

# Utilité des accélérateurs, types de machines, physique nucléaire et de particules associées

# Plan

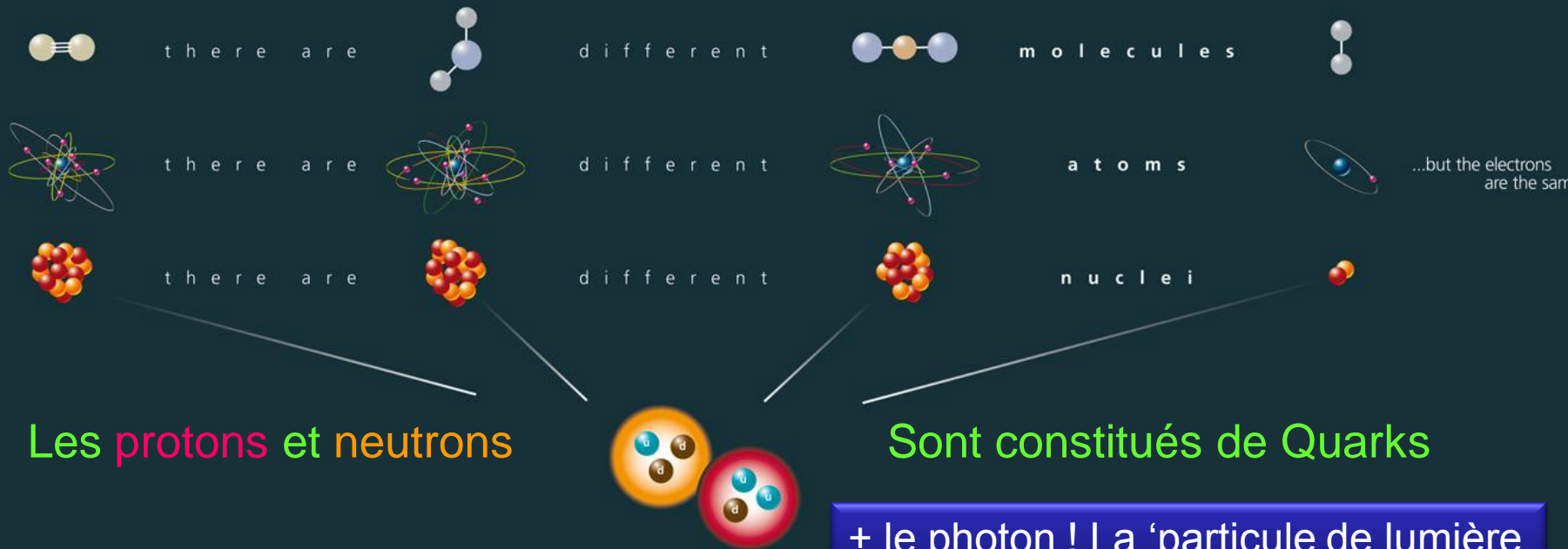
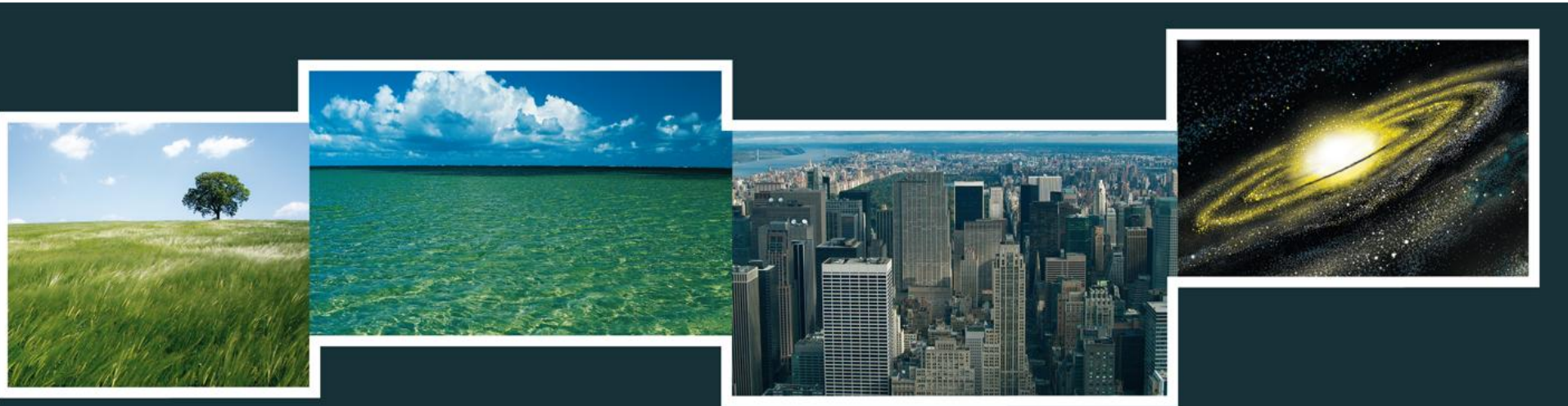
- 1) Introduction à la physique des particules  
Les particules élémentaires et leurs interactions  
Les détecteurs de physique des particules
- 2) Les accélérateurs pour la physique des particules
- 3) Collisionneurs ppbar versus collisionneurs e+e- : SPS versus LEP
- 4) 'Overview' de deux installations/projets majeurs  
Le LHC  
Un grand projet aujourd'hui : ILC (SuperB)
- 5) Applications de l'interaction laser-electron

- Sources

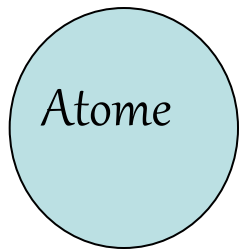
- E. Baron (GANIL)
- M. Costa (CMS/Turin)
- A. Mueller (DA IN2P3/IPN)
- R. Poeschel (ILC/LAL)
- F. Richard (ILC/LAL)
- MH Schune (LHCB/LAL)
- L. Serin (ATLAS/LAL)
- A. Stocchi (BaBar/SuperB/LAL)
- A. Variola (SERA/LAL)
- I. Wingerter (ATLAS/LAPP)
- Collègues du KEK : T. Omori, H. Shimizu, J. Urakawa
- <http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-09/SupportDetAMes09.htm>
- <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>
- Site www du CERN, FERMILAB, ...

**Introduction :**  
**Les particules élémentaires**  
**et**  
**leurs interactions**

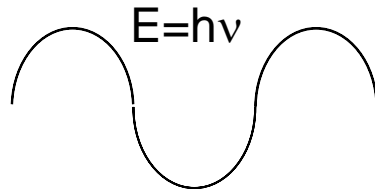
# La complexité est reductible



# Les particules : les constituants élémentaires de la matière

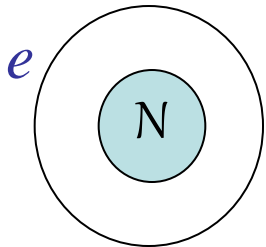


Atome



$$E=h\nu$$

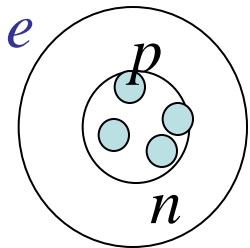
Taille  $\sim 10^{-10}m$



N



Taille  $\sim 1fm=10^{-15}m$



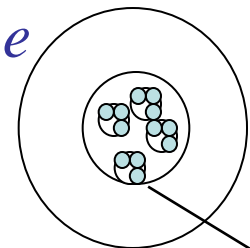
p

n

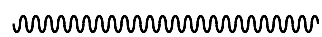
nucléons



Taille  $\sim 1fm=10^{-15}m$



e



Taille  $\sim 10^{-19}m$

quarks *up* et *down*

**La matière ordinaire**

1	IA	1	H	IIA	2	He																														
2	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
3	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	107	108	109	110	111	112	Naming conventions of new elements																		

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No

est composée par trois particules :

Quark up *u*  
 Quark down *d*  
 Lepton electron *e*

....d'interactions..et de vide !

*Si les protons et les neutrons avaient un diamètre de 10 cm, les quarks et les électrons mesureraient moins de 0,1 mm et un atome entier ferait environ 10 km de diamètre.*  
*Un atome est constitué à plus de 99,99 % de vide.*

# Les particules aujourd'hui: la matière extra..ordinaire

Dans la vie de tous les jours nous expérimentons les particules de la première famille....

Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
	I	II	III
	The Generations of Matter		

+ les antiparticules

**Les quarks n'existent à l'état libre !**

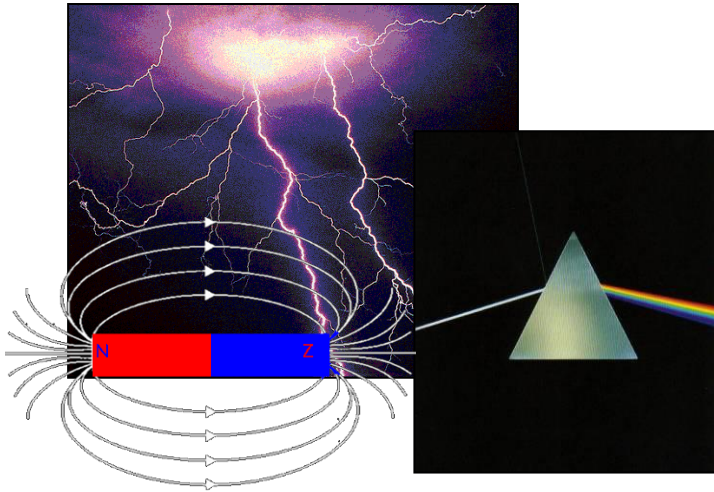
- **Hadrons** : particules constituées de quarks
- **Baryons** : 3 quarks (ex: neutron, proton)
- **Mésons** : 2 quarks (ex. les pions, mésons B)

Petite histoire: lorsque la découverte du muon fût annoncée, le physicien I. Rabi dit :

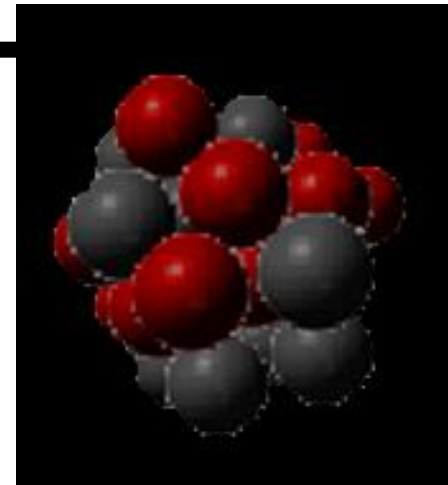


Ça reste une très bonne question.....

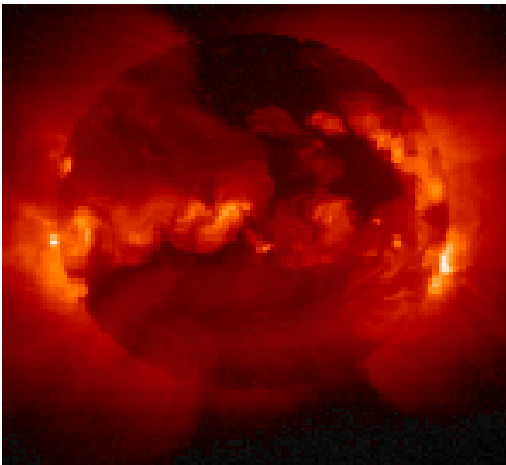
# Les quatre forces fondamentales



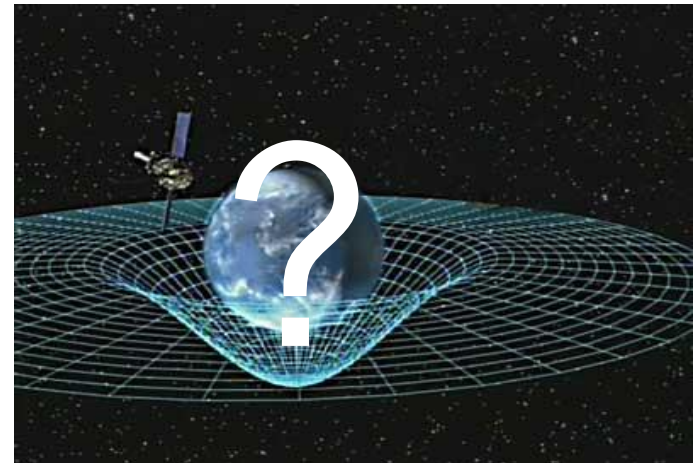
electromagnetique



Force forte



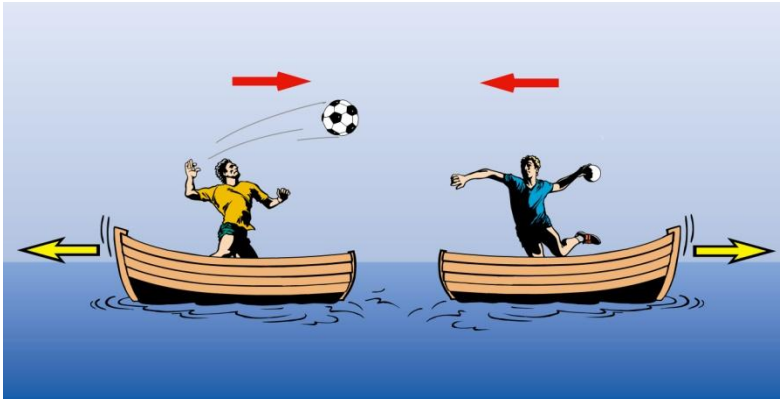
Force faible



Gravite



# Les forces vues par les physiciens des particules..



Particule A

Messenger de l'interaction

Particule B

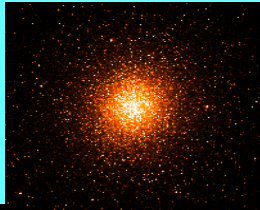
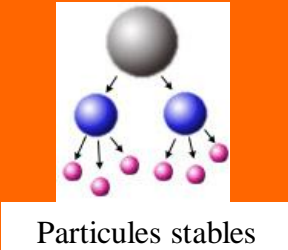
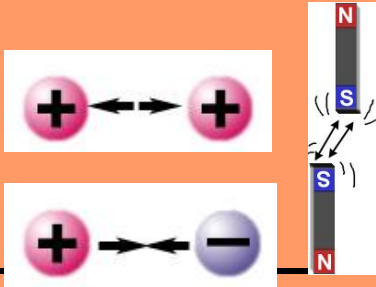

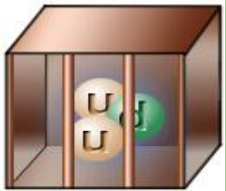
Le messenger de l'interaction est une particule.

Il y a **4 interactions** : elles se différencient par :

- type de messenger (c'est à dire de la particule)

- portée de l'interaction (qui dépend de la masse du messenger)\*

\* Plus le ballon est lourd, plus les joueurs doivent être proches

FORCE	Gravité	Faible	Electromagnétique	Forte
Portée par	Graviton (non observé)	$W^+W^-Z^0$	Photon ( $\gamma$ )	Gluons (g)
Agit sur	Toutes les particules	Quarks et leptons	Quarks et leptons chargés et $W^+W^-$	Quarks et gluons
Responsable de	Attraction des objets massifs 	Désintégrations des particules 	Attraction entre particules chargées 	Liasions nucléaires 
Agit à	Distance infinie	Courte distance Masses $W^+W^-Z^0$ 'très très' lourdes	Distance infinie Masse photon=0	Faible à grande distance Forte à courte distance 

# Le Modèle Standard:

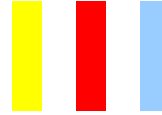
## Les particules élémentaires+leurs interactions

Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ μ- Neutrino	$\nu_\tau$ τ- Neutrino	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	
	I II III			
	The Generations of Matter			
	Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
		$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom

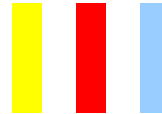
Charge élect.

Int

+2/3



-1/3



0



-1



électromagnétique  $\gamma$

faible  $W^\pm, Z^0$

forte

gluons

Particules de matière

Particules d'interaction

théorie:

Mécanique quantique + relativité → théorie quantique des champs

Le Modèle Standard codifie tout ce que l'on observe :  
Matière, Interaction, Unification

Mais le Modèle Standard ne peut pas expliquer pourquoi  
les particules ont une masse

On postule donc un nouveau mécanisme ...et  
une nouvelle particule !



La particule de Higgs



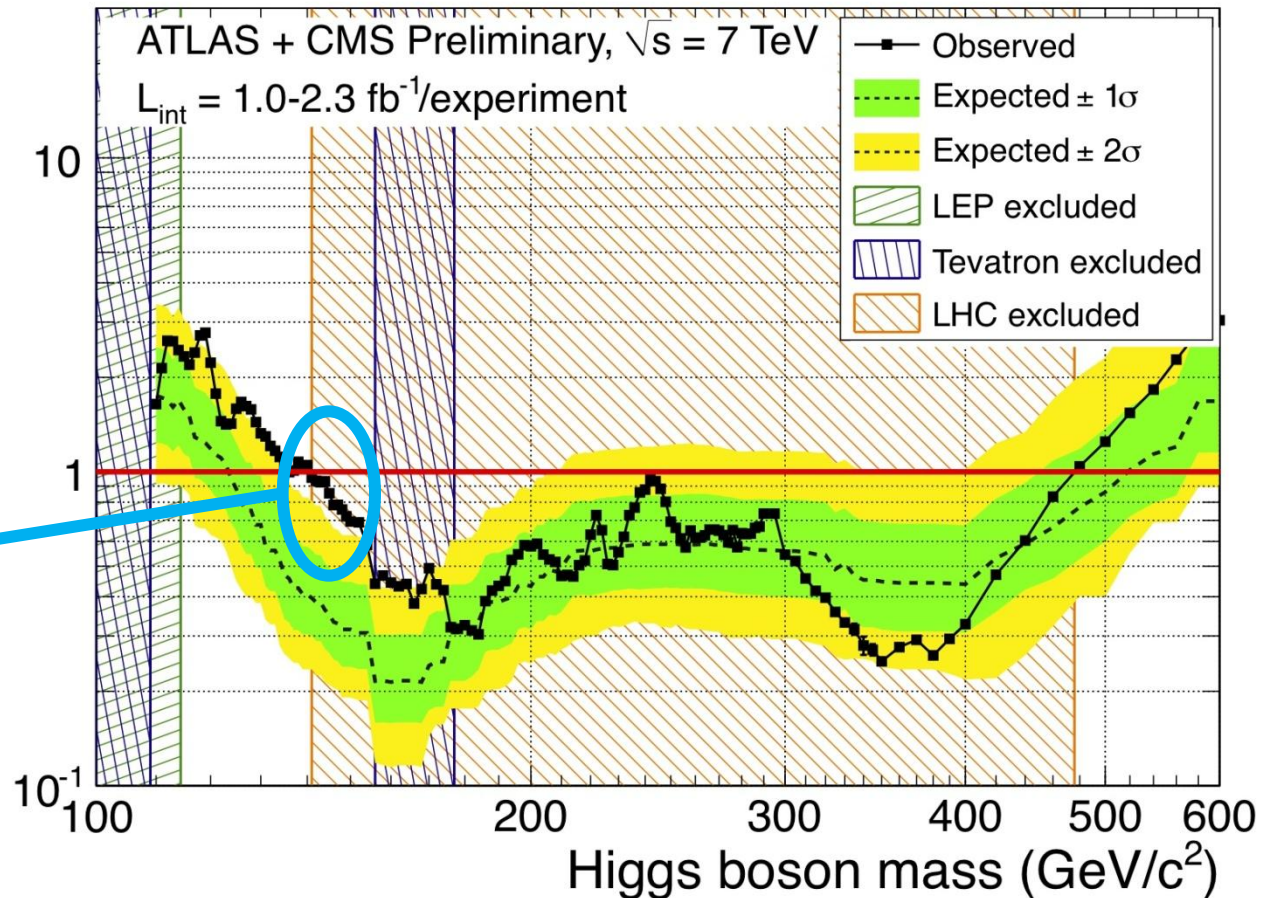
Détermine les masses des particules de  
matière et des particules d'interaction

# Le Boson de Higgs : où en est-on

Analyses de données très complexes

Zone où 'on l'attend'

95% CL limit on  $\sigma/\sigma_{SM}$



Le 13 décembre au CERN, mise à jour des résultats

# Quelques grandes questions 1/4 ...

Pourquoi les constituants de la matière ainsi que les particules qui véhiculent les interactions ont-elles des masses si disparates ?

Leptons chargés

$m_\nu = ?$

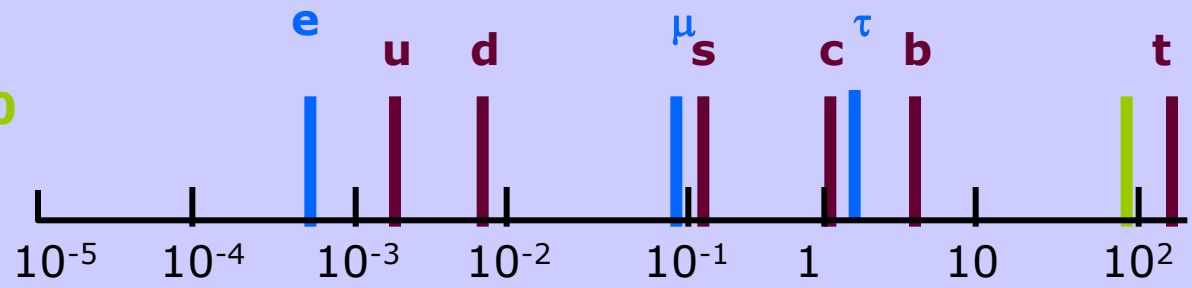
Bosons vecteurs des interactions

$m_\gamma = 0$

$m_{\text{gluon}} = 0$

W,Z

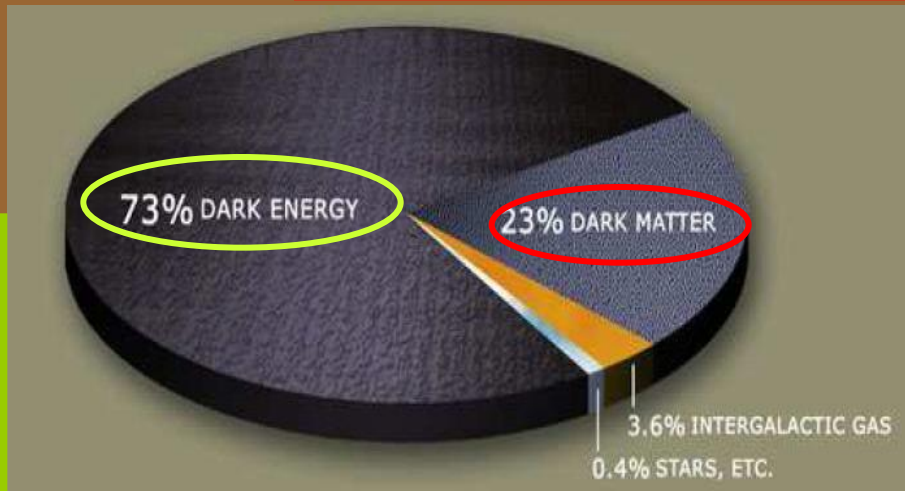
quarks



## Composition de notre univers ?

Matière autre que celle du Modèle Standard

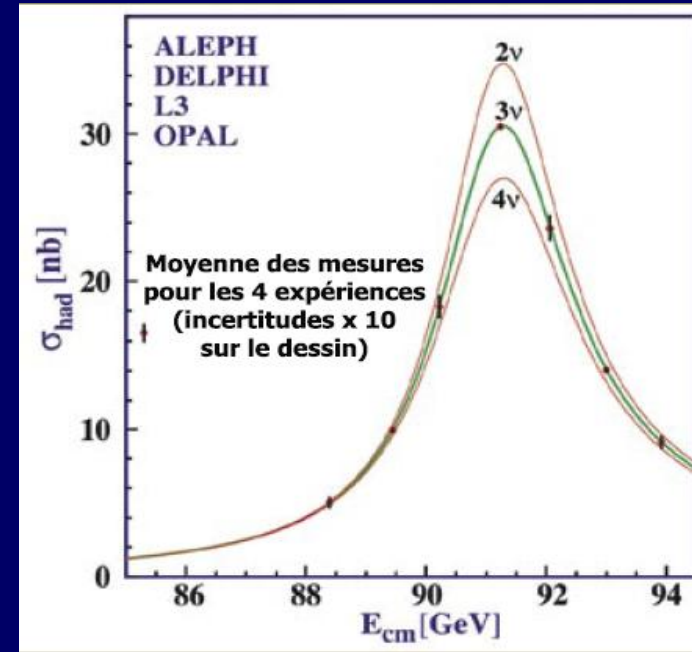
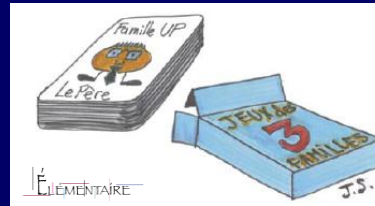
L'expansion de l'univers est plus rapide qu'attendu (Big Bang + relativité générale)  $\Rightarrow$  quelque chose d'autre doit entrer en jeu : "énergie noire"



# Quelques grandes questions 2/4 ...

## Pourquoi trois familles ?

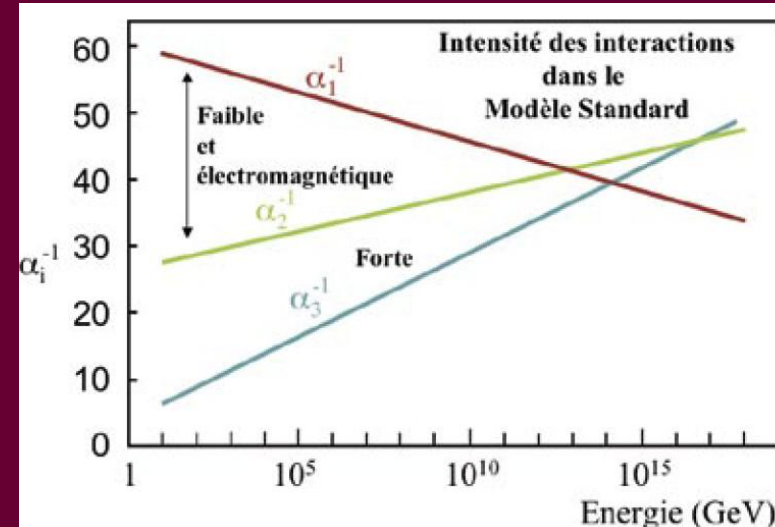
A présent on n'a observé que trois familles...



## Pourquoi quatre interactions ?

## Unification ?

(cf Maxwell pour l'électricité et le magnétisme)



# Quelques grandes questions 3/4 ...

Juste

matière

antimatière

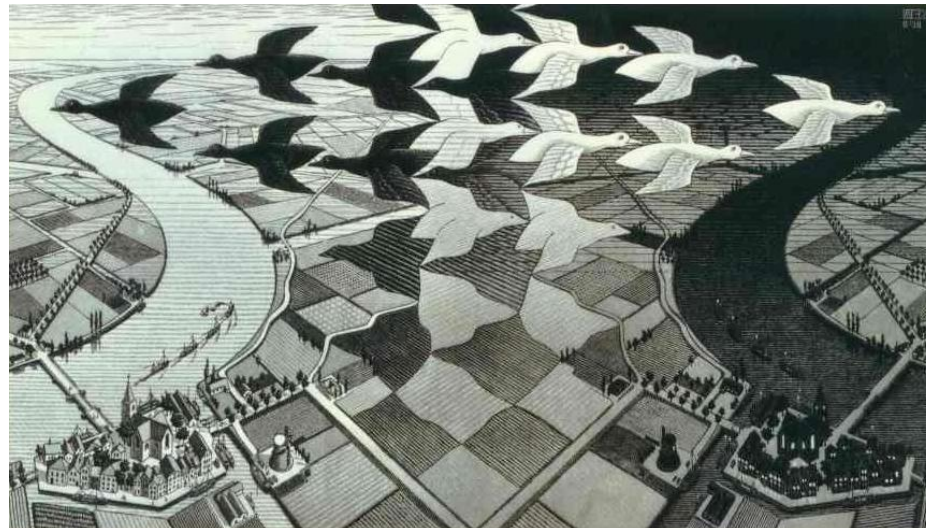
Univers actuel :

matière

~~antimatière~~

Univers actuel : le fruit d'un petit déséquilibre qui a mené à une très légère surabondance de matière

**Quelle est la source du déséquilibre entre matière et anti-matière ?**





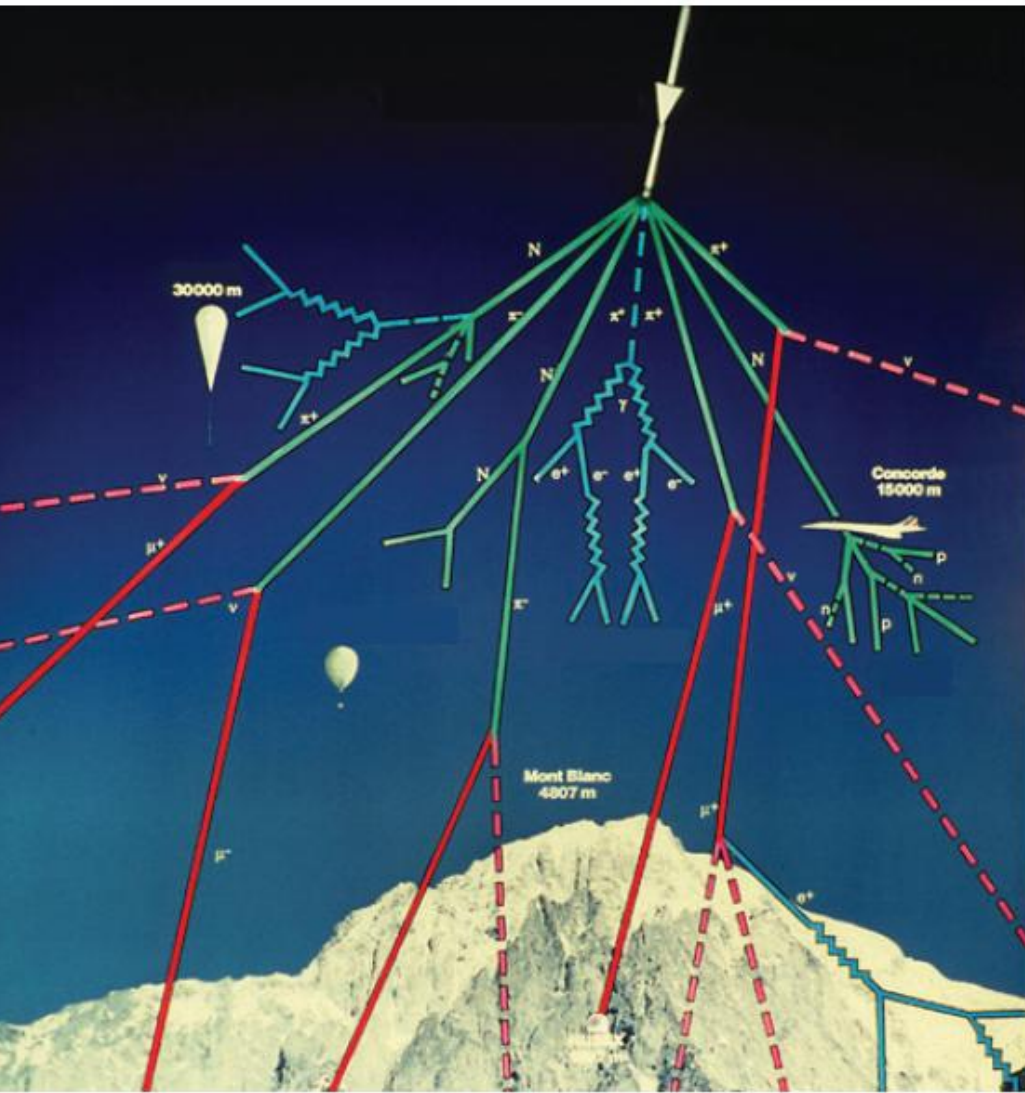
# Quelques grandes questions **4/4** ...

Compréhension de l'interaction forte :

- Confinement des quarks ?
  - cf cours Alex
- Comment les quarks s'hadronisent ?

**Comment 'voit-on'  
et/ou  
comment produit-on  
toutes ces  
particules élémentaires ?**

# Dans la nature : les rayons cosmiques



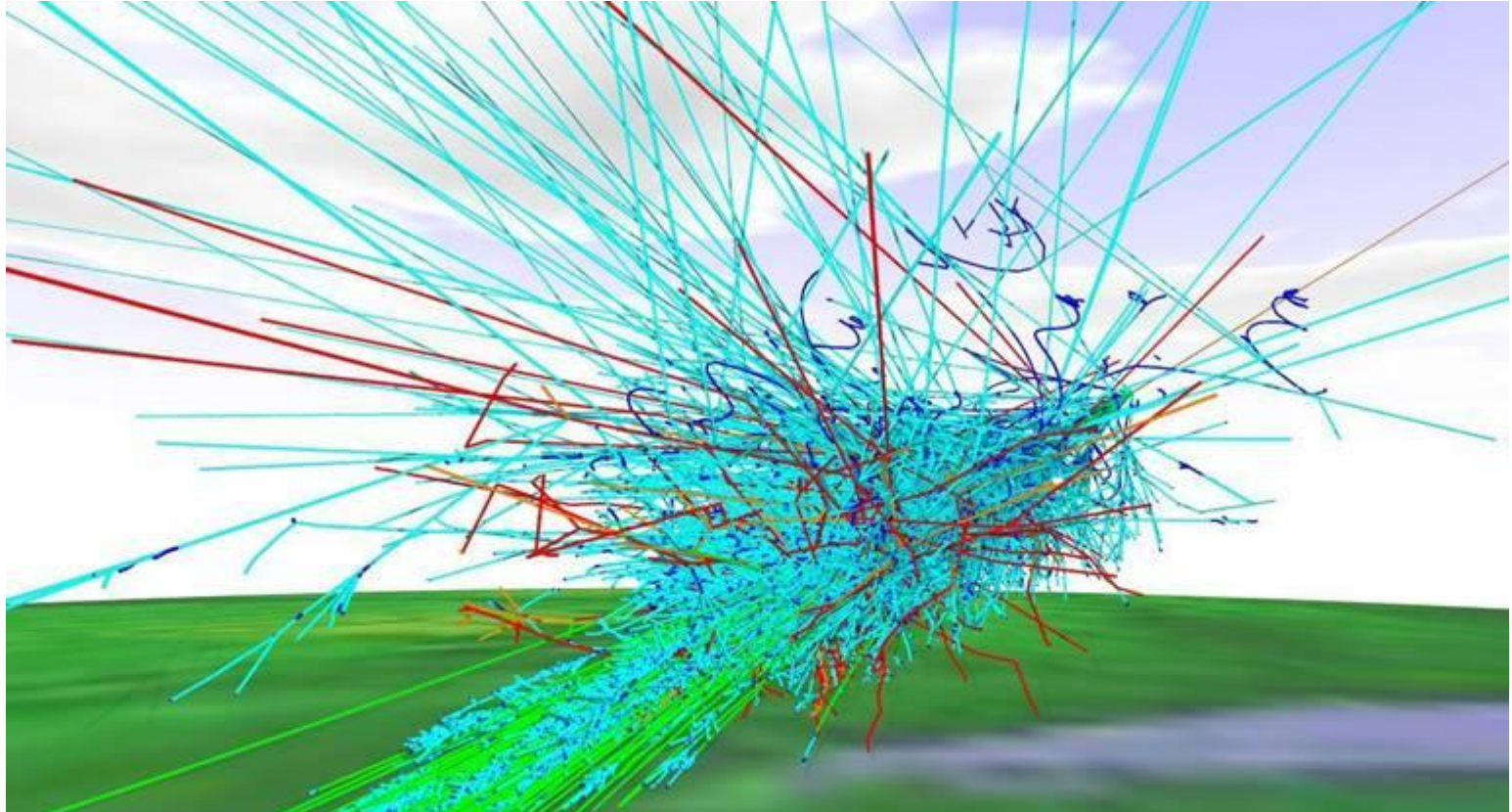
- 1912 : V.F Hess mesure la radioactivité en altitude et démontre l'existence des rayons cosmiques

- Jusqu'après la seconde guerre mondiale, les rayons cosmiques vont être analysés (ex. Chambres à brouillard du pic du midi)

- De nombreuses particules tels le muon, pion,kaon, vont être découvertes**

- Aujourd'hui on les étudie à nouveau (ex. AUGER) pour étudier des particules d'énergies ultra hautes**

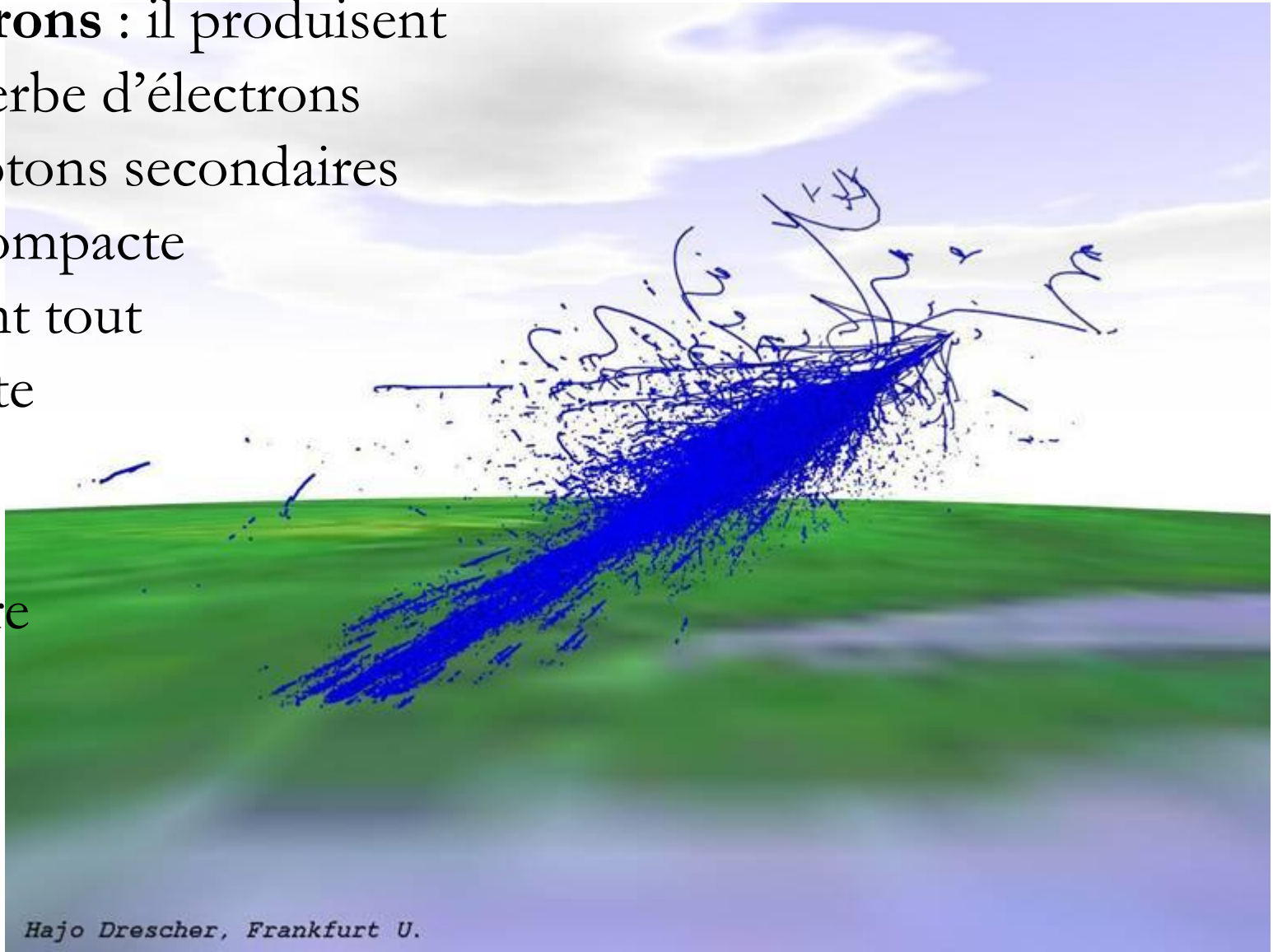
# Ex : simulation d'un rayon cosmique de très haute énergie



**Des noyaux de hautes énergies produisent des gerbes secondaires ...**

# Simulation d'un électron

**Electrons** : il produisent  
une gerbe d'électrons  
et photons secondaires  
très compacte  
Ils sont tout  
de suite  
arrêté  
par la  
matière



# Simulation d'un muon

**Les muons** interagissent  
très peu avec la matière  
ils ionisent la matière  
lors de leur passage

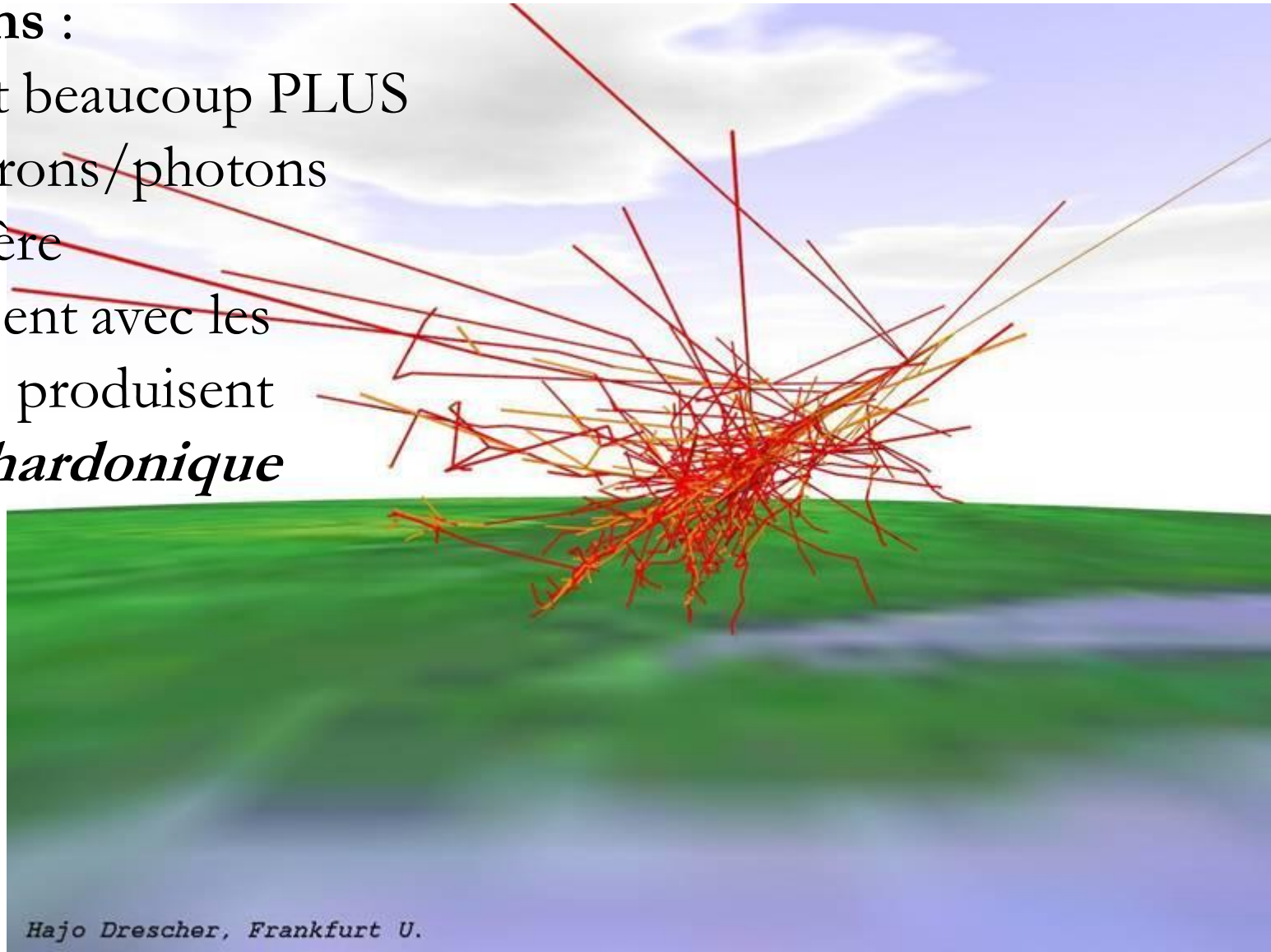


# Simulation d'un hadron

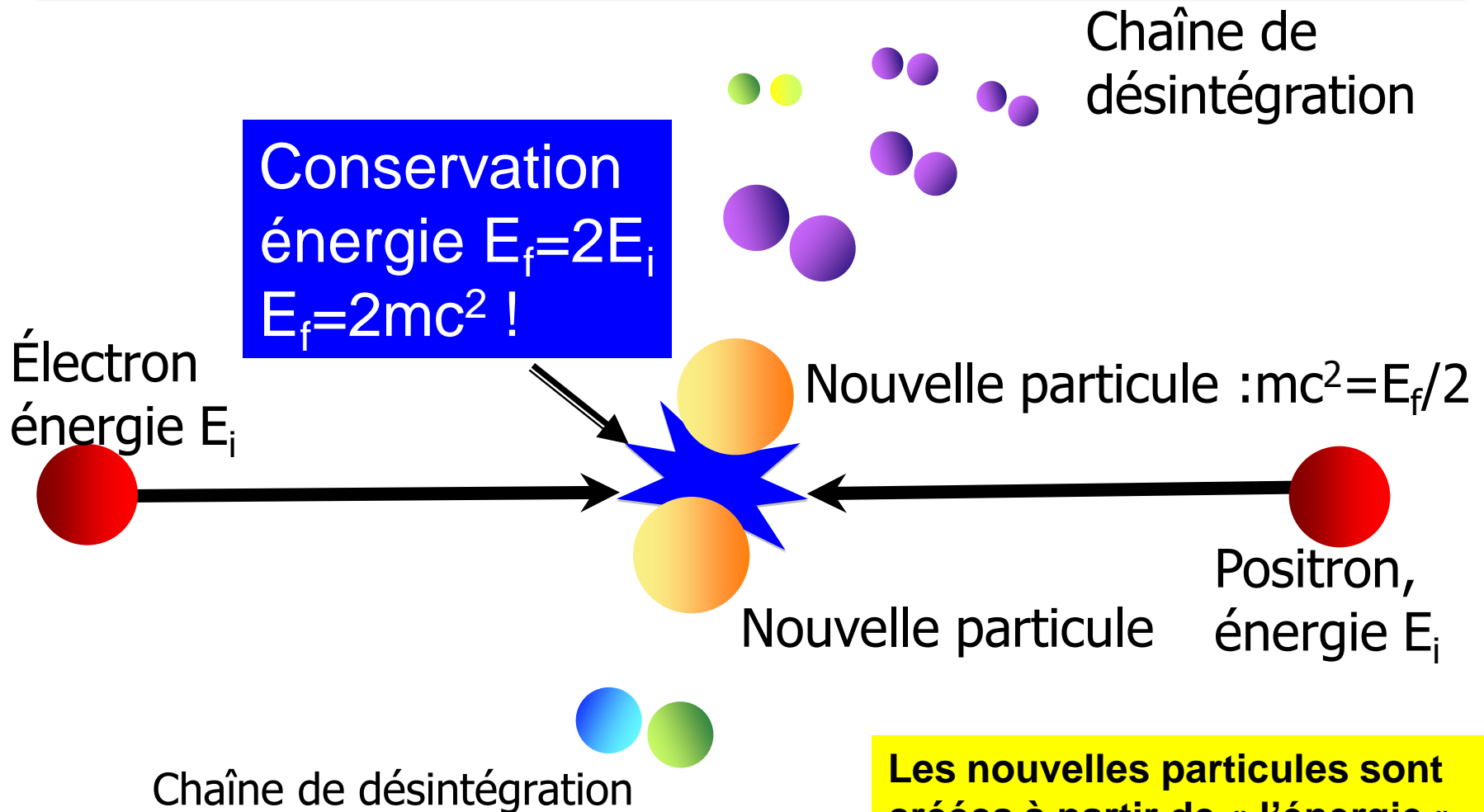
## Les Hadrons :

Ils pénètrent beaucoup PLUS  
que les électrons/photons  
dans la matière

Ils interagissent avec les  
noyaux et ils produisent  
*une gerbe hadronique*



# Au lieu d'attendre qu'elles 'pleuvent' du ciel : Production de particules avec les accélérateurs

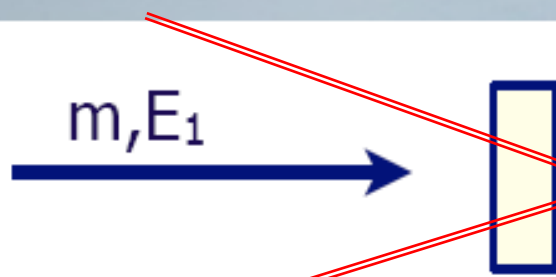


On ne peut calculer que la probabilité  
de créer telle ou telle particule !  
(théorie quantique = indéterministe  
mais probabilités déterminées !)

Les nouvelles particules sont  
créées à partir de « l'énergie »  
Elles n'étaient pas « dans » les  
particules incidentes



# Faisceaux linéaires, circulaires, collisions, cibles fixes



Cible fixe

$$\sqrt{s} = \sqrt{2mc^2(E_1 + mc^2)}$$

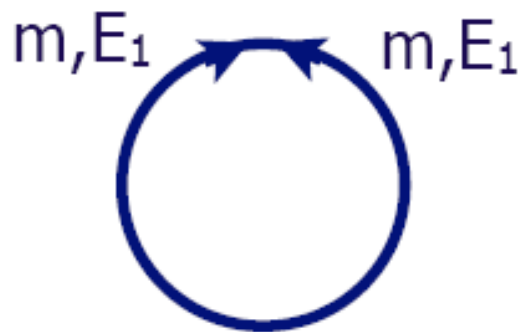
$p$  de 1 TeV  $\sqrt{s} = 43.3$  GeV



Collisionneurs linéaires

$$\sqrt{s} = E_1 + E_2 \quad (p \text{ de } 1 \text{ TeV } \sqrt{s} = 2 \text{ TeV})$$

Un seul croisement



Collisionneurs circulaires

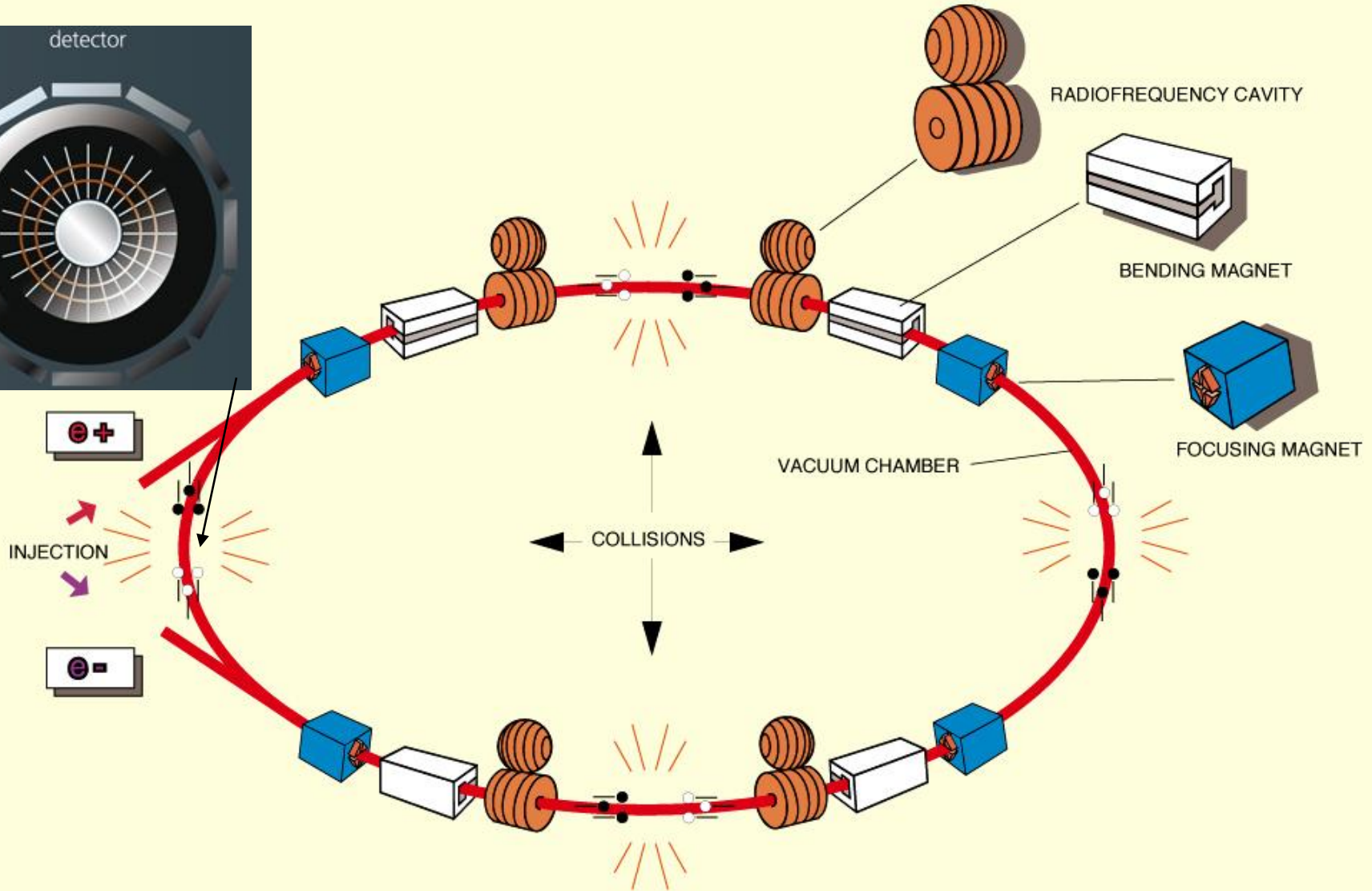
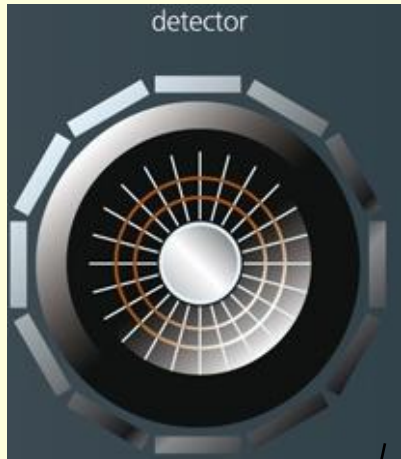
$$\sqrt{s} = E_1 + E_2 \quad (p \text{ de } 1 \text{ TeV } \sqrt{s} = 2 \text{ TeV})$$

croisements répétitifs

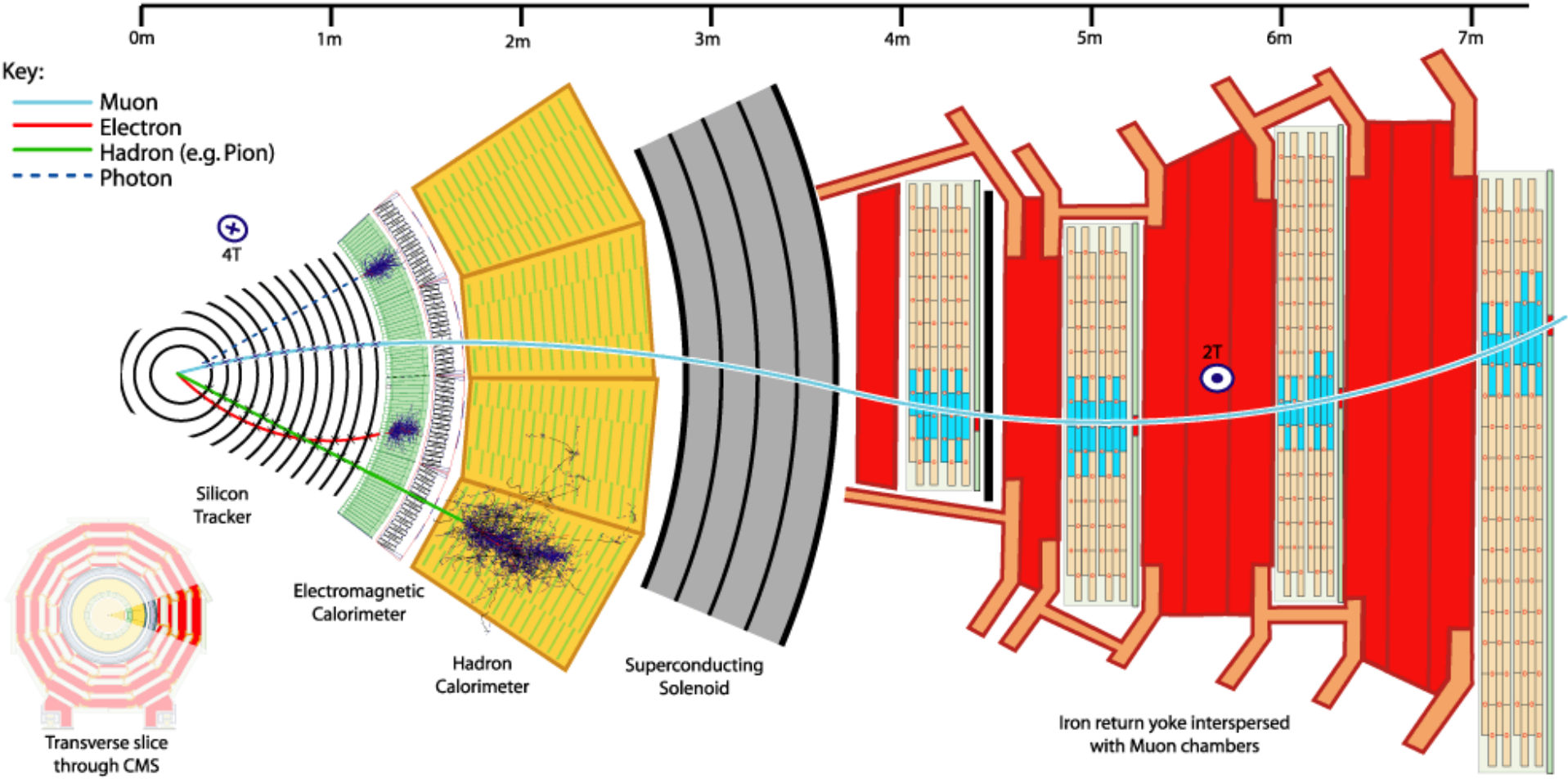
Rayonnement synchrotron

# Les détecteurs en physique des particules

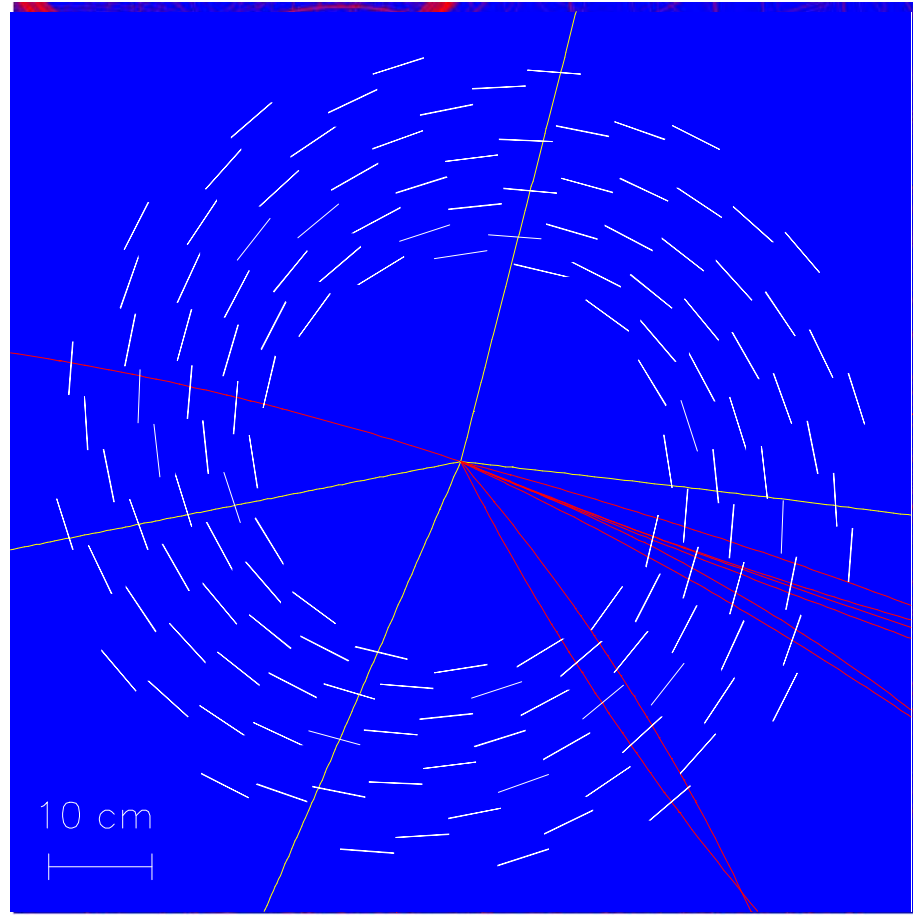
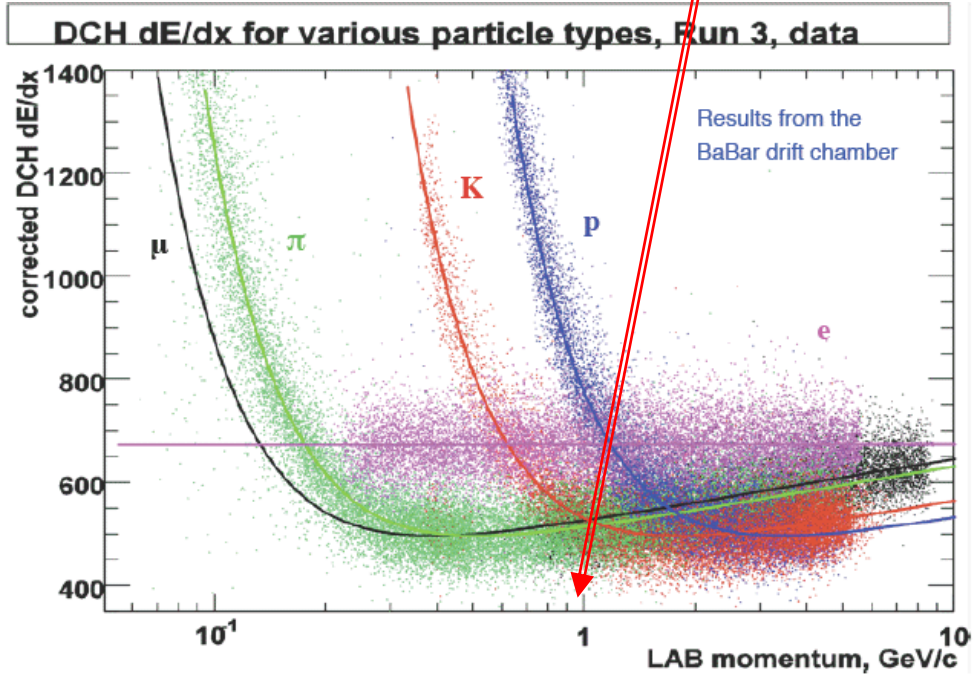
# Accélérateur circulaire / synchrotron



# On 'voit' les particules dans de gigantesques détecteurs ('voir' = reconstruction à partir de signaux électroniques)



Dans les détecteurs de traces on mesure l'ionisation  
identifications des particules à '**BASSE ENERGIE**' (CF. cours Alex)



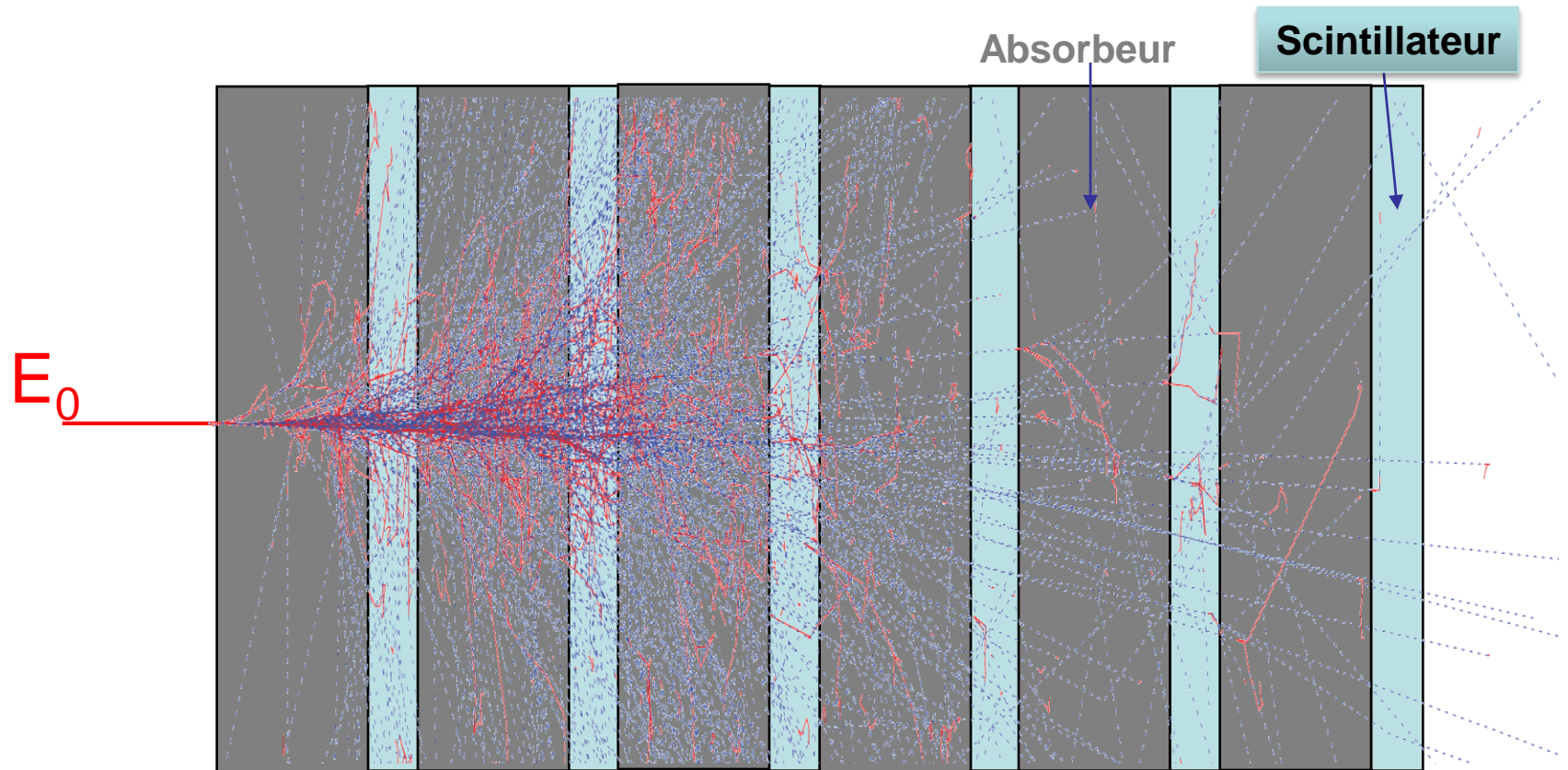
Grâce au champ magnétique on mesure les impulsions des traces chargées

Ex : événement simulation  
Higgs → ZZ → 4 muons



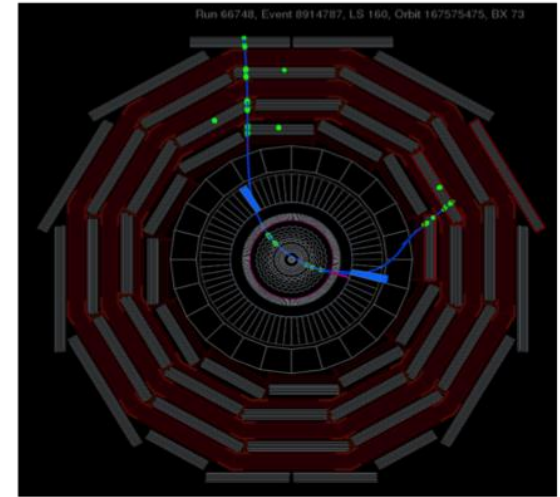
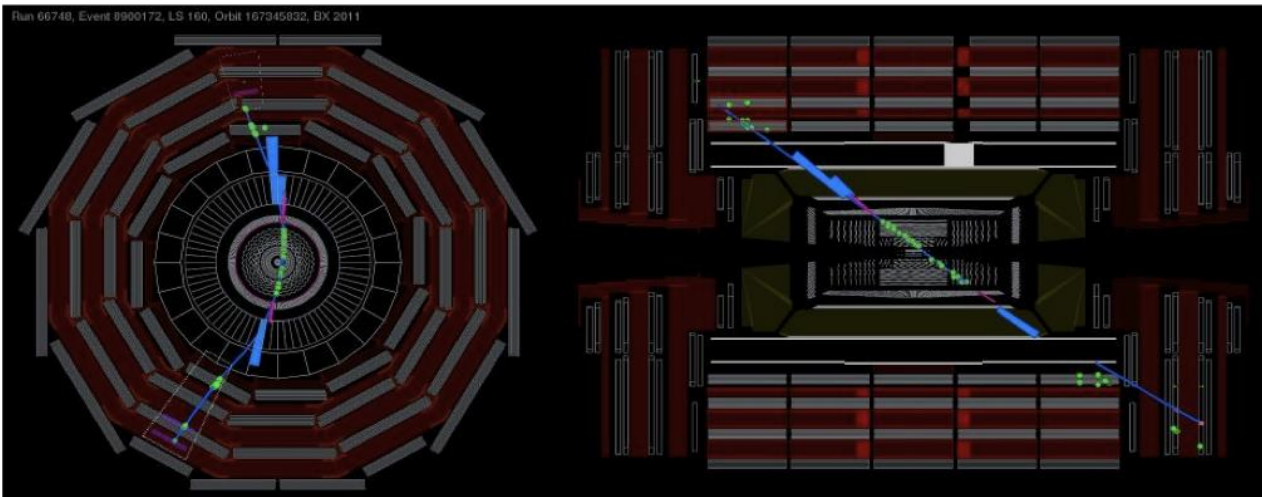
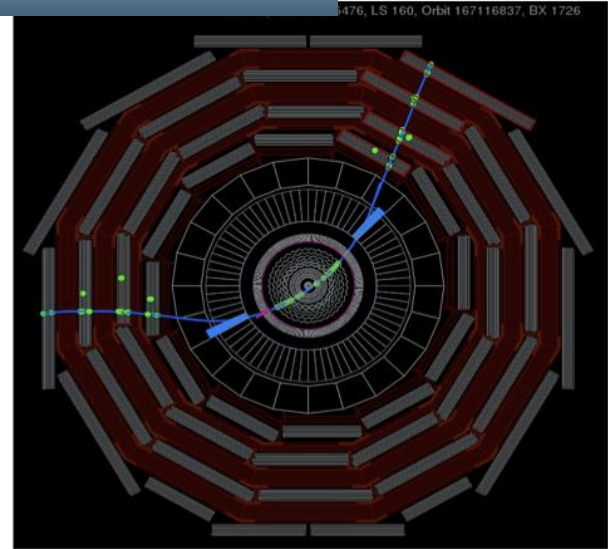
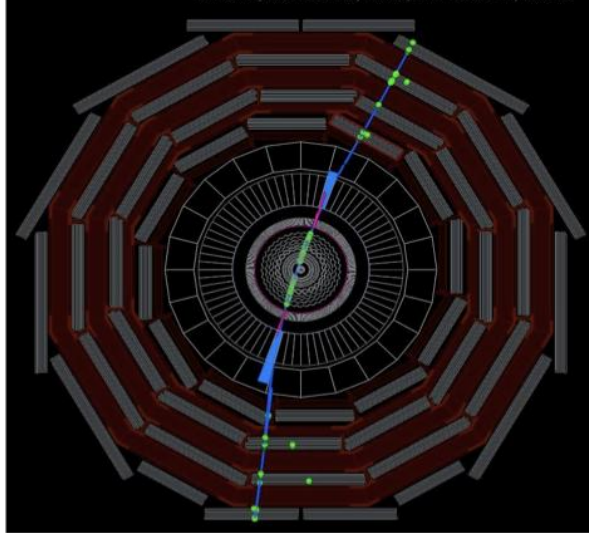
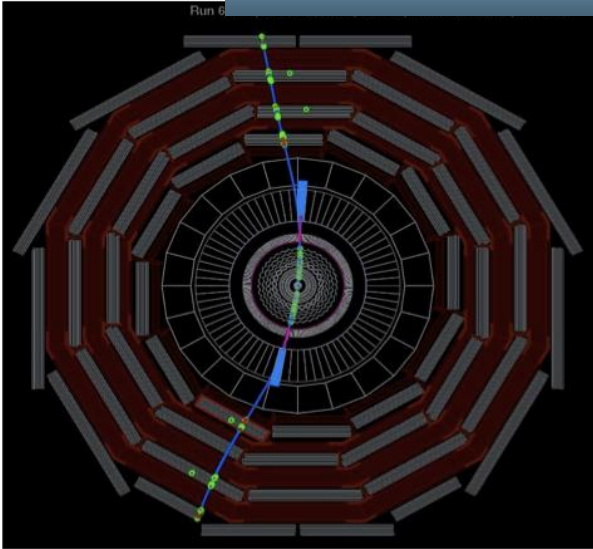
Find 4 straight tracks.

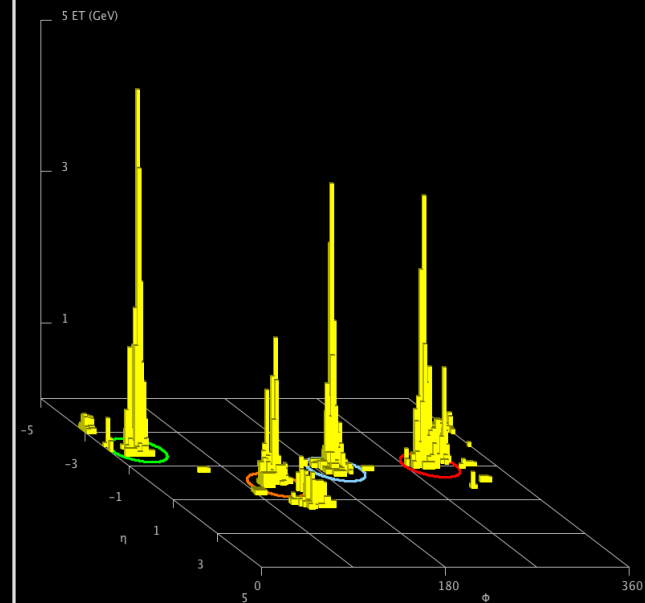
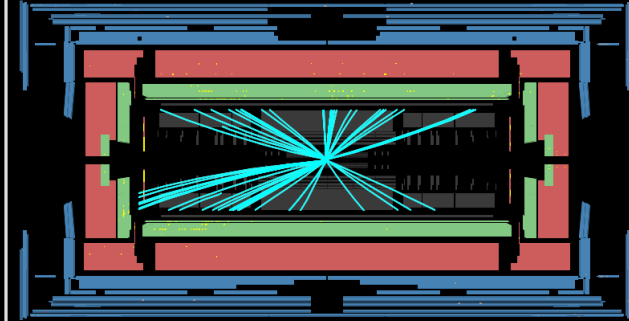
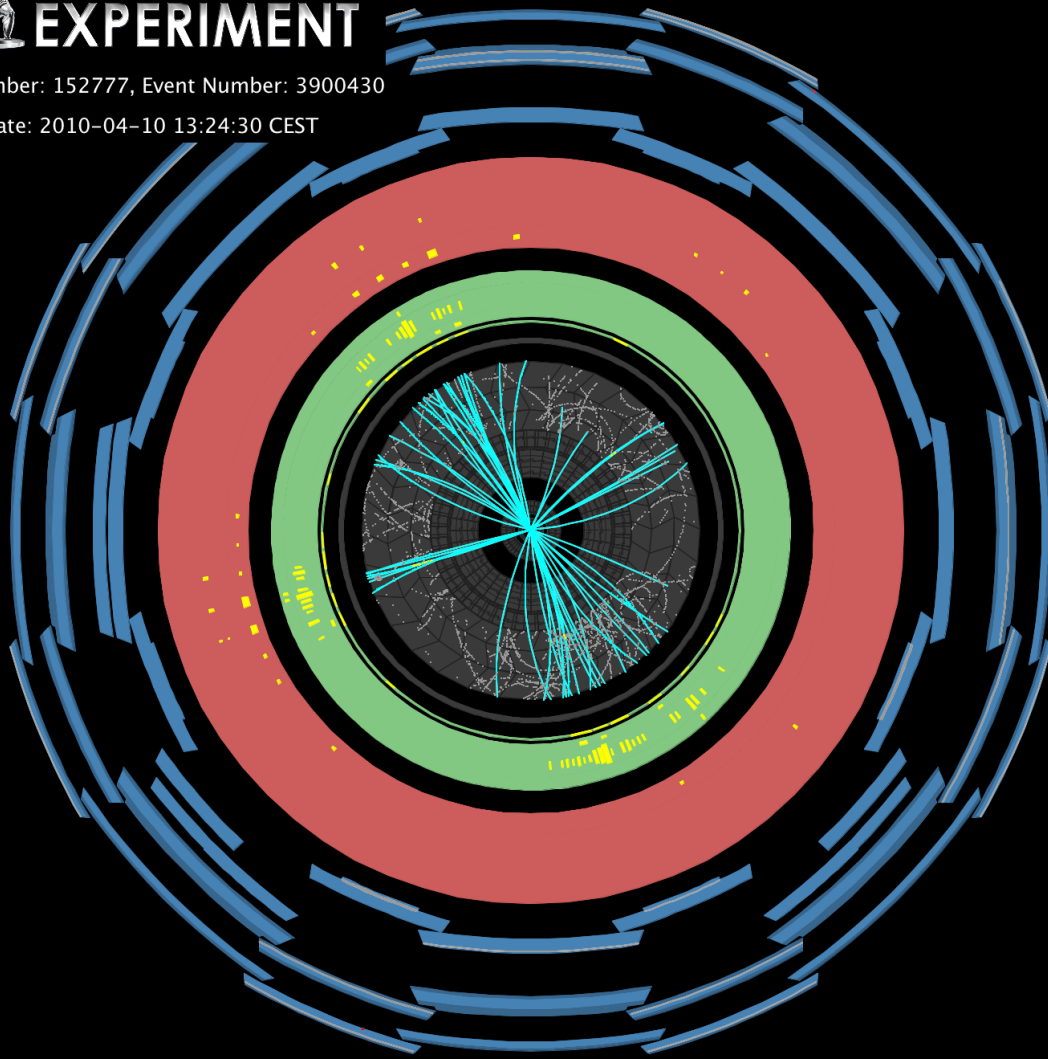
# Calorimetre pour la mesure de l'énergie et l'identification des particules à haute énergie



Les électrons et photons sont arrêtés 'tout de suite'  
Les hadrons peuvent pénétrer beaucoup plus loin avant d'interagir

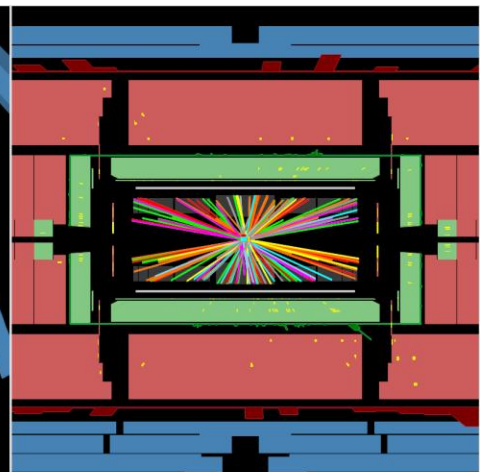
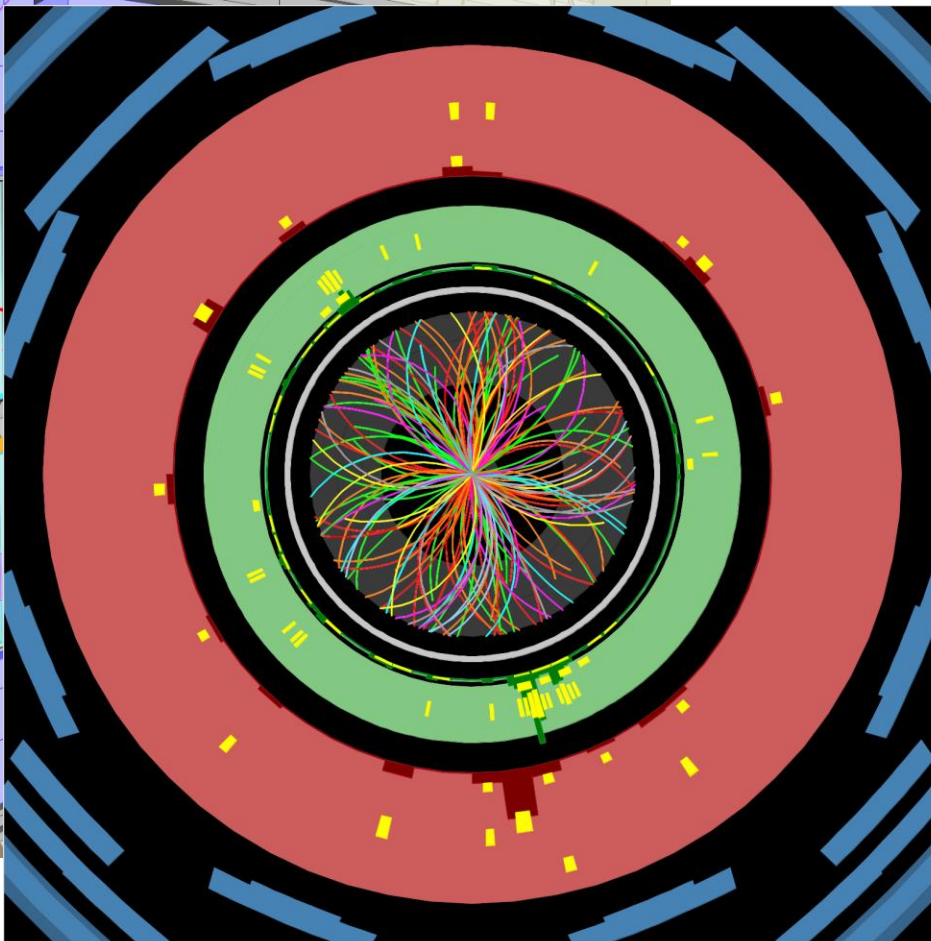
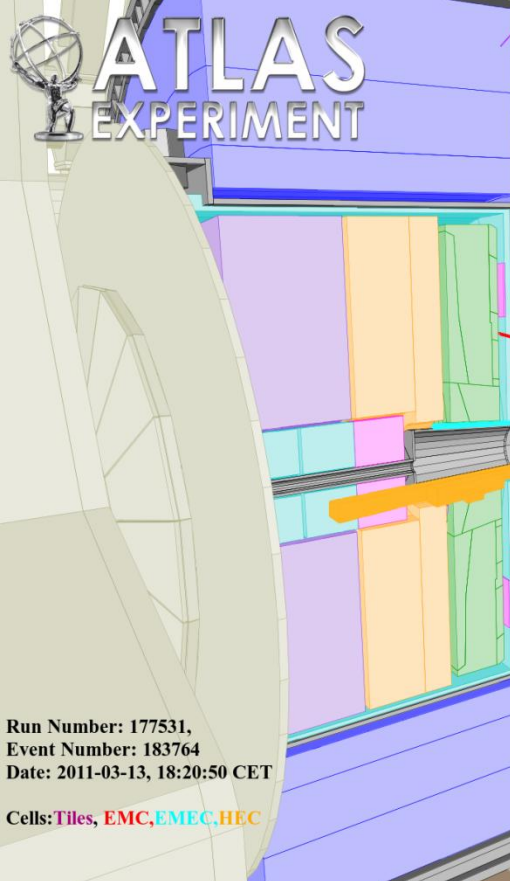
# exemple : $\mu$ cosmiques dans CMS



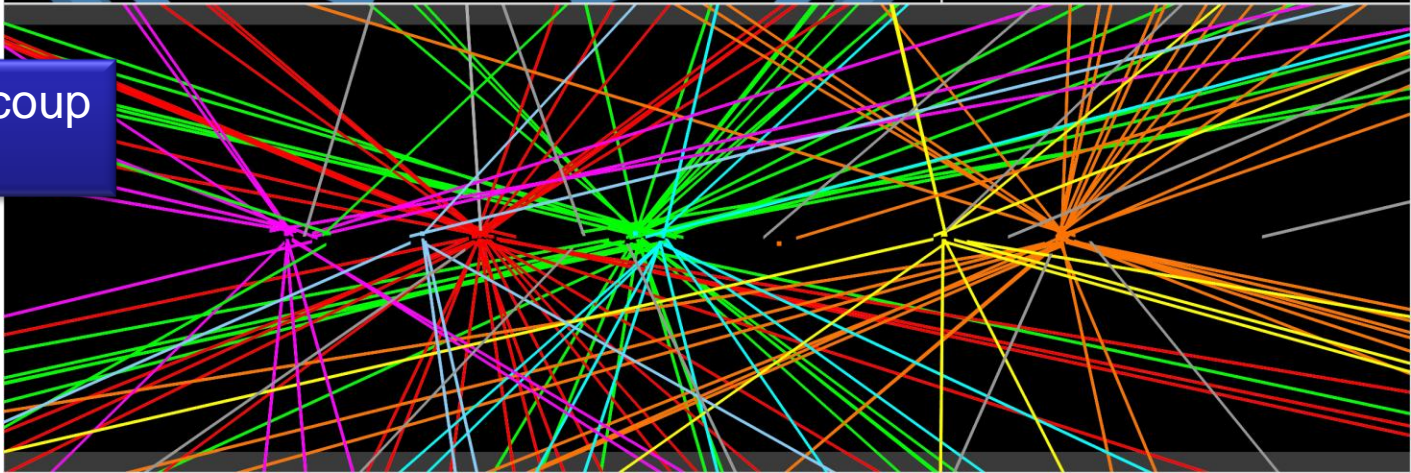


**Événement avec 4 jets**





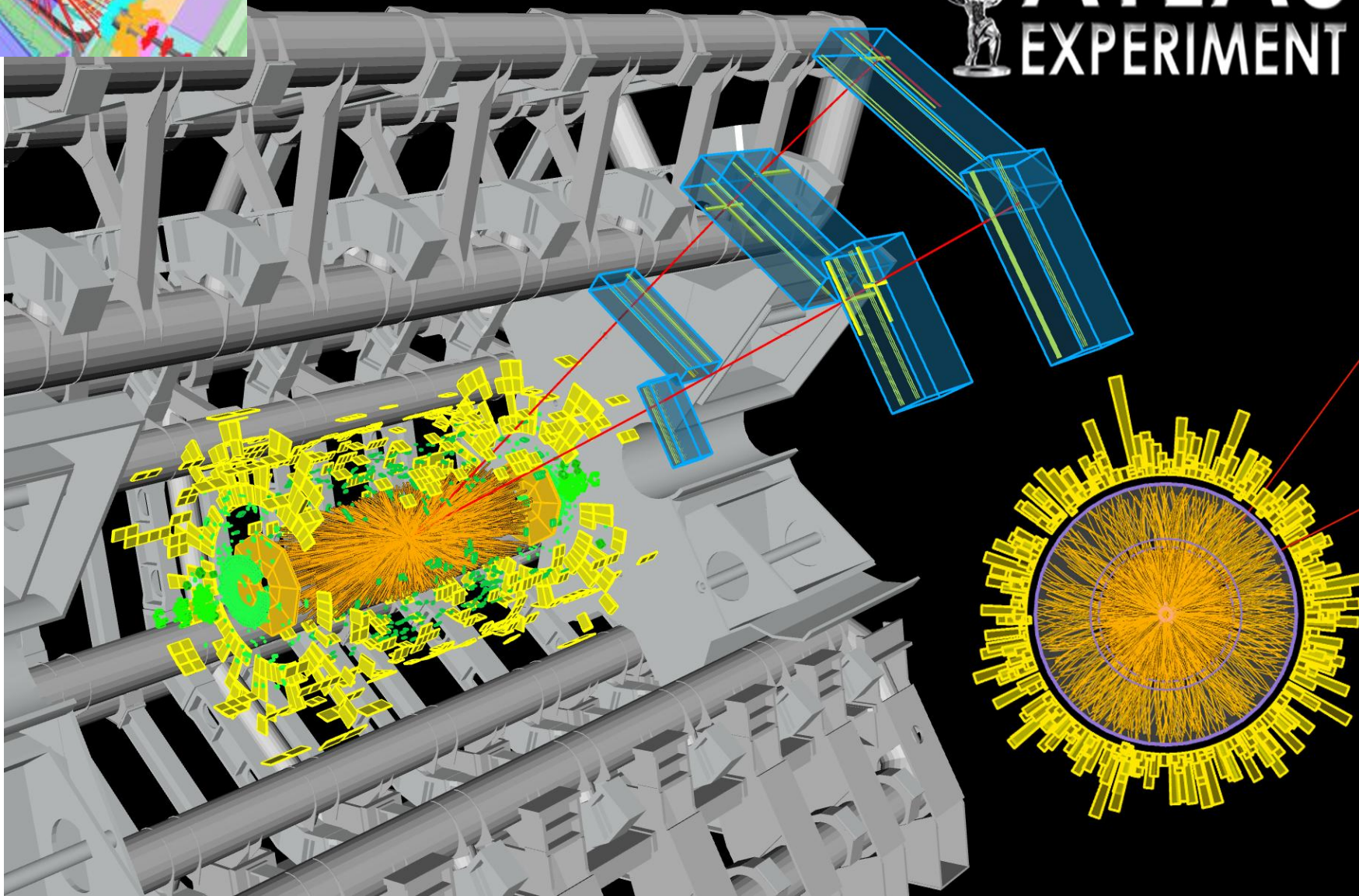
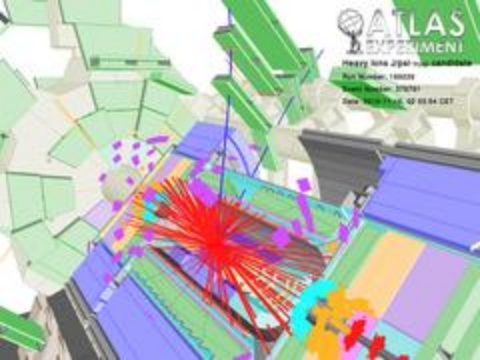
Événement avec beaucoup de traces chargées



# Collisions plomb-plomb dans ATLAS

## $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Run 169226, Event 379791  
Time 2010-11-16 02:53:54 CET



# Comment analyse t'on les données des détecteurs

- On cherche des topologie d'évènements caractéristiques des signaux attendus
  - Simulation de la nouvelle physique Et du détecteur
  - Recherche de critère discriminant la physique connue de la nouvelle physique attendue
- On mesure très précisément les paramètres du modèle standard
  - On compare au calcul théorique incluant ou non de la nouvelle physique

# Les accélérateurs à hautes énergies

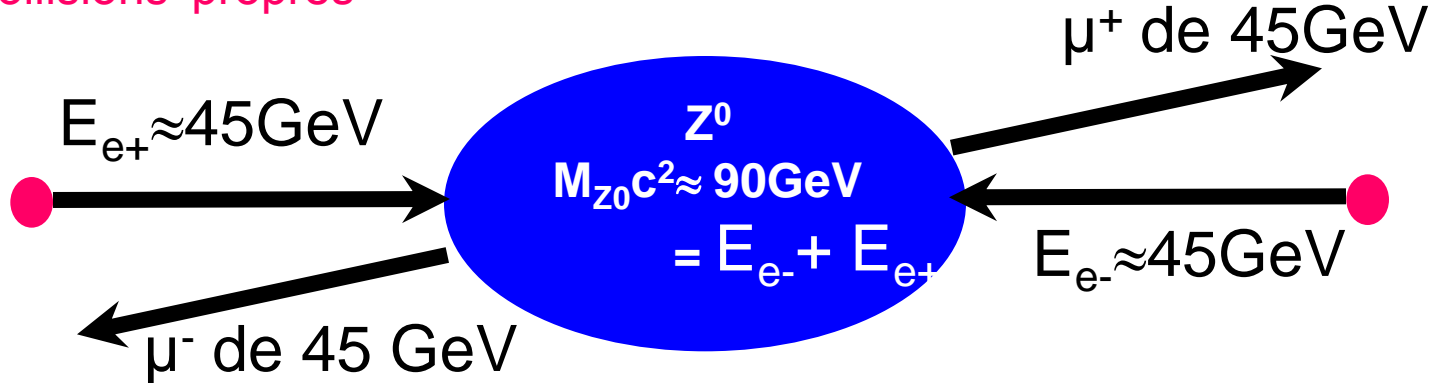
Deux types de collisionneurs :

- Électron-positrons
  - *‘Machine de précision’*
- Hadron-hadron
  - *‘Machine de découverte’*

# Collisionneur e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> : ex. la production du boson Z<sup>0</sup> au LEP

e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> sont 2 particules élémentaires

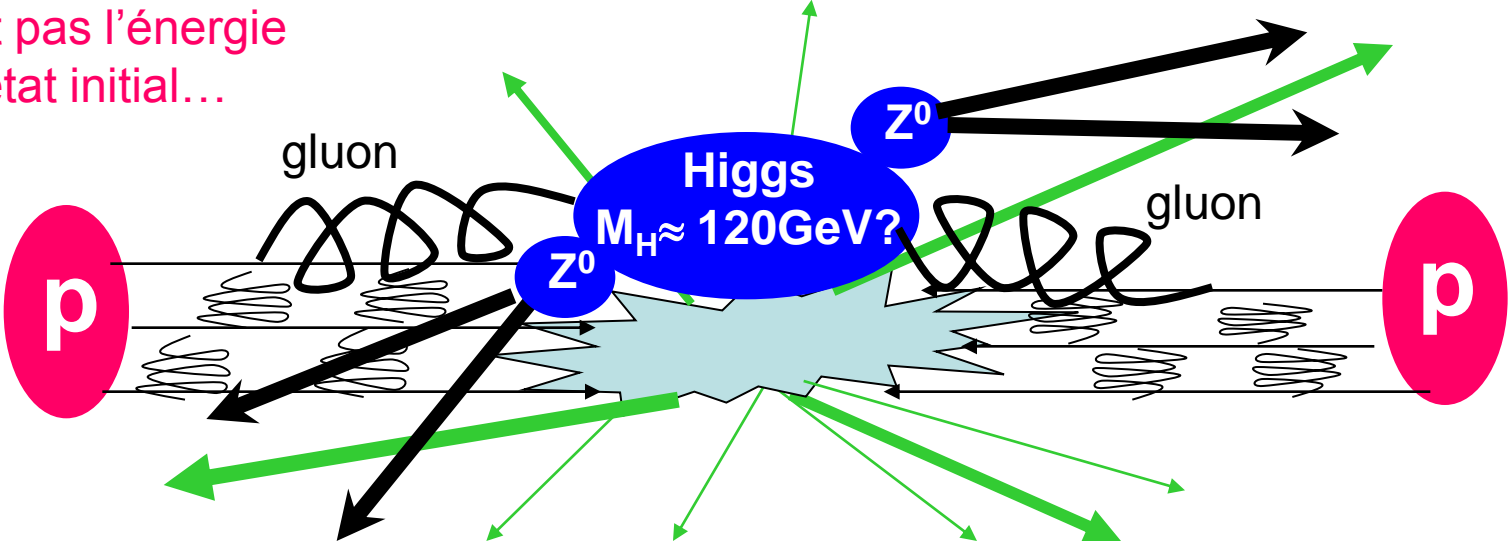
- On connaît bien l'énergie et la nature de l'état initial
- Collisions 'propres'



# Collisionneur pp (ou ppbar) : ex production du Higgs (au LHC/TEVATRON)

P, Pbar sont 2 particules composées de quarks/gluons

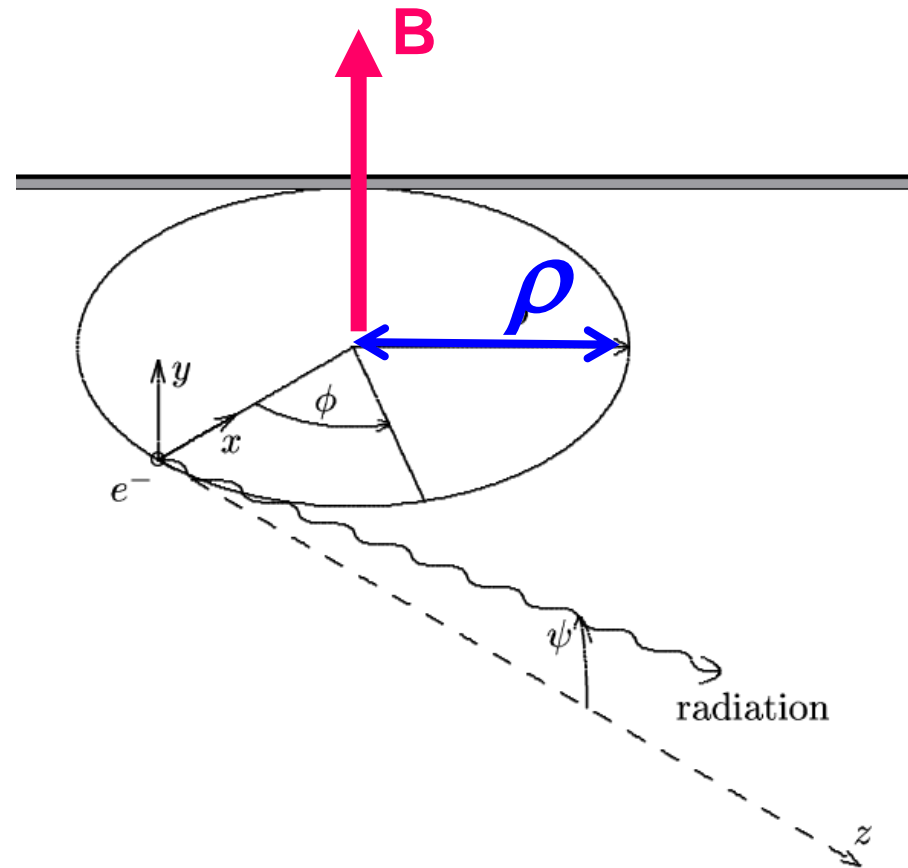
- On ne connaît pas l'énergie et la nature de l'état initial...



# Mais il y a une grosse différence entre électrons et protons : le rayonnement synchrotron !

- Lorsqu'une particule chargée tourne dans un champ magnétique elle perd de l'énergie en rayonnant des photons (rayonnement de freinage ou bremsstrahlung)
- On peut montrer que la puissance perdue par une particule

$$P \propto \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4 \frac{1}{\rho^2}$$



• Il faut que des cavités accélératrices RF compensent la perte de puissance à chaque tour

• Au-delà d'une certaine énergie il est plus rentable de passer d'un collisionneur circulaire à un collisionneur linéaire

• EX. :

• Le LEP de circonférence 27km :  $E_{\text{beam}} \sim 50\text{GeV}-100\text{GeV}$

• L'ILC accélérateur linéaire de  $\sim 30\text{km}$  :  $E_{\text{beam}} = 250\text{GeV}-500\text{GeV}$

Le rayonnement synchrotron limite l'énergie communicable aux électrons :

Comparaison ( CERN ) :

☆ LEP :  $E_e = 108 \text{ GeV}$        $r = 3\,096 \text{ m}$        $P = 61 \text{ TeV/s}$  par électron

☆ LHC :  $E_p = 7\,000 \text{ GeV}$        $r = 2\,778 \text{ m}$        $P = 0,31 \text{ eV/s}$  par proton

**Mais pas aux protons !**

**C'est pour ça que le LHC est un collisionneur circulaire !**

**Et le futur ILC un collisionneur linéaire ...**

# **Les accélérateurs à hautes énergies**

**Quelles sont les  
contraintes pour observer  
de la 'nouvelle' physique  
aujourd'hui ?**



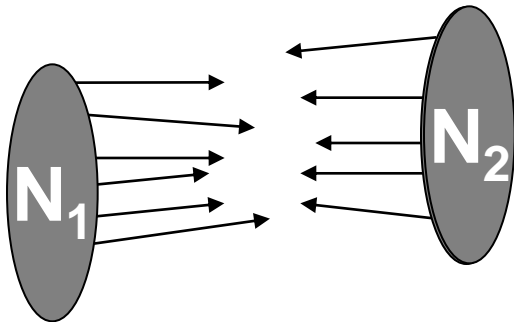
# Pour voir des phénomènes rares il faut :

**Premièrement** : Beaucoup de particules par paquet et beaucoup de paquets → fort courant

**Mais ca ne suffit pas** : Il faut les 'concentrer' au maximum

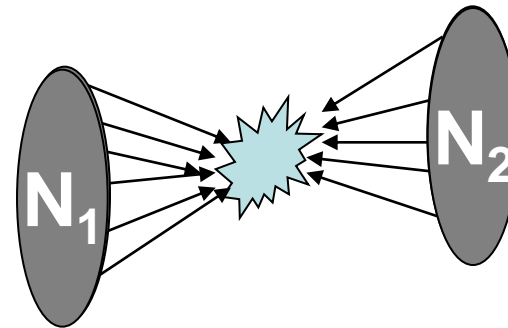
## Mauvaise focalisation...

Les particules ont peu de chances de se rencontrer ...



## Bonne focalisation !

Les particules ont toutes les chances de se rencontrer !



Nb d'interactions/seconde

$$\propto \frac{f_{Bunch} N_1 N_2}{taille_x^2 + taille_y^2}$$

(Si faisceaux identiques et gaussiens)

C'est le facteur de luminosité

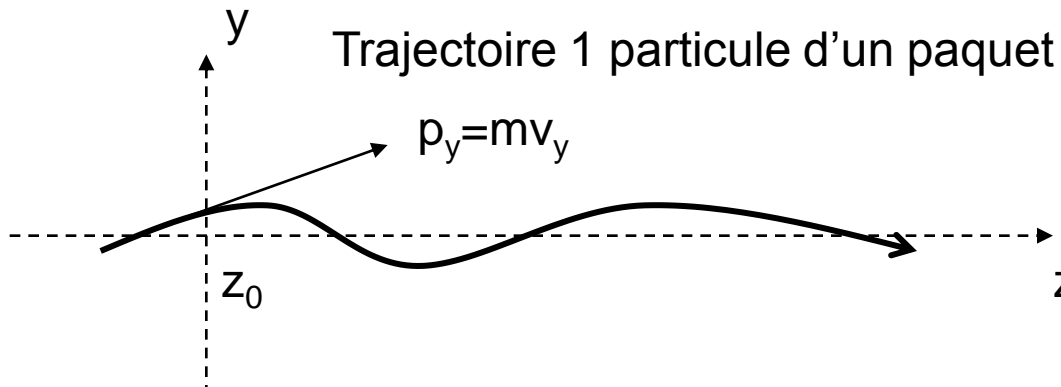
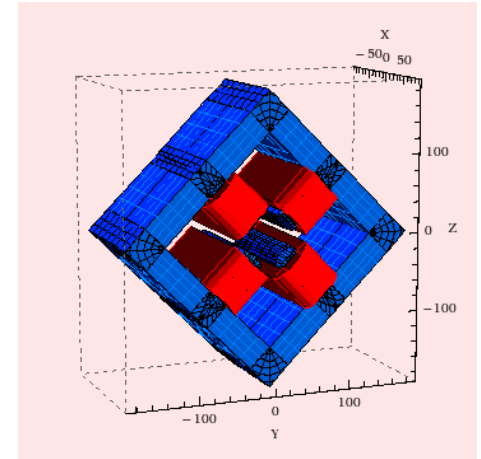
# Mais un faisceau de particules chargées ne se focalise pas comme un faisceau lumineux ...

Il faut des champs magnétiques quadripolaires (équivalent des lentilles)

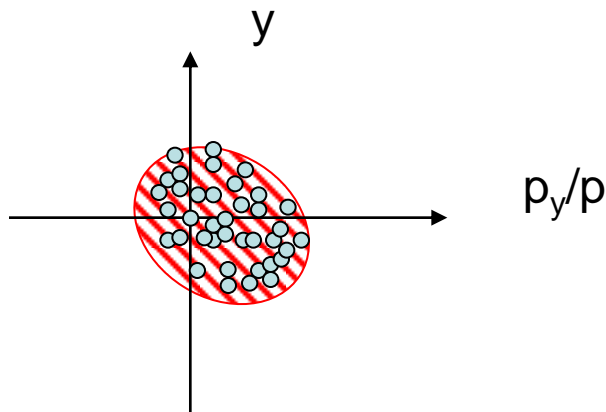
ET il faut 'pouvoir' focaliser les faisceaux :

**il faut une bonne émittance** ...

*c.f. cours  
JM De Conto*



En  $z=z_0$  :  
cette particule est situé  
au point  $y$  avec une impulsion  $p_y$



Chaque particule du paquet  
est représentée par un point  
Dans l'espace  $y, p_y$   
L'émittance est définie par

$\epsilon_y$  = surface couverte par ces points

## La taille d'un faisceau de particules chargées focalisé par un ensemble d'aimants focalisant :

Taille en y=

$$\sqrt{\frac{\beta_y \varepsilon_y}{E / m}}$$

$\beta_y$  est le facteur focalisant des aimants

Donc : pour une fonction  $\beta_y$  donnée (=système d'aimants)

+ émittance petite + taille faisceau petite

pour une émittance donnée

+ énergie des faisceau grande + taille faisceau petite

Donc : il faut créer des faisceaux à fort courant et à faible émittance pour faire de la physique des particules !!!

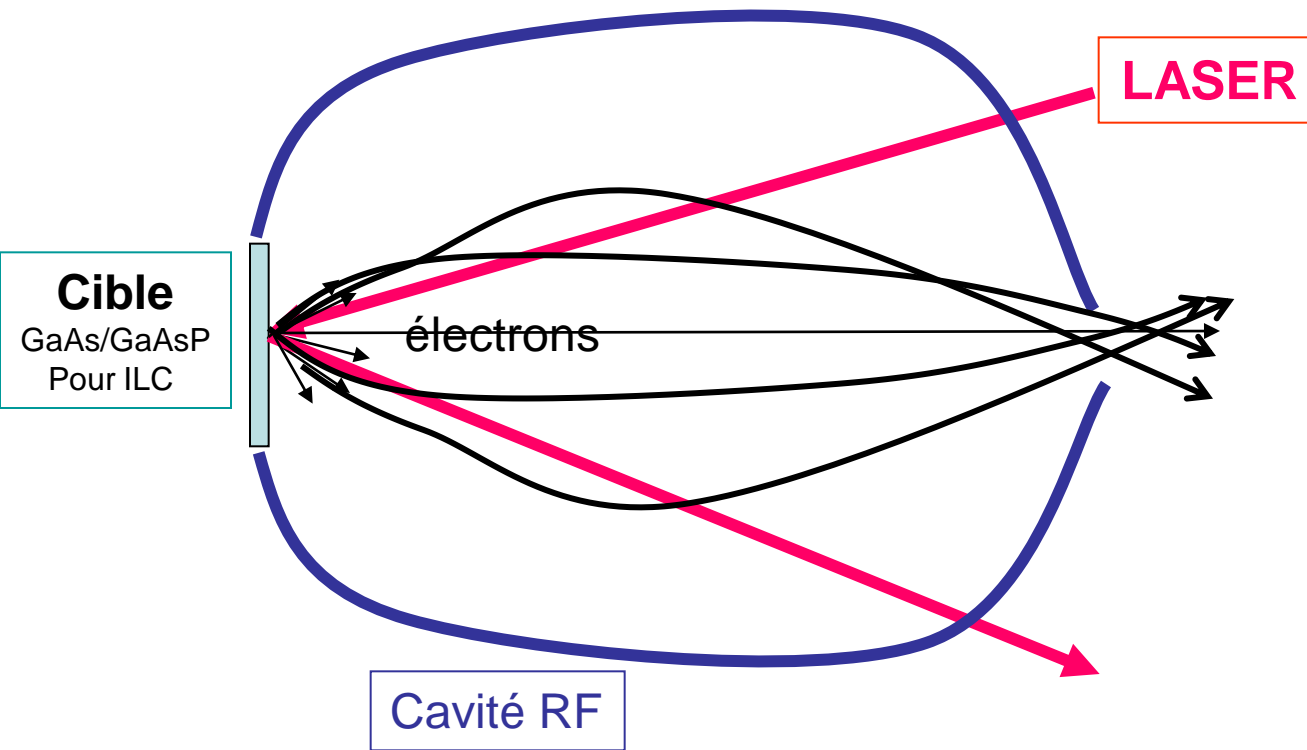
Note : une fois créée, il faut aussi conserver la bonne émittance ...

# Comment faire des faisceaux d'électrons de faibles émitances?

*c.f. cours H. Monard*

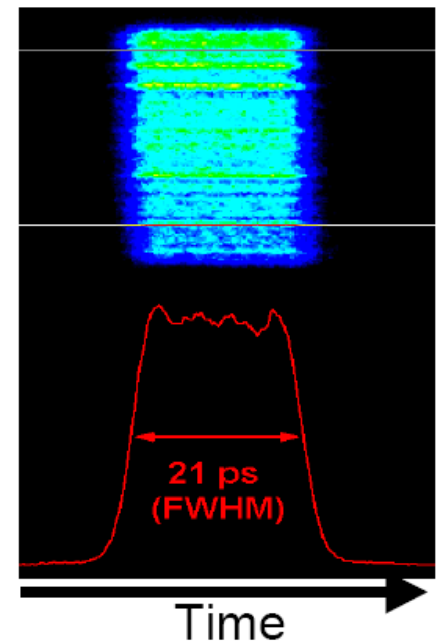
1° : utiliser un canon photo\_déclenché

Ex. projet ILC  $\varepsilon_y \sim 70 \mu\text{m} \cdot \text{rad}$



**Pulses lasers 'spéciaux' :**  
(ex. TTF2/DESY)

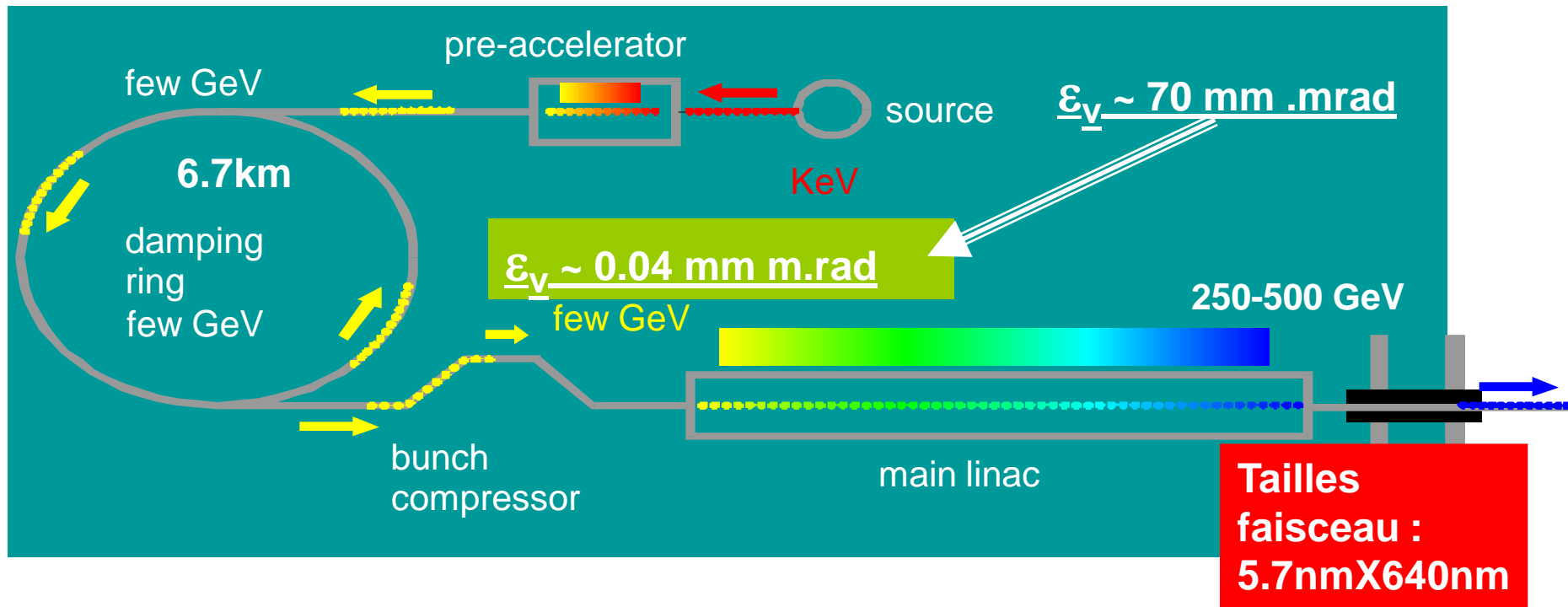
- UV: 266nm
- 20  $\mu\text{J}$ /pulses
- 3000 pulses @ 5Hz



## 2° : utiliser le rayonnement synchrotron

On fait tourner les électrons dans un anneau où ils rayonnent

- En rayonnant le faisceau se 'compactifie'
- Pour les accélérateur circulaire : c'est gratuit !
- Pour les collisionneur linéaires : on ajoute un anneau !
  - À l'ILC le damping ring DOIT réduire l'émitance d'un facteur  $\sim 200$  !
  - Tout ça au rythme de 3000 paquets @ 5Hz ...
  - Soit  $\sim 200$ ms dans le damping ring...



# Comment obtient t'on de faibles émitances avec des protons/antiprotons ?

Source de protons :

- Ionisation H

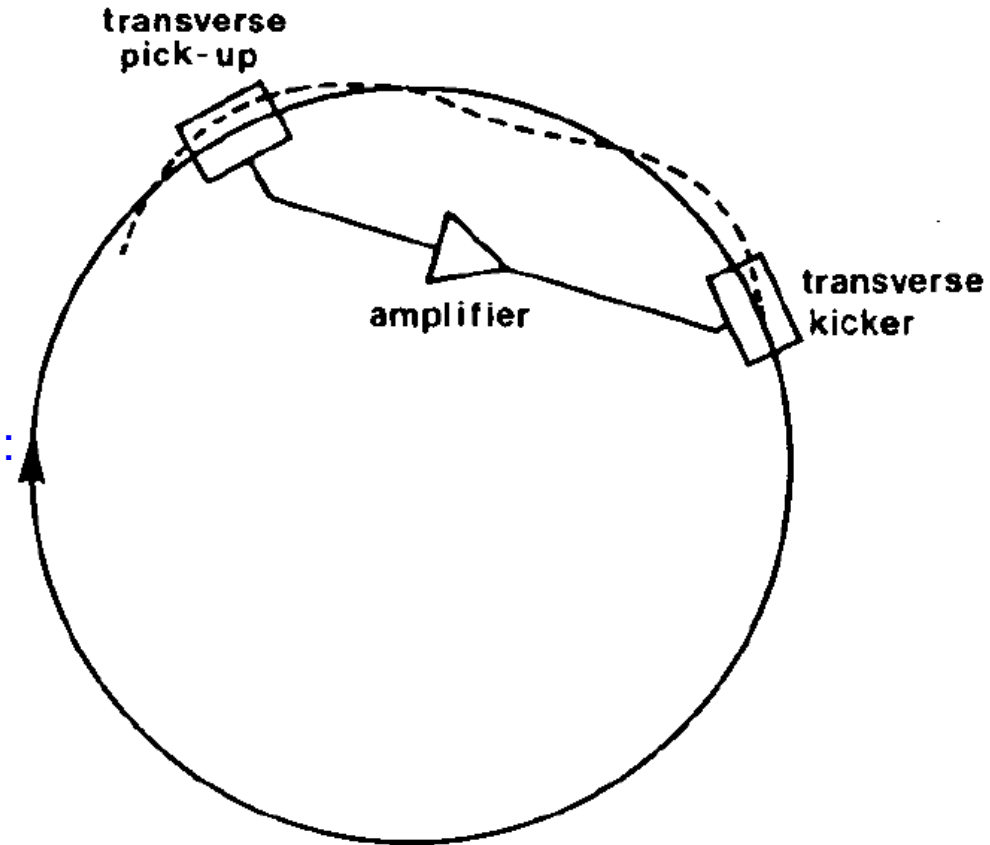
Source d'antiprotons :

- Faisceau proton+cible

Impossible d'utiliser le rayonnement synchrotron pour les protons :

$(m_p/m_e)^4 \sim 2 \cdot 10^{13}$  fois plus faible que pour les électrons ...

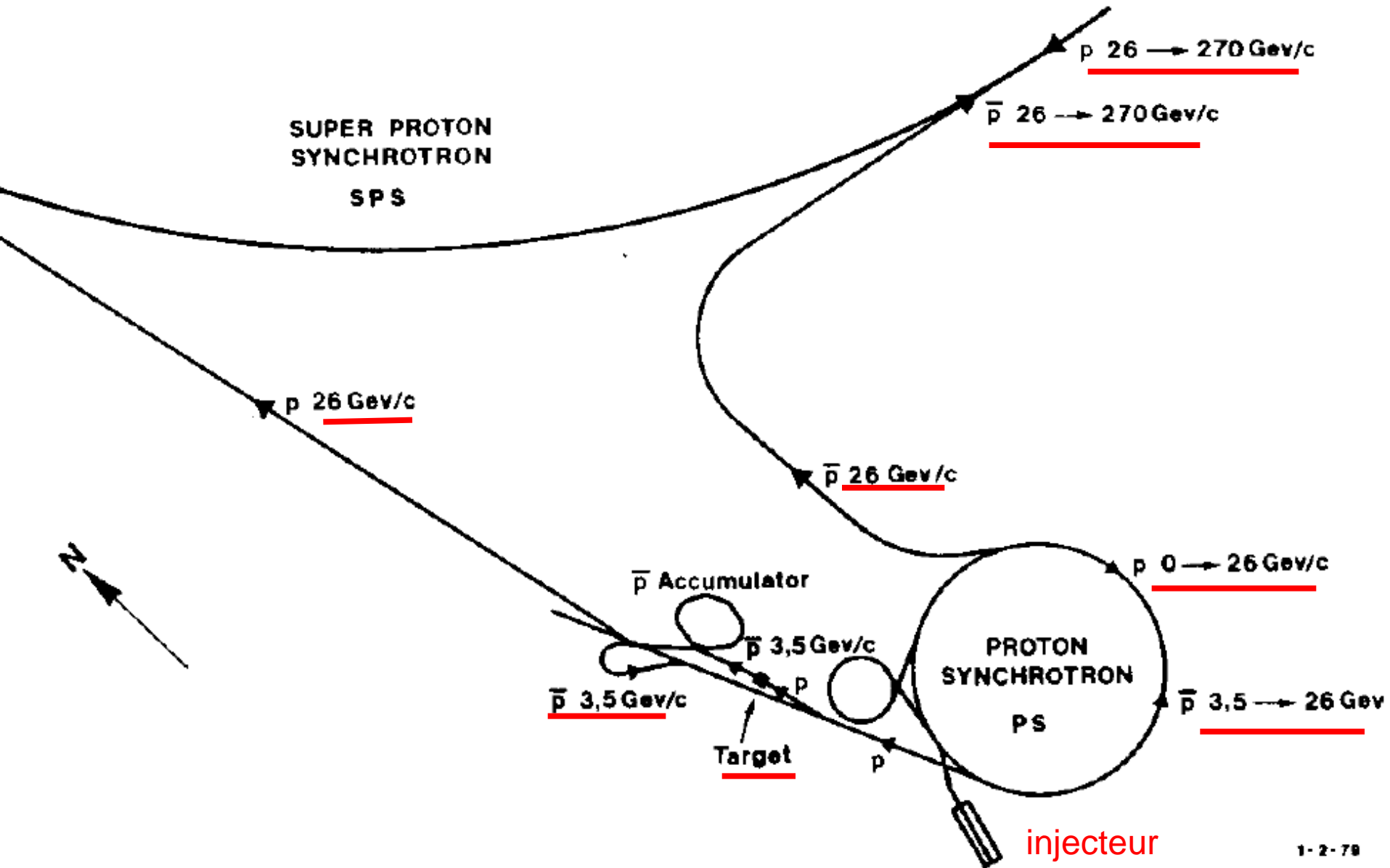
→ technique du Stochastic cooling pour antiprotons (Van der Meer)



Technique complexe d'analyse du signal

→ Sans cette technique 'rien' ne serait sortie du SPS !

Ex. 1 : LE SPS du CERN (découverte des bosons vecteurs  $W^\pm$  et  $Z^0$ )



Tiré de la présentation du prix Nobel de Van der Meer

## Ex. 2 : LE TEVATRON de FERMILAB (découverte du quark top)





# En résumé

- Les accélérateurs du futur visent :
  - Des hautes luminosités
    - En augmentant le nb de particules par paquets
      - Limite liée à la consommation électrique & à l'appareillage
    - En augmentant la fréquence des paquets
      - Limites thermiques canon et effet paquet/paquet
    - En diminuant l'émittance
      - Contrôle de l'émittance durant la propagation du faisceau
      - Contrôle des nanobeam au point d'interaction
    - Les hautes énergies
      - Cavité accélératrices à for gradient
        - » CLIC vise 100MV/m (technologie 'drive beam')
        - » ILC vise 35 MV/m (technologie Supra)