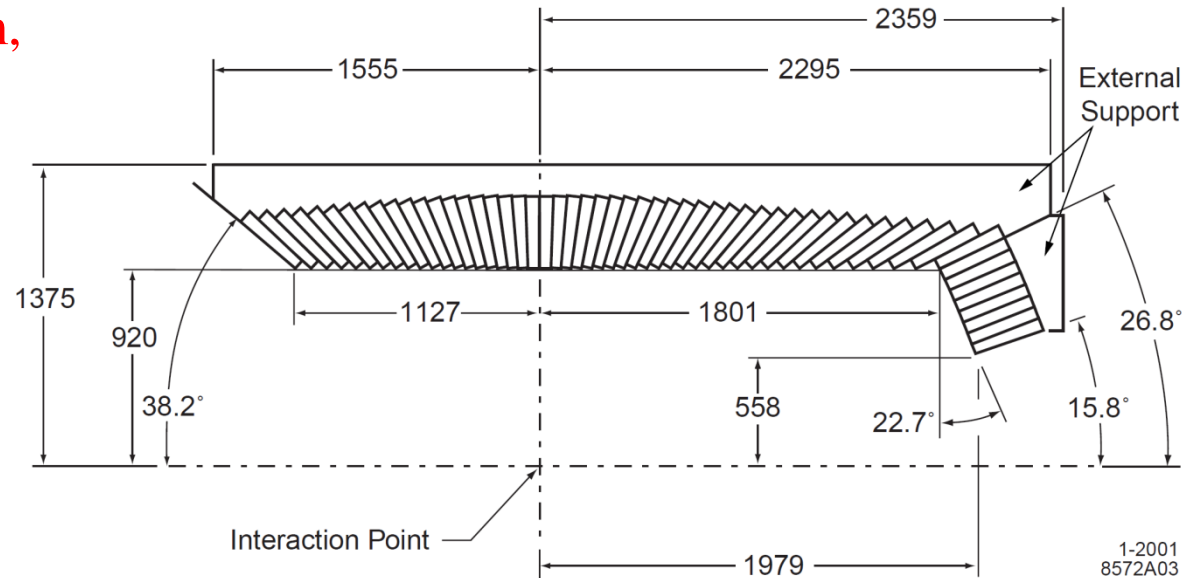


Schéma de la gerbe développée par un électron pénétrant dans le cristal, La lumière émise par le milieu est guidée par les réflexions successives vers la photodiode placée à l'arrière du cristal.

- Résolution :
$$\frac{\sigma(E_\gamma)}{E_\gamma} = \frac{0.027}{\sqrt[4]{E_\gamma(\text{GeV})}} \oplus 0.010.$$

Détecter les muons

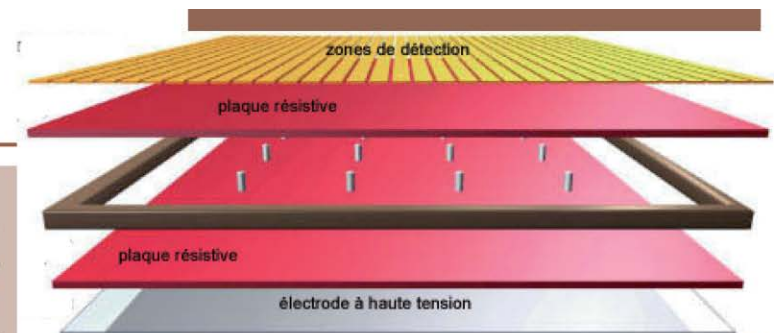
- **Muons de haute énergie** \leftrightarrow événement potentiellement intéressant
 - **Isolés** – les désintégrations des pions et des kaons produisent également des muons
- **Signature particulière**
 - **Ionisation du milieu** – électrons arrachés aux atomes
 - **Pas de gerbe électromagnétique** comme les électrons et les photons
 - **Pas d'interaction forte** comme les hadrons
- **Exemple d'une plaque épaisse de fer** (matériau de la culasse des aimants)
 - Electrons et photons interagissent en quelques centimètres
Développement de la gerbe sur quelques dizaines de centimètres
 - Comportement similaire pour les hadrons – épaisseurs de matière 10× plus grandes
 - Les muons perdent seulement ~ 1.6 GeV/m traversé

Détecter les muons

- **Passage au travers d'une grande quantité de matière**
 - **Géométrie** des détecteurs
- **Grande énergie**
 - **Sélection** des événements intéressants par le trigger
- **Isolation des muons**
 - **Critères de choix** sur les candidats muons utilisés dans les analyses
- **Un exemple de détecteur de muons : les RPCs**
 - Utilisés dans BaBar ...

Resistive Plate Chambers (RPC)

Lorsqu'une particule ionisante traverse la chambre, elle crée une avalanche d'électrons dans le gaz situé entre les deux plaques de bakélite qui sont portées à une différence de potentiel voisine de 10 kV. Comme ces plaques sont isolantes (ou résistives), le champ électrique est perturbé uniquement au voisinage de la trace et, ailleurs, le détecteur reste sensible pour détecter d'autres particules éventuelles. L'épaisseur des plaques ainsi que de la couche de gaz sont de 2 mm. L'avalanche induit un signal électrique sur une électrode qui est divisée en zones de manière à repérer la position du passage de la particule, dans la direction perpendiculaire à celle des zones.



Le détecteur de muons de BaBar

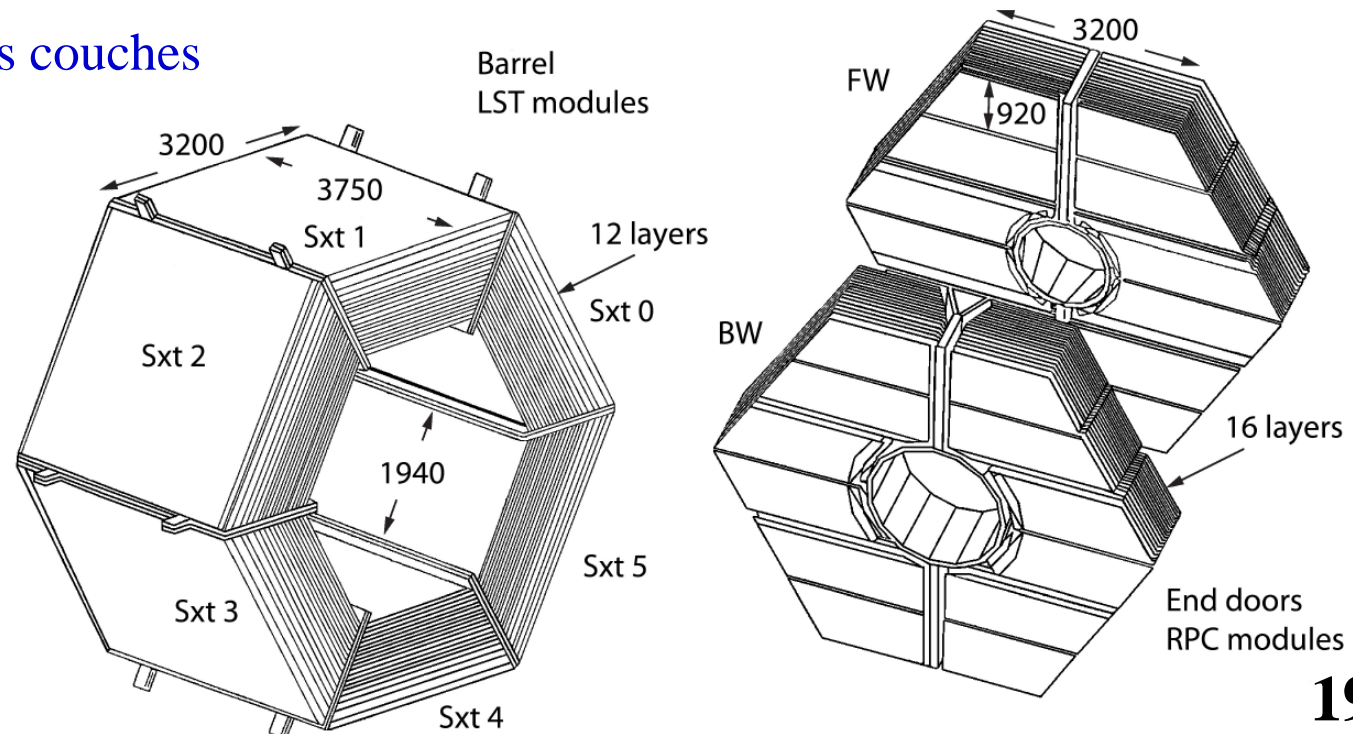
- **Trois zones**

- Un tonneau divisé en six sextants
- Deux bouchons, un à l'avant, l'autre à l'arrière

- **Instrumentation du retour de fer de l'aimant de 1.5 Tesla**

- Absorbe les hadrons, filtre les muons
- Epaisseur des couches de fer : 2 cm (internes) → 10 cm (externes)

- **Coïncidences entre les couches**



Le trigger

- **Deux niveaux successifs**
 - **L1** : **hardware**, basé sur une partie des informations de l'événement (traces, dépôts d'énergie), accepte des événements à **2-3 kHz**
 - **L3** : **software**, basé sur la totalité de l'événement ; taux : **qqs centaines de Hz**
→ Les événements sélectionnés sont stockés sur disque
- **Efficacité (quasi-)optimale sur (presque) tous les canaux de type « signal »**

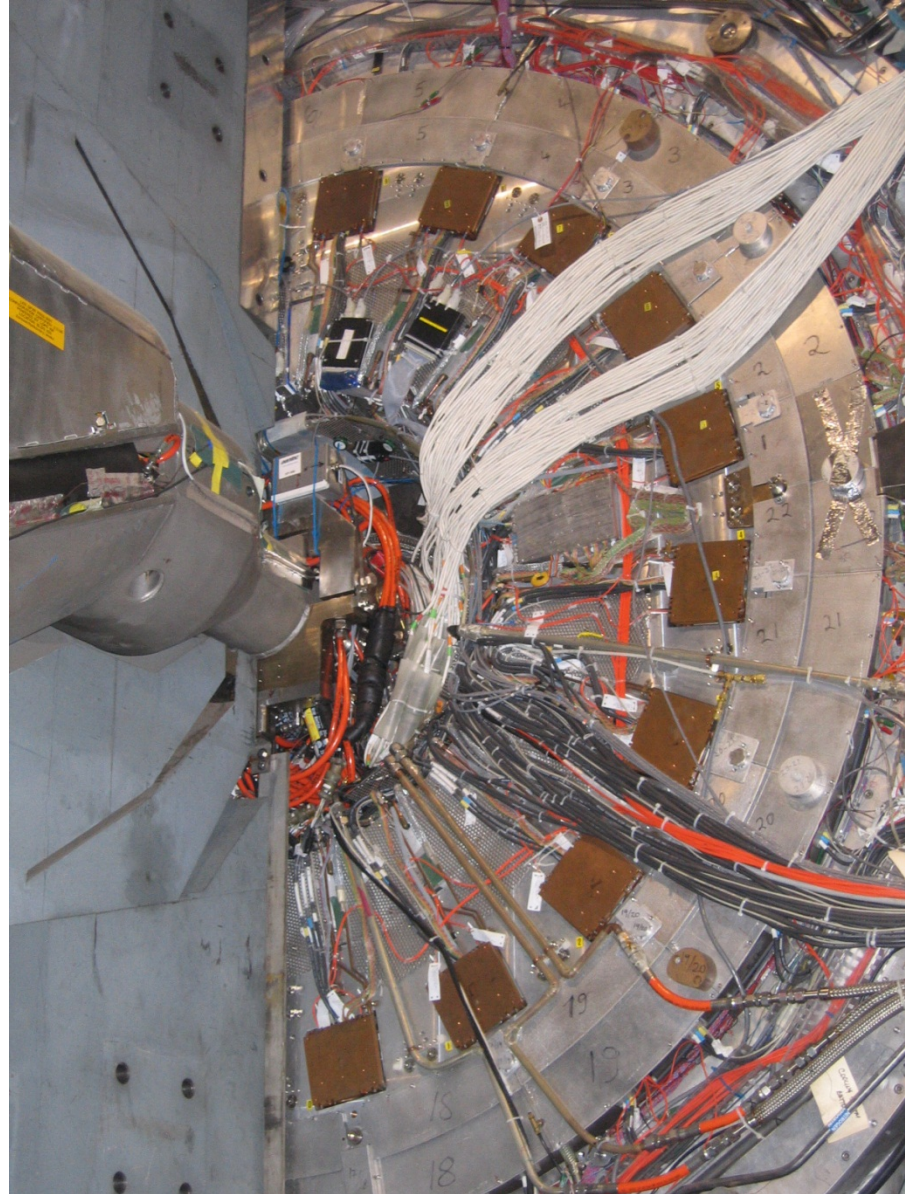
Table 11: Summary of L1 trigger efficiencies (%) based on MC simulations of various production and decay processes at the $\Upsilon(4S)$ for actual trigger configurations at a luminosity of $11.8 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ and a 2.7 kHz L1 rate.

L1 trigger line	B^+ $\rightarrow D^0 K^+$	B^0 $\rightarrow K_s^0 K_s^0$	B $\rightarrow \mu\nu$	B^0 $\rightarrow \nu\bar{\nu}$	e^+e^- $\rightarrow \tau^+\tau^-$	e^+e^- $\rightarrow \Upsilon(4S)\gamma$	τ $\rightarrow e\gamma$	τ $\rightarrow \mu\gamma$
DCT only	> 99.9	98.4	93.4	43.6	70.2	93.1	68.0	69.9
EMT only	> 99.9	99.8	98.4	45.9	76.1	75.0	91.0	85.8
Mixed lines	> 99.9	99.8	99.2	62.2	88.7	93.7	91.6	91.8
Total	> 99.9	> 99.9	99.8	99.3	91.4	95.2	95.5	94.8

- **Réjection importante des événements de bruit de fond**
- **Enregistrement à taux constants** (quelques Hz au plus) d'événements de types donnés ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, cosmiques) pour des calibrations

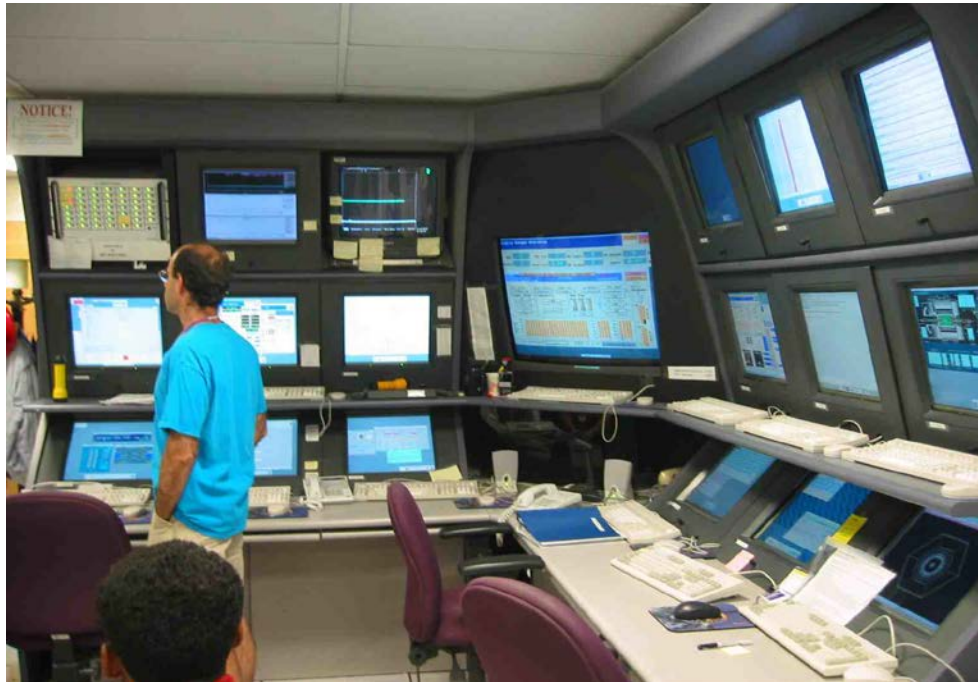
Beaucoup de cables ...

- Vue d'une moitié de la face avant du détecteur BaBar



En salle de contrôle

- « 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 – monitoring 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
- **Entraînement** 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 MCC**
 - 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



Rythme de la prise de données

- Alternance de **périodes de**
 - **Prises de données d'au-moins six mois** (les « Runs », 7 dans BaBar)
 - **Arrêts planifiés à l'avance** – durée : de quelques semaine à quelques mois

- Longues périodes d'arrêt utilisées par l'accélérateur et le détecteur

- **Maintenance** routinière
- **Remplacement** d'éléments
- **Améliorations, mises à jour**

- **Arrêts intempestifs** les plus courts/rares possibles

- Quand une intervention est vraiment devenue nécessaire

- **Arrêts planifiés** de quelques heures pour des « développements machine »

- **Prises de données à différentes énergies**

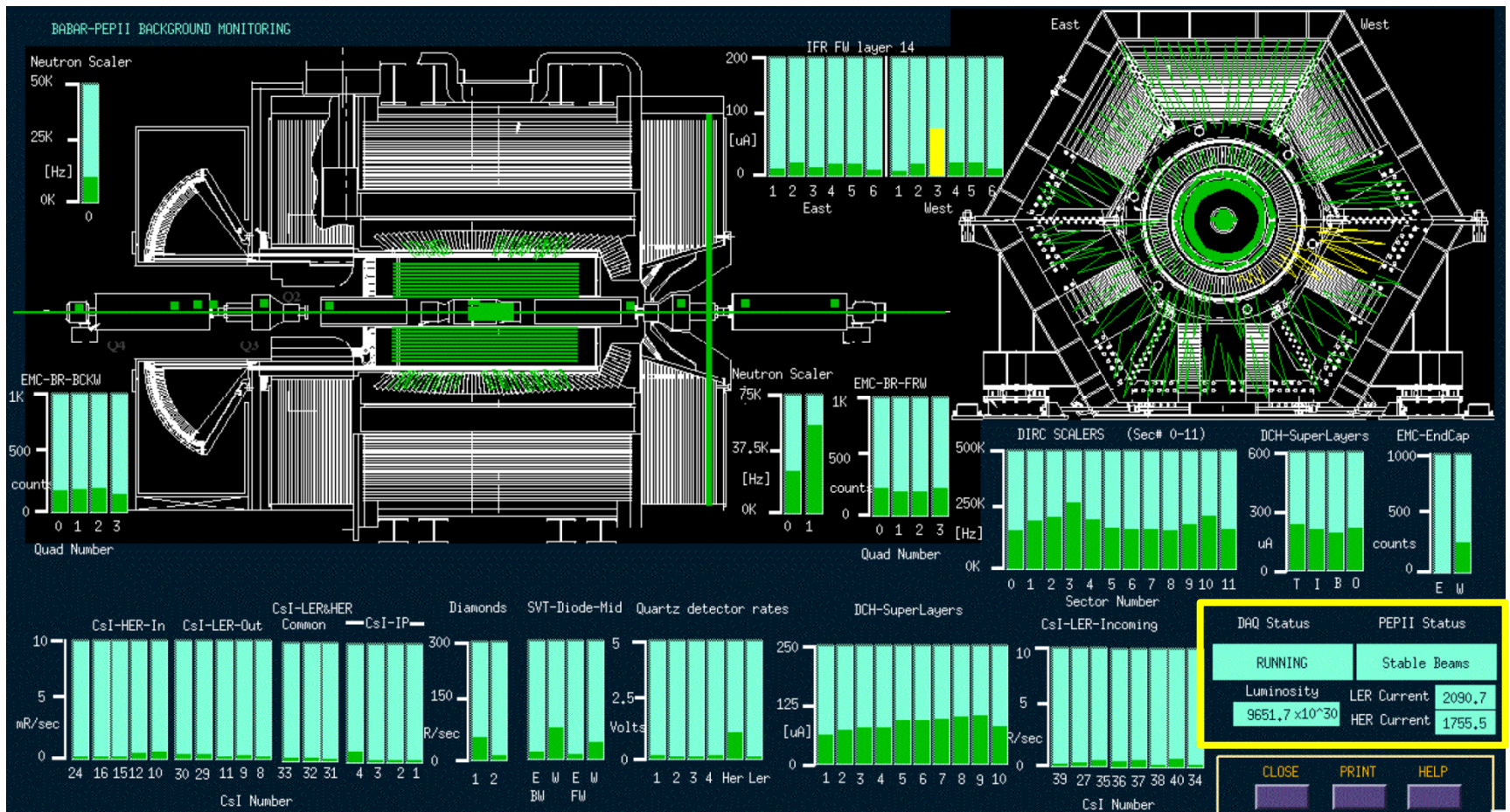
Res.	Run	Mon./Year
$\Upsilon(4S)$	1	10/99 - 10/00
	2	02/01 - 06/02
	3	12/02 - 06/03
	4	09/03 - 07/04
	5	04/05 - 08/06
	6	01/07 - 09/07
	Total	
$\Upsilon(3S)$	7	12/07 - 02/08
$\Upsilon(2S)$	7	02/08 - 03/08
$> \Upsilon(4S)$	Scan	02/08 - 03/08

Bruit de fond

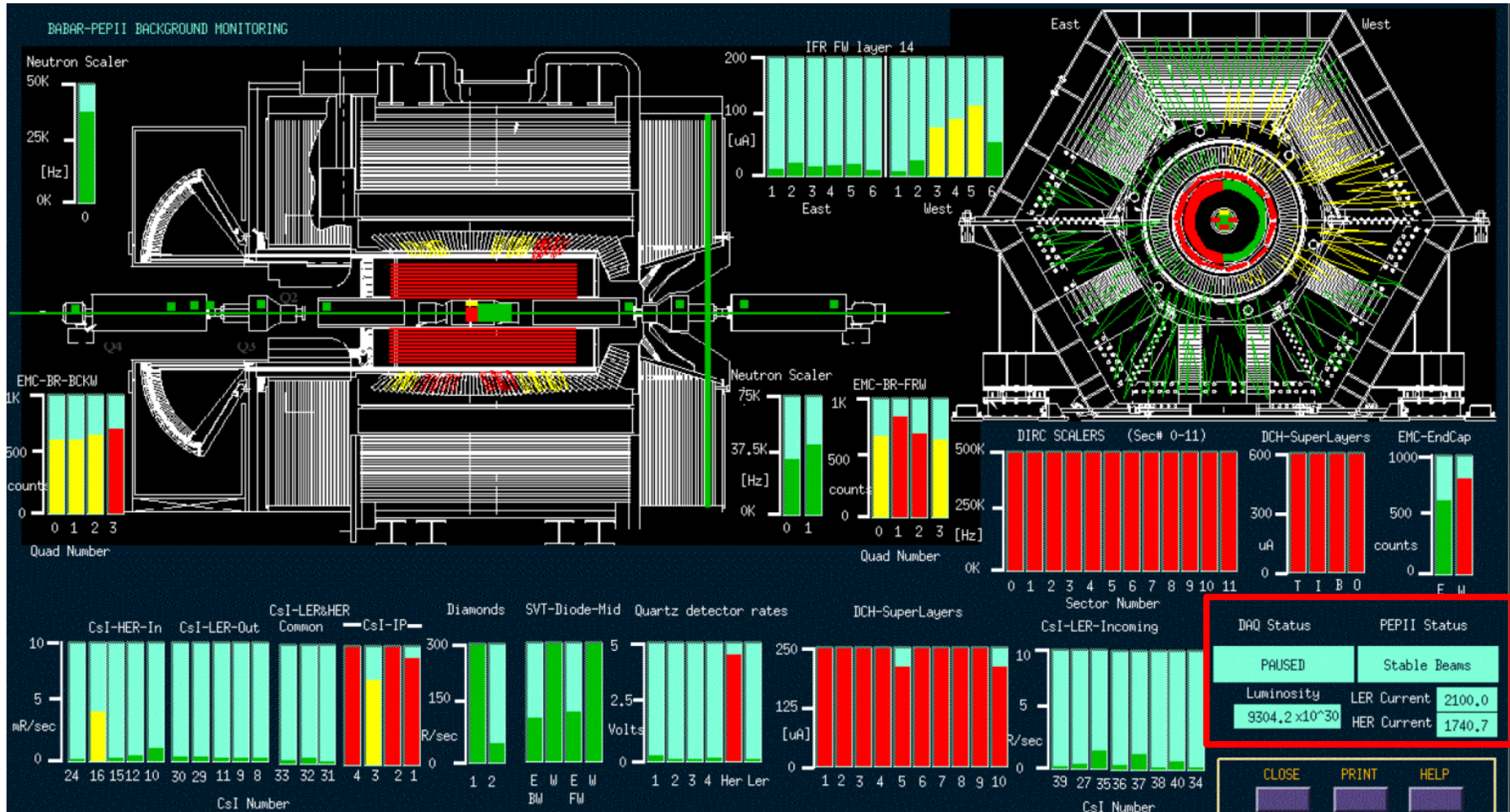
- Une **nuisance**, **augmente** (linéairement ... ou pas !) **avec la luminosité**
 - Dépend également beaucoup des conditions de fonctionnement de l'accélérateur
- **Vieillessement** des composants du détecteur
 - Diminution des performances
 - « Casse » d'éléments (accessibles et/ou remplaçables ... ou pas !)
- **Confusion** : les coups dans les détecteurs dus au bruit de fond **s'ajoutent** (voire **remplacent**) ceux associés aux particules de type « signal »
 - **Reconstruction plus complexe** (temps de calcul plus élevé) et moins efficace
- **Augmentation des taux de déclenchement des triggers**
 - **Temps mort**
- De nombreuses méthodes pour tenir compte des bruits de fond
 - Trouver l'origine et s'en affranchir
 - Ajouter une série de **blindage** de protection
 - **Arrêter l'acquisition des données**, voire **mettre le détecteur dans un état « sécurisé »** quand le bruit de fond est trop fort – automatiquement ou manuellement
 - **Provoquer la perte (contrôlée) des faisceaux** – solution radicale !

Le calme ...

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



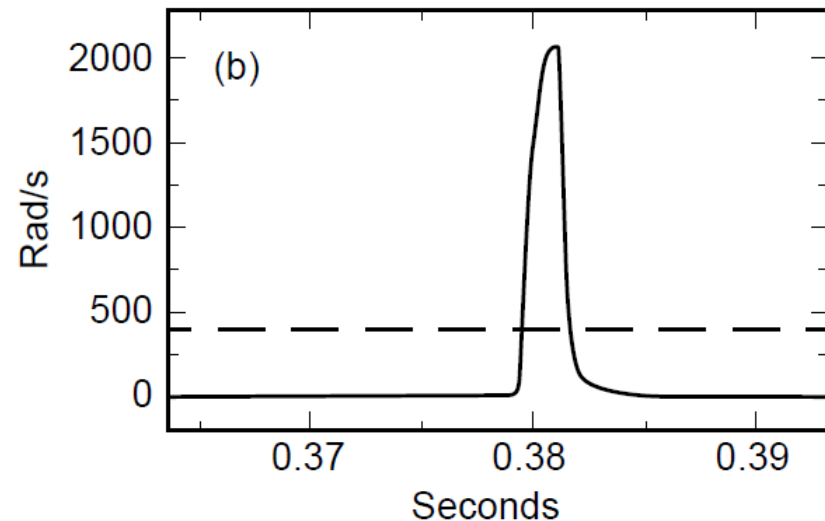
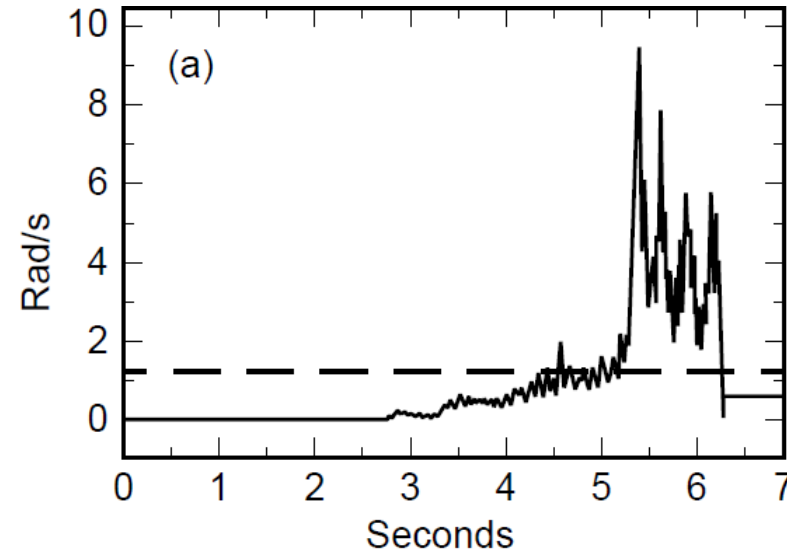
Une tempête ...



Protection du détecteur

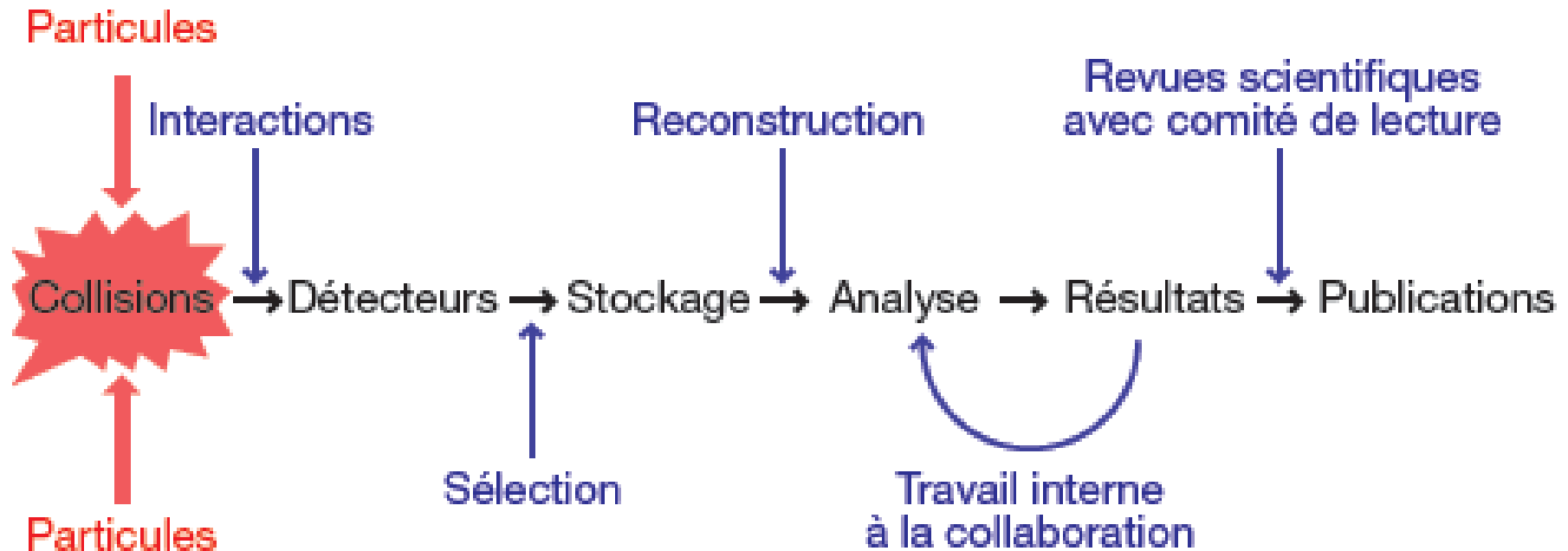
- **Détecteur au silicium critique** pour la physique
 - Sensible aux radiations
 - Presque irremplaçable
- **Mesure de dose instantanée** (capteurs diamant)
 - Peut forcer la perte des faisceaux
- Dose intégrée « budgétée » pour BaBar
- **Autre danger : courants trop importants** dans des canaux soumis à une haute tension
 - **Baisse de tension automatique, maintenue jusqu'à ce que le courant soit redescendu**
 - Exemple : chambre à dérive
 - **Prix à payer : baisse temporaire d'efficacité dans une zone bien définie du détecteur**
- **8 pertes de faisceaux par jour en moyenne**
 - 3 → problèmes techniques de l'accélérateur
 - 3 → instabilité des faisceaux
 - 2 → bruit de fond trop élevé pour BaBar

Exemples de perte de faisceaux « commandée »

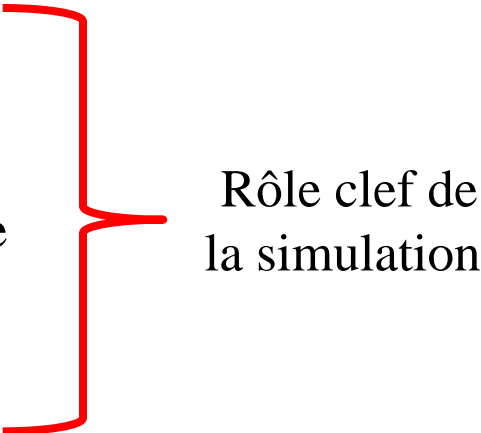


Du détecteur aux résultats de physique

- Un **long parcours** en **plusieurs étapes**, répétées si besoin
 - Tous les résultats sont validés par « la collaboration » avant présentation publique

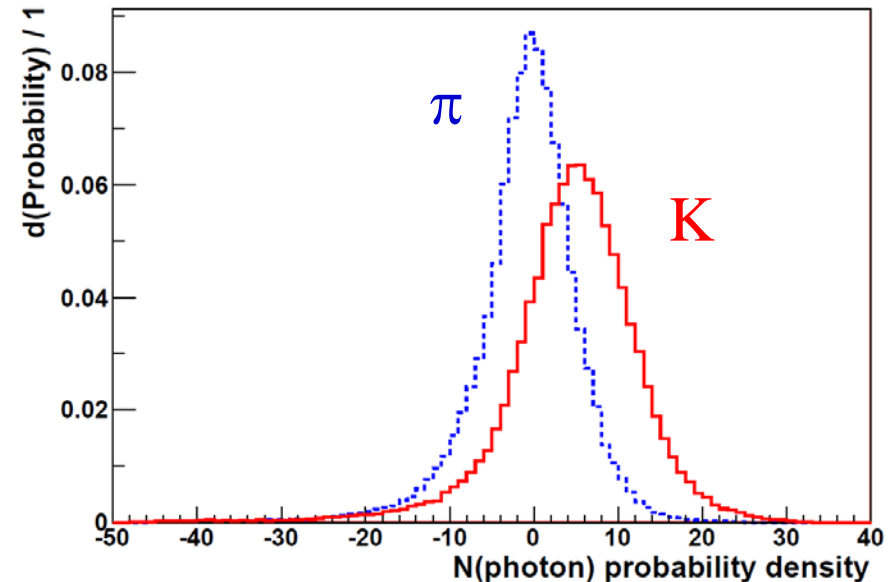
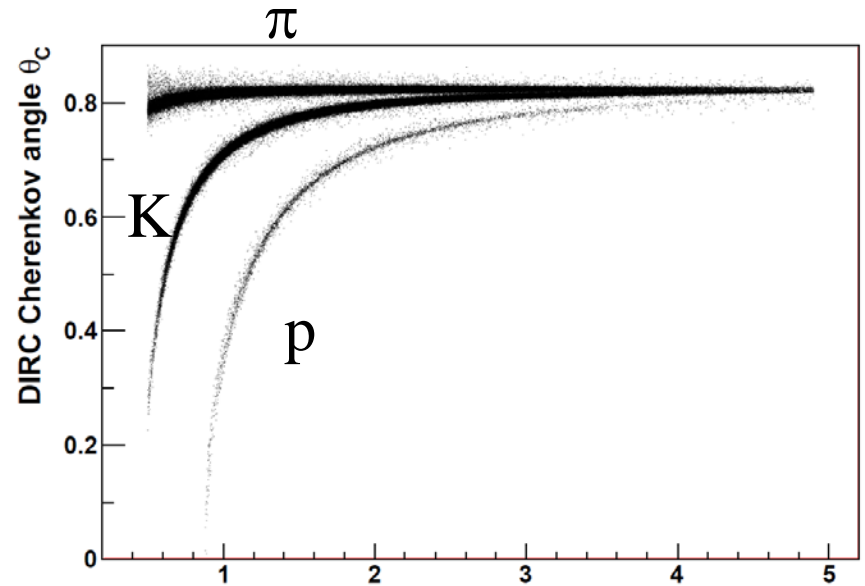
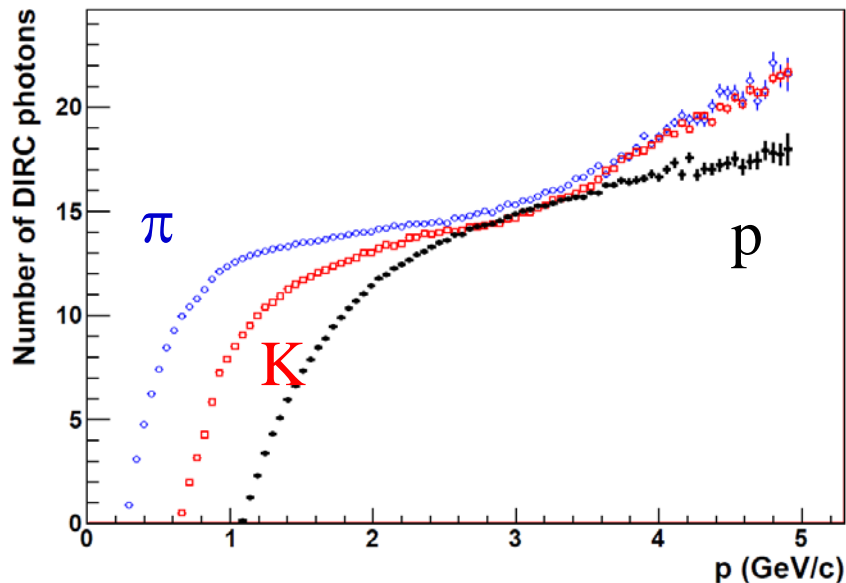


Techniques d'analyse

- **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 le DIRC



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

