

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

Plan

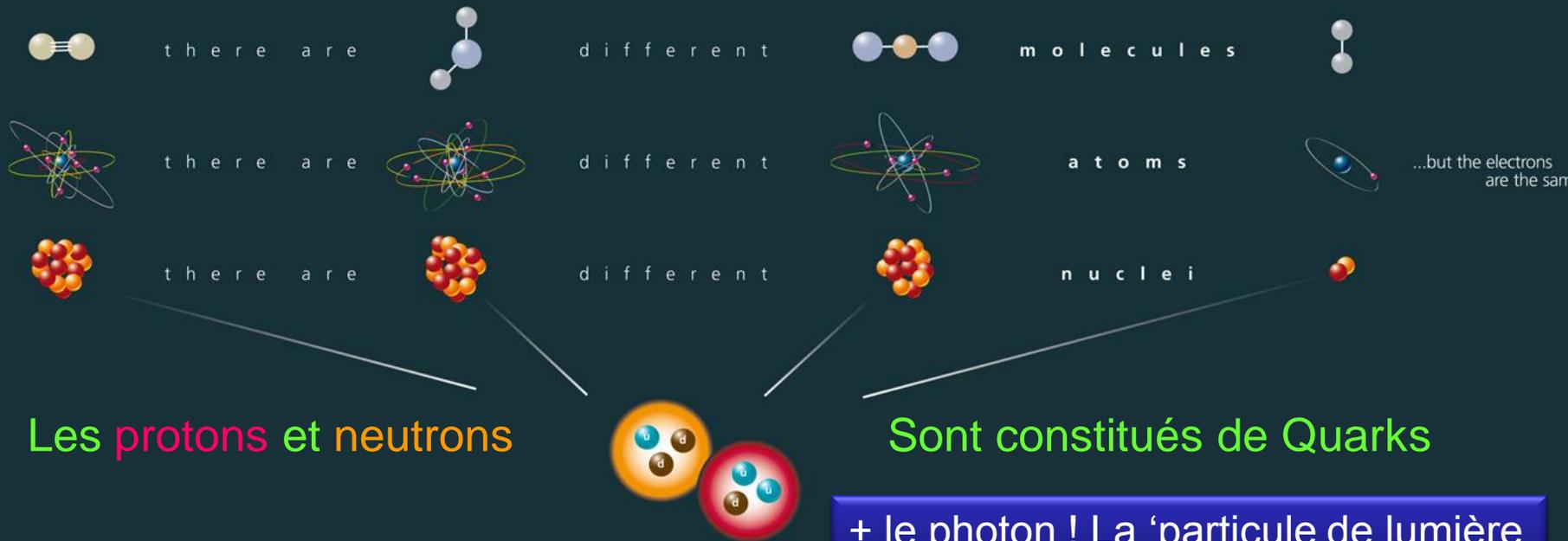
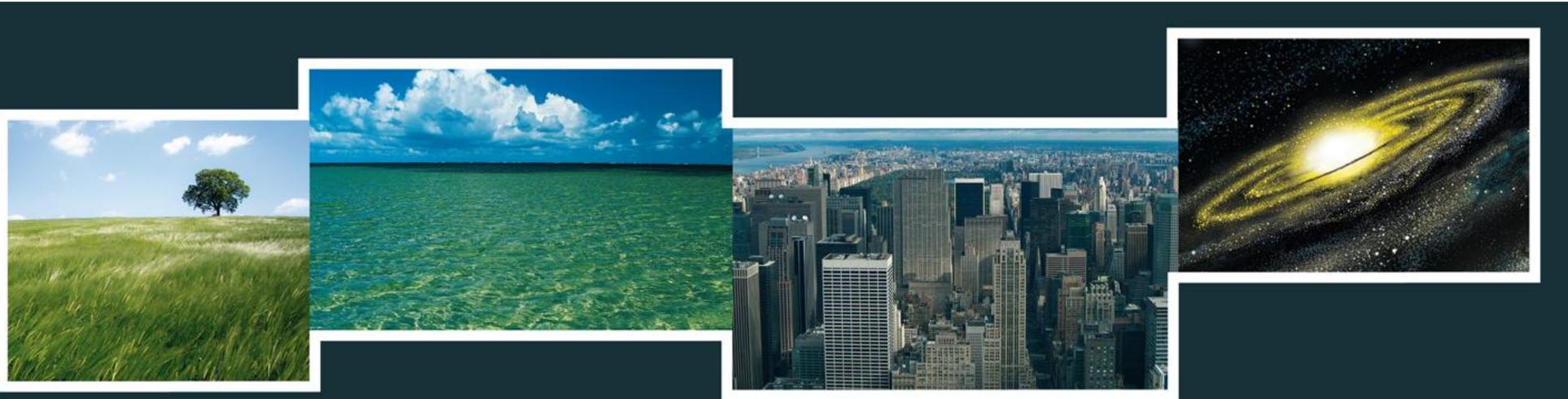
- 1) Introduction à la physique des particules
 - Les particules élémentaires et leurs interactions
 - Les détecteurs de physique des particules
- 2) Les accélérateurs pour la physique des particules
- 3) Collisionneurs ppbar versus collisionneurs e+e- : SPS versus LEP
- 4) 'Overview' de deux installations/projets 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, ...

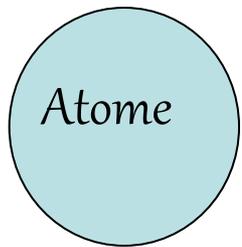
Introduction :
Les particules élémentaires
et
leurs interactions

La complexité est reductible

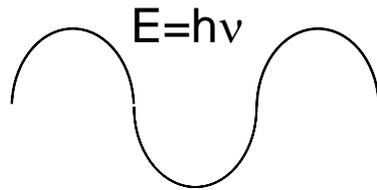


+ le photon ! La 'particule de lumière

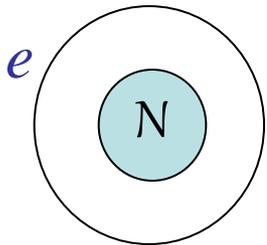
Les particules : les constituants élémentaires de la matière



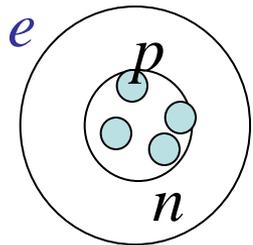
Atome



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



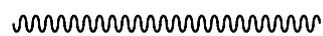
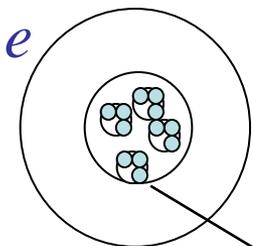
Taille $\sim 1fm=10^{-15}m$



nucléons



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



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

quarks *up* et *down*

La matière ordinaire

1	IA	H	IIA																0	He	
2		Li	Be																		Ne
3		Na	Mg																		Ar
4		K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn								Kr
5		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd								Xe
6		Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg								Rn
7		Fr	Ra	+Ac	Rf	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	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

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	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ- Neutrino	ν_τ τ- Neutrino
	e electron	μ muon	τ 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 !

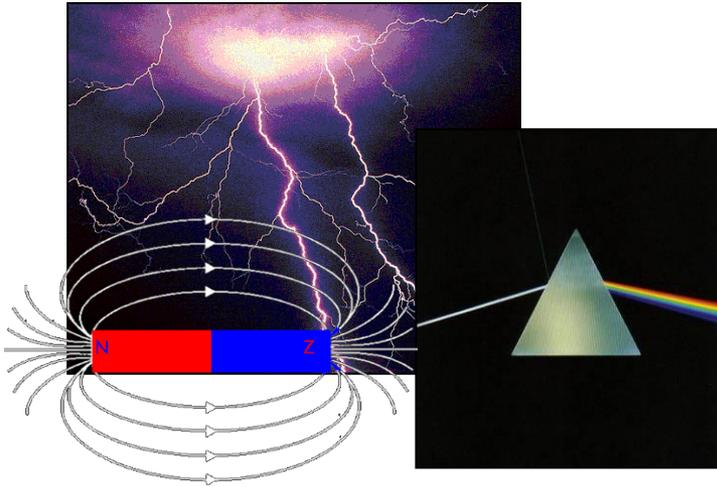
- **Hadrons** : particules constituées de quarks
- **Baryons** : 3 quarks (ex: neutron, proton)
- **Mésons** : 2 quarks (ex. les pions, mésons B)

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

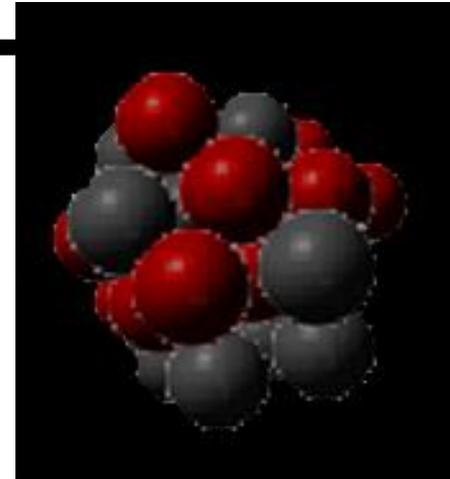


Ça reste une très bonne question.....

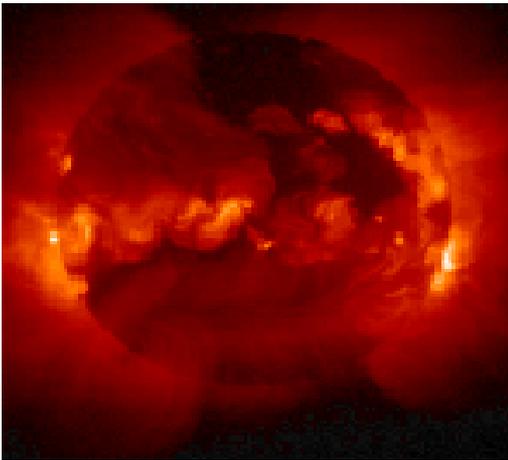
Les quatre forces fondamentales



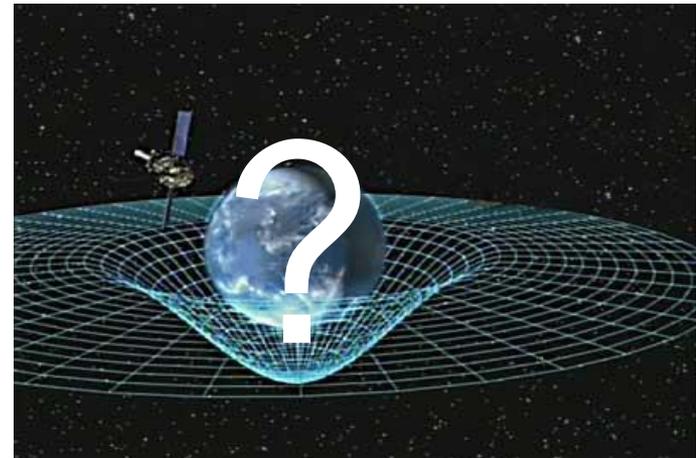
electromagnetique



Force forte

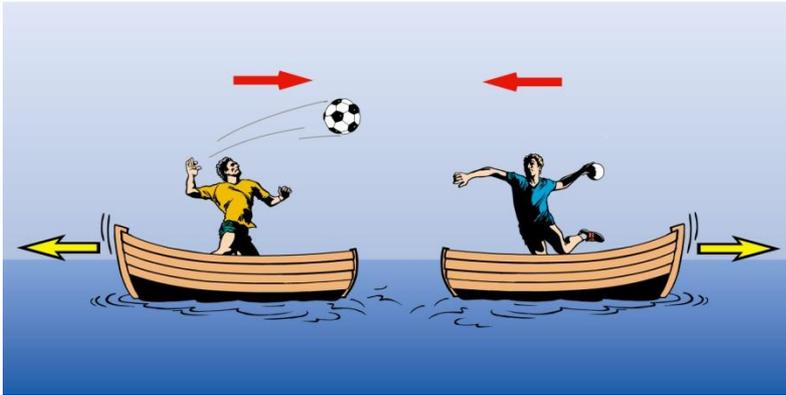


Force faible



Gravite

Les forces vues par les physiciens des particules..



Particule A

Messenger de l'interaction

Particule B

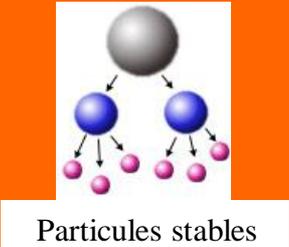
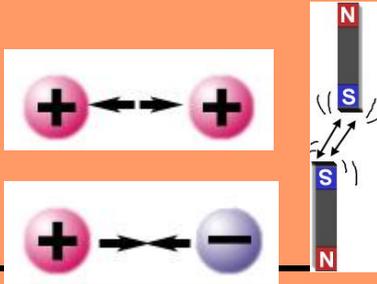
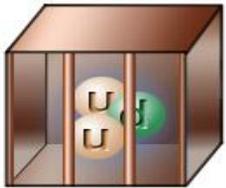
Le messenger de l'interaction est une particule.

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 (γ)	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:

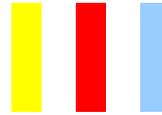
Les particules élémentaires+leurs interactions

Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ- Neutrino	ν_τ τ- Neutrino
	e electron	μ muon	τ 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 γ

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



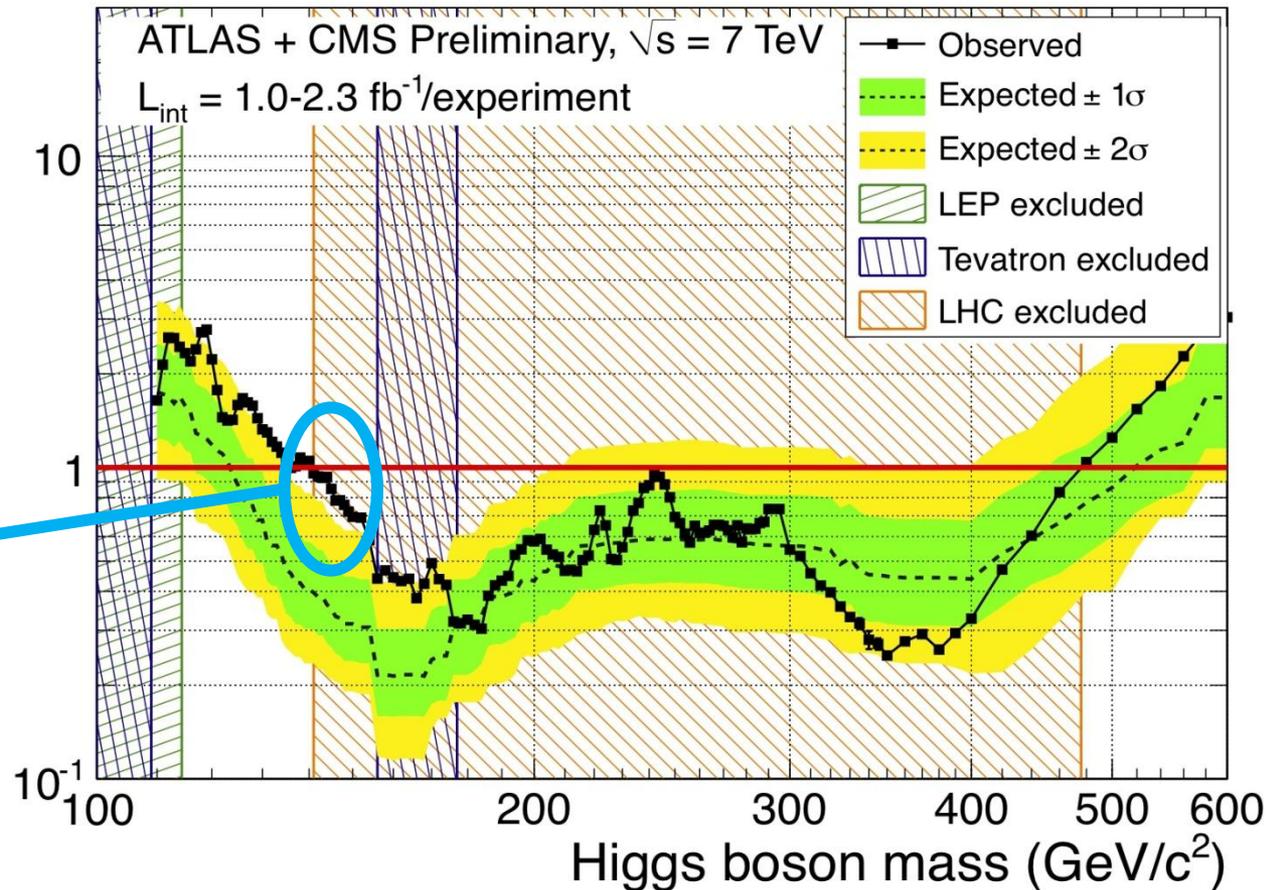
Détermine les masses des particules de
matière et des particules d'interaction

Le Boson de Higgs : où en est-on

Analyses de données très complexes

Zone où 'on l'attend'

95% CL limit on σ/σ_{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

Bosons vecteurs des interactions

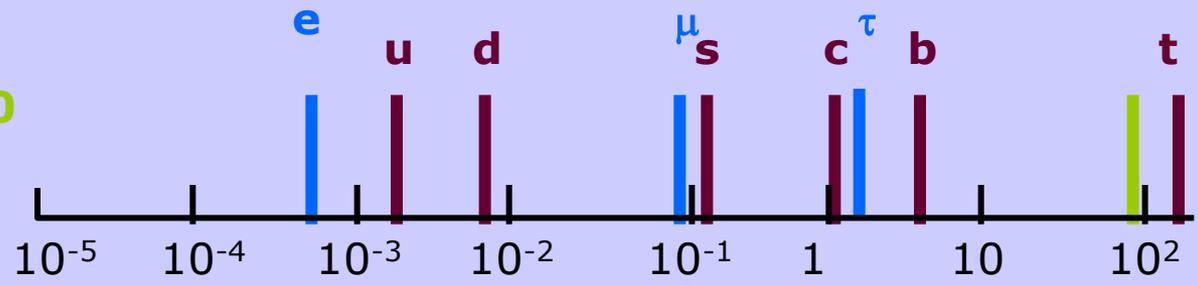
W,Z

$m_\nu = ?$

$m_\gamma = 0$

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

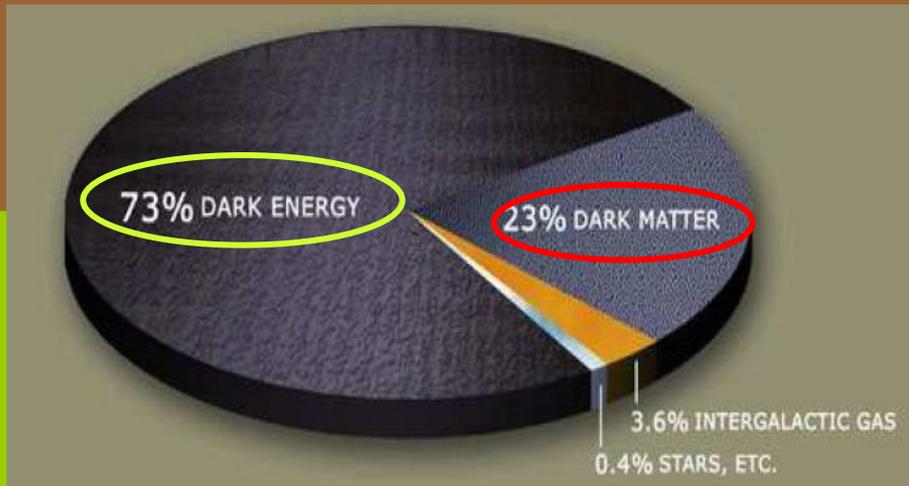
quarks



Composition de notre univers ?

Matière autre que celle du Modèle Standard

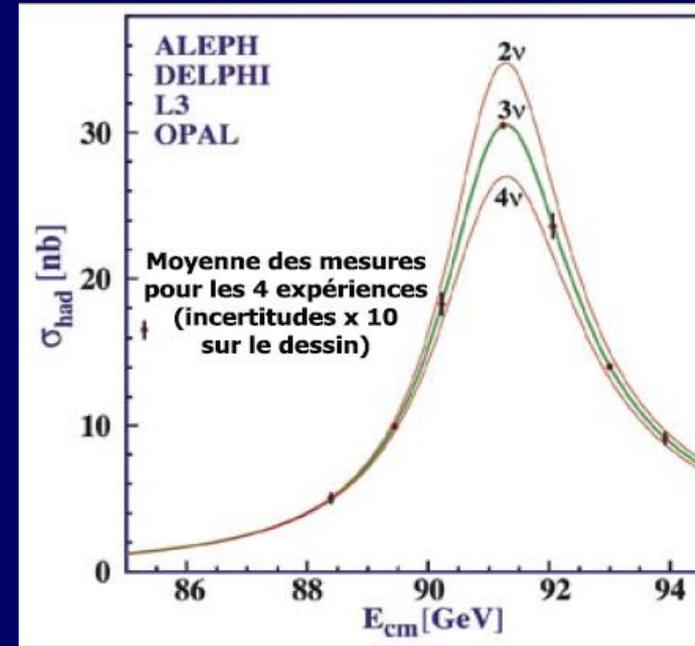
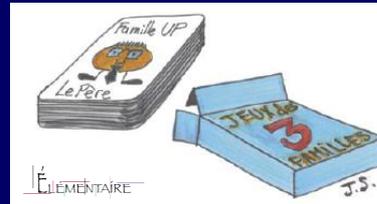
L'expansion de l'univers est plus rapide qu'attendu (Big Bang + relativité générale) \Rightarrow quelque chose d'autre doit entrer en jeu : "énergie noire"



Quelques grandes questions 2/4 ...

Pourquoi trois familles ?

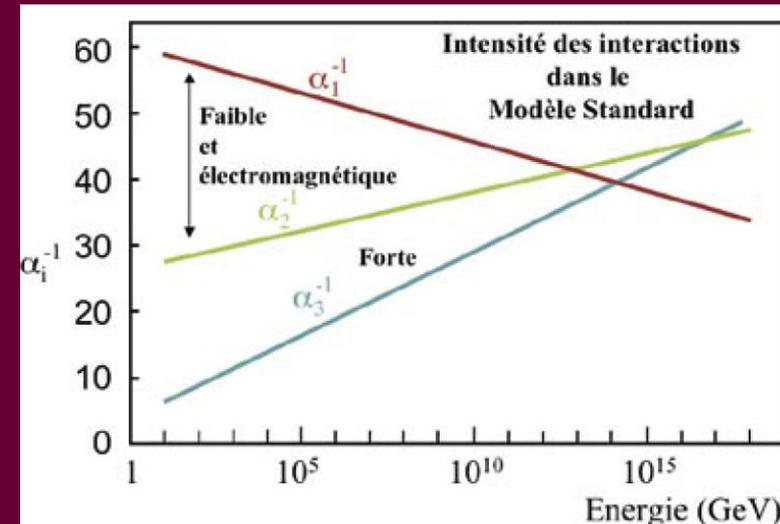
A présent on n'a observé que trois familles...



Pourquoi quatre interactions ?

Unification ?

(cf Maxwell pour l'électricité et le magnétisme)



Quelques grandes questions 3/4 ...

Juste

matière

antimatière

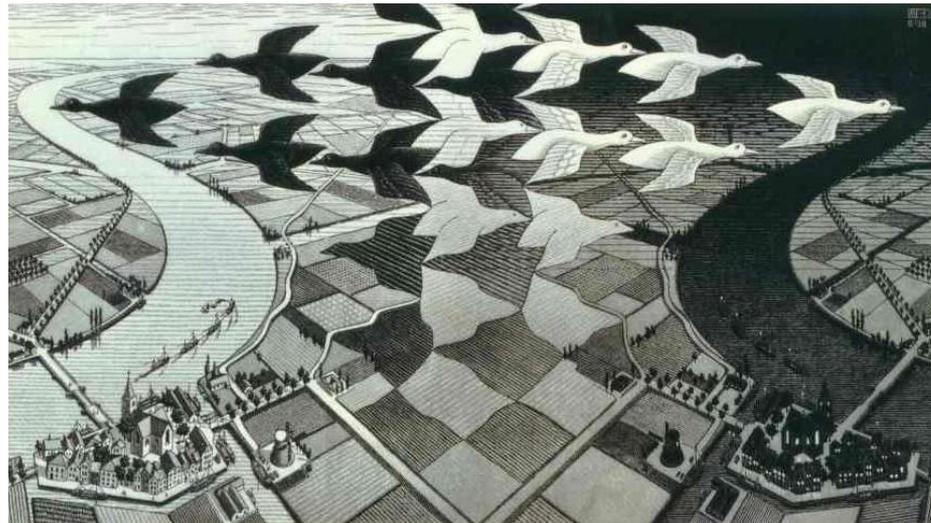
Univers actuel :

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 ?



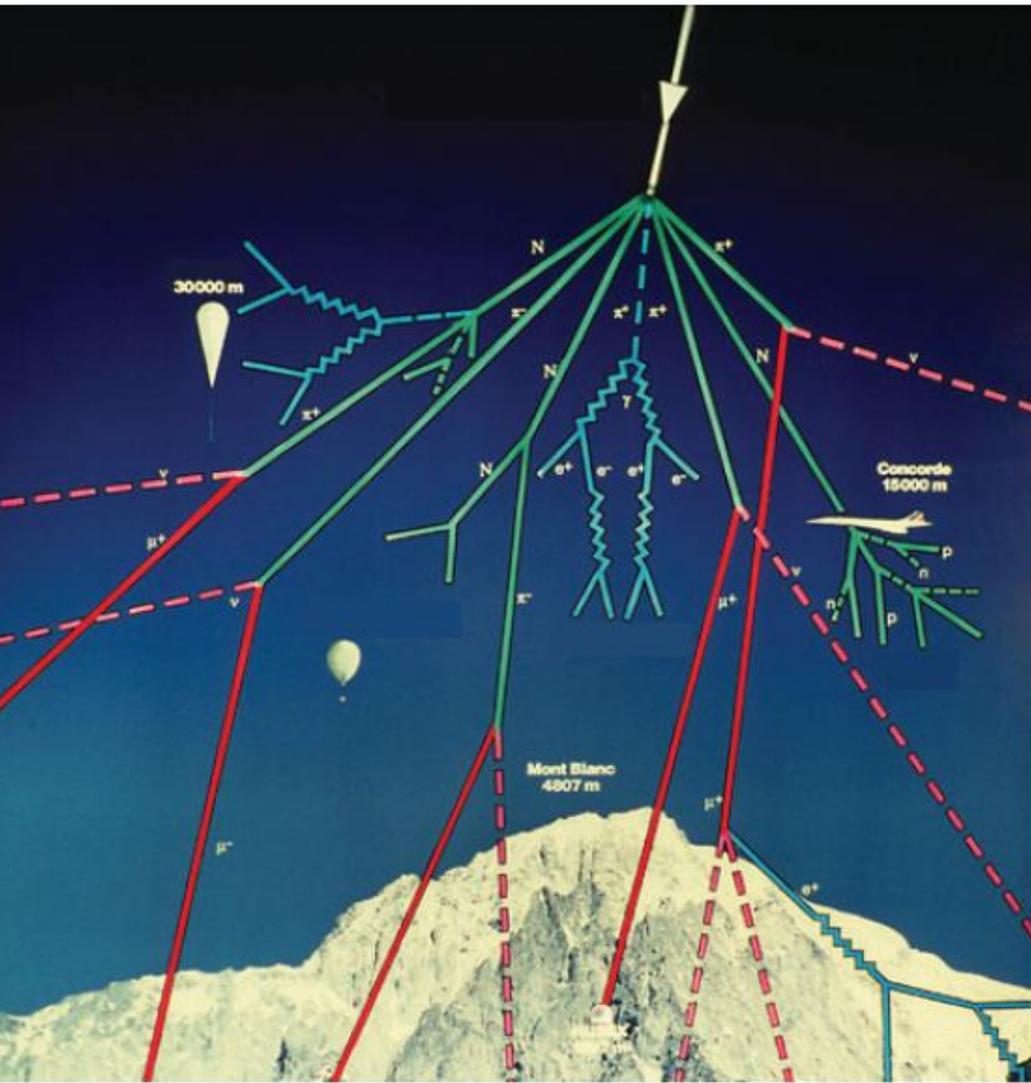
Quelques grandes questions **4/4** ...

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

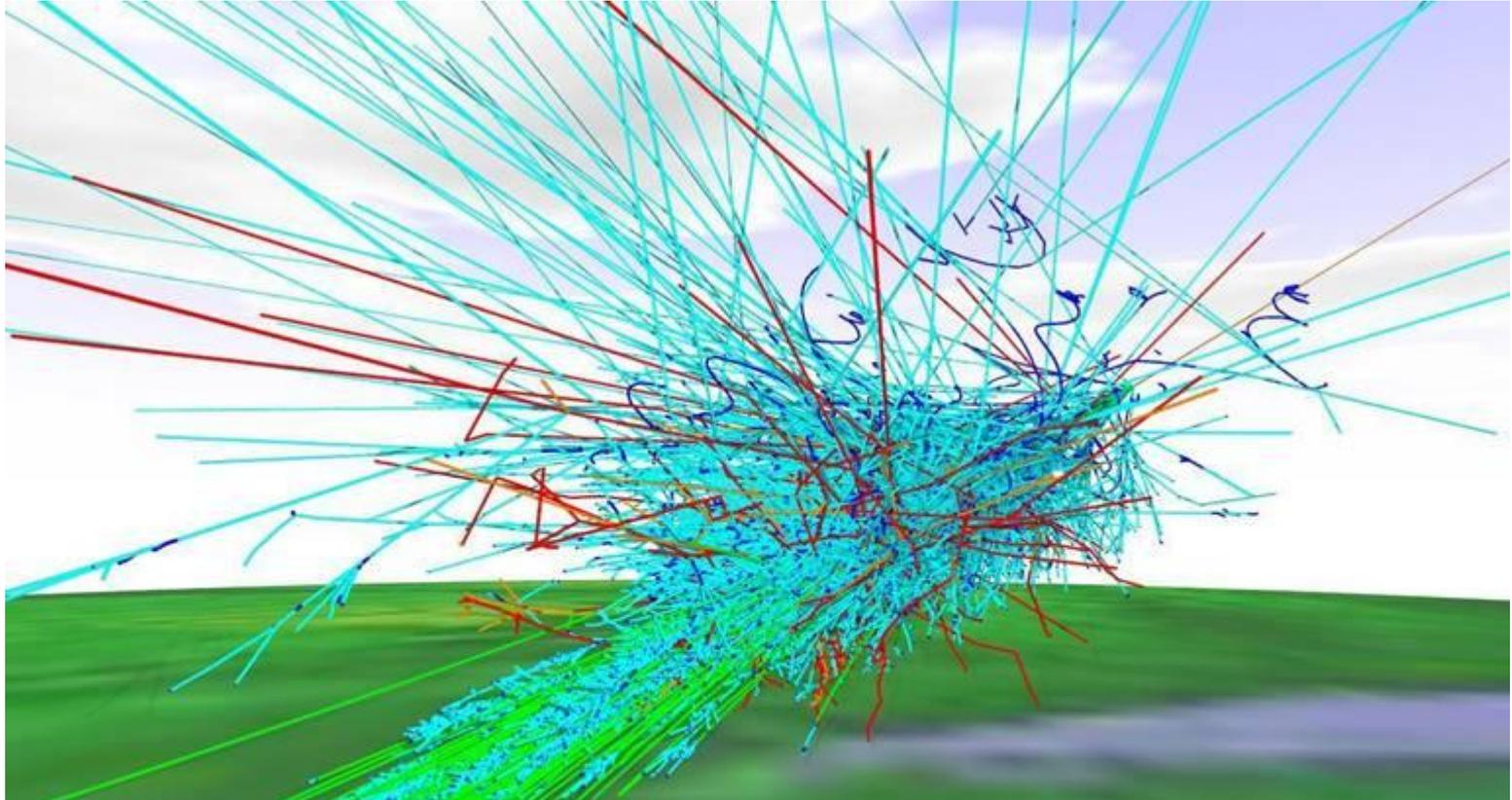
- Jusqu'après la seconde guerre mondiale, les rayons cosmiques vont être analysés (ex. Chambres à brouillard du pic du midi)

- 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**



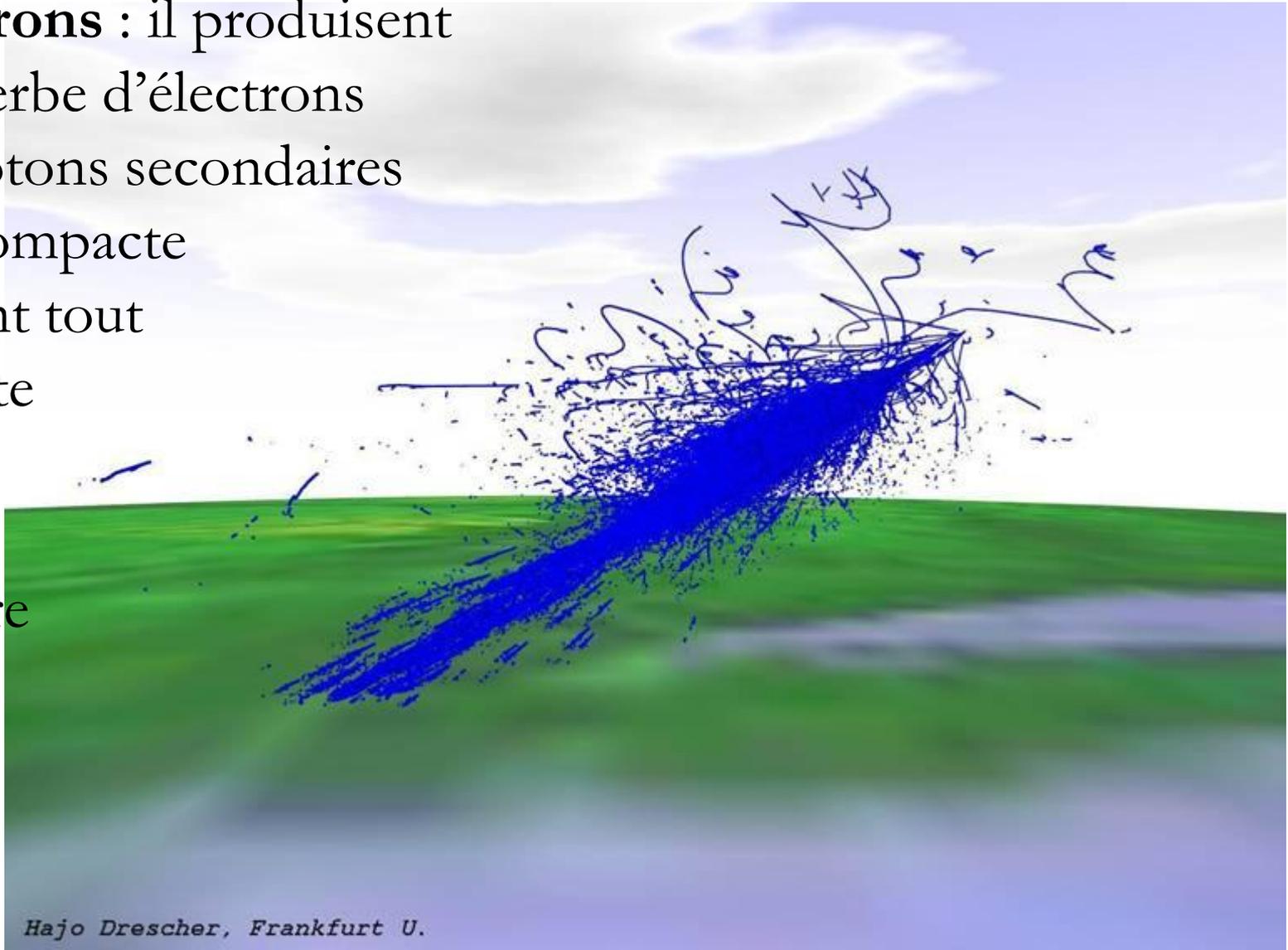
Ex : simulation d'un rayon cosmique de très haute énergie



**Des noyaux de hautes
énergies produisent des
de particules
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

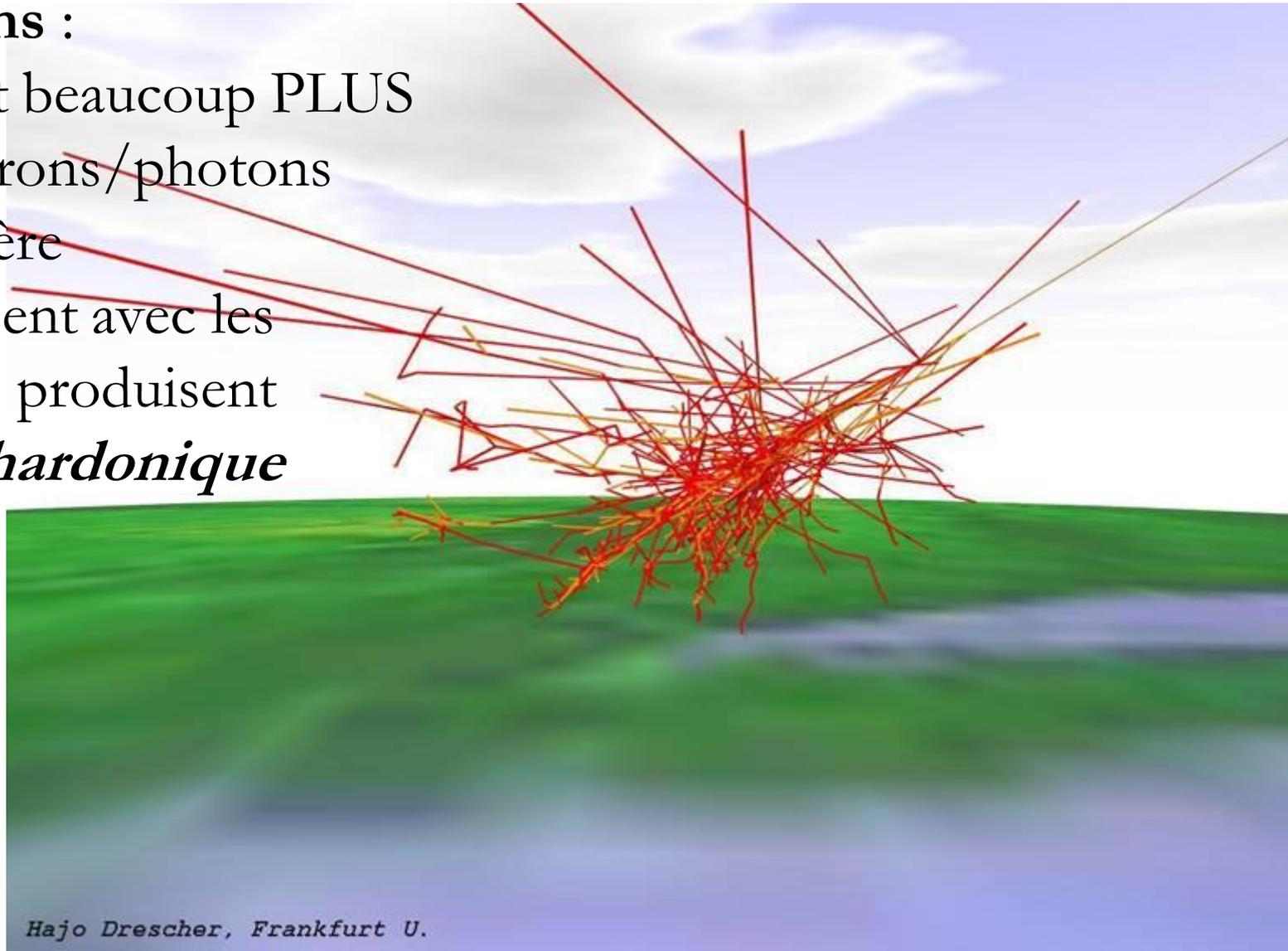


Simulation d'un hadron

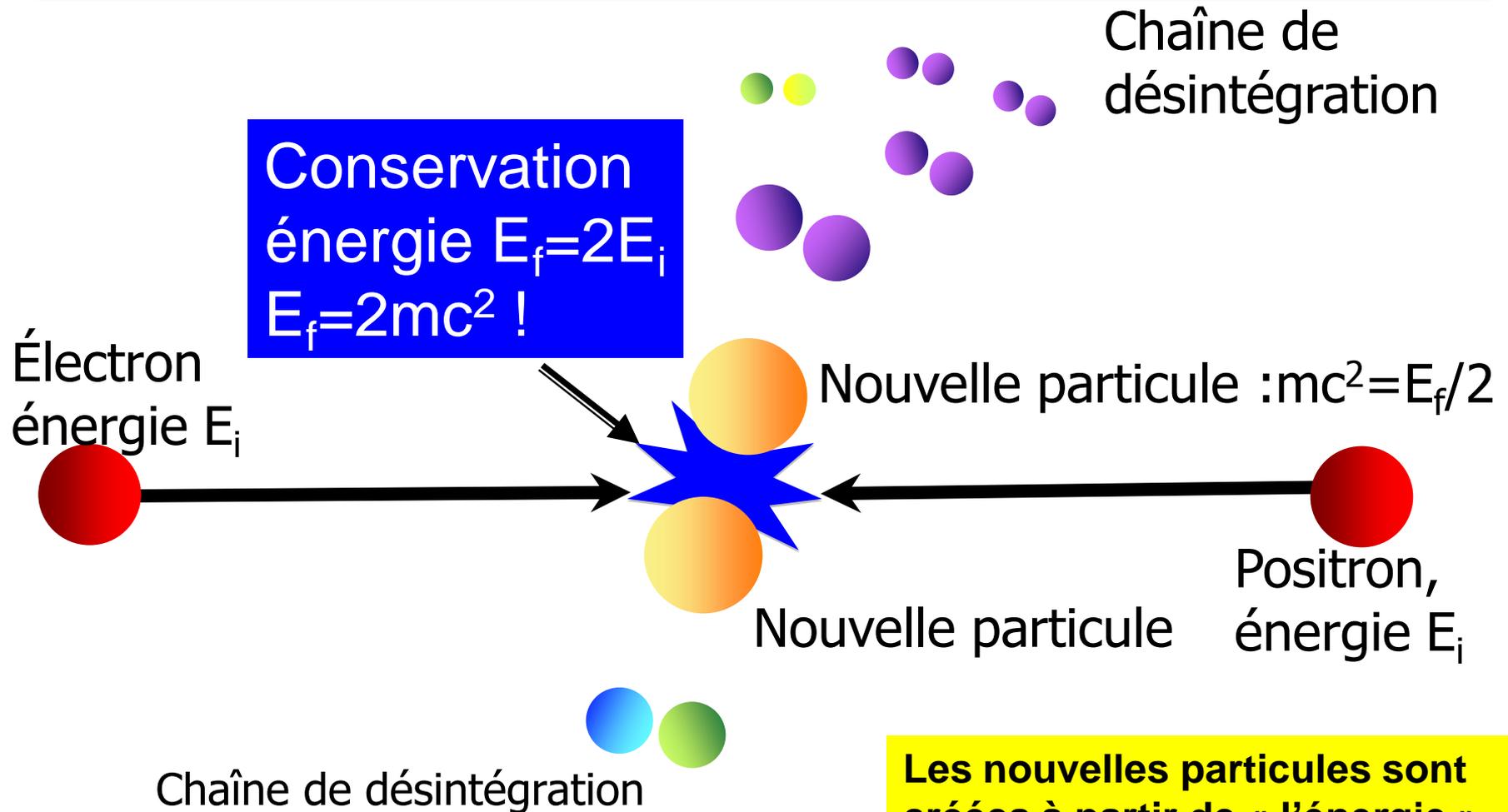
Les Hadrons :

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

Ils interagissent avec les
noyaux et ils produisent
une gerbe hadronique



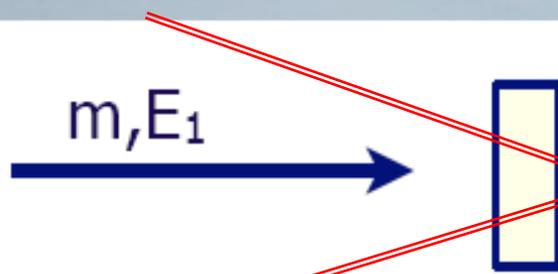
Au lieu d'attendre qu'elles 'pleuvent' du ciel : Production de particules avec les accélérateurs



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

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

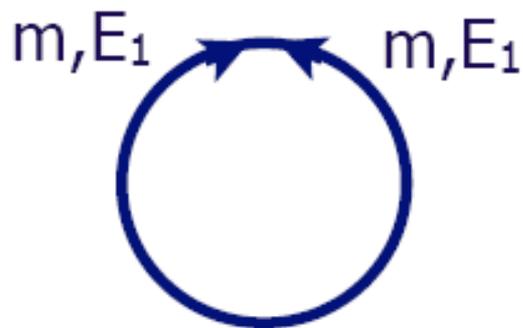
p de 1 TeV $\sqrt{s} = 43.3$ GeV



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

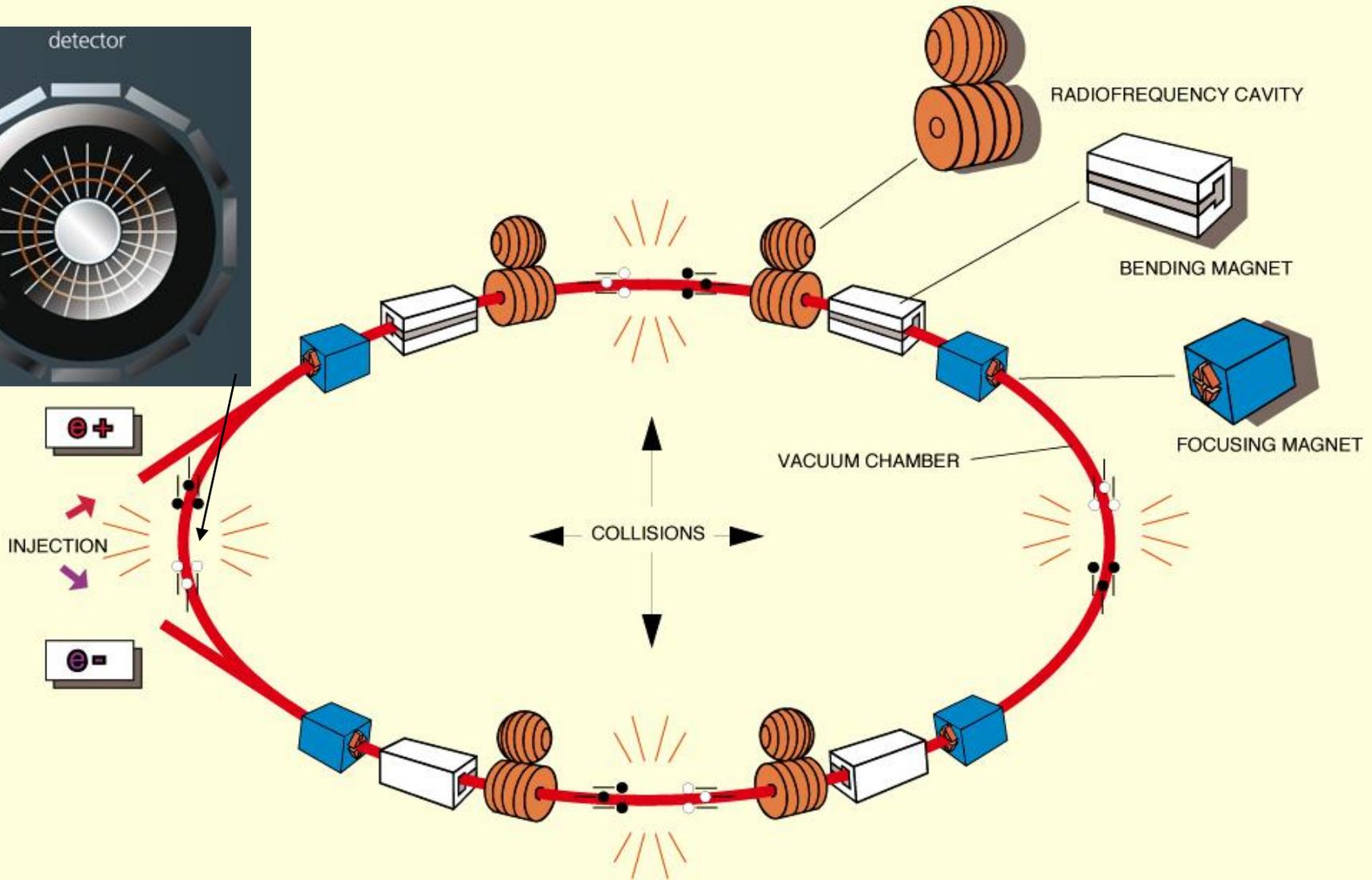
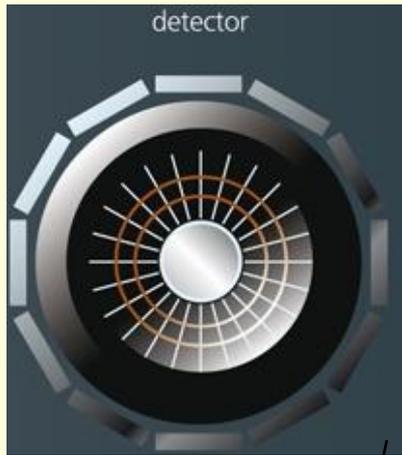
$$\sqrt{s} = E_1 + E_2 \quad (p \text{ de } 1 \text{ TeV } \sqrt{s} = 2 \text{ TeV})$$

croisements répétitifs

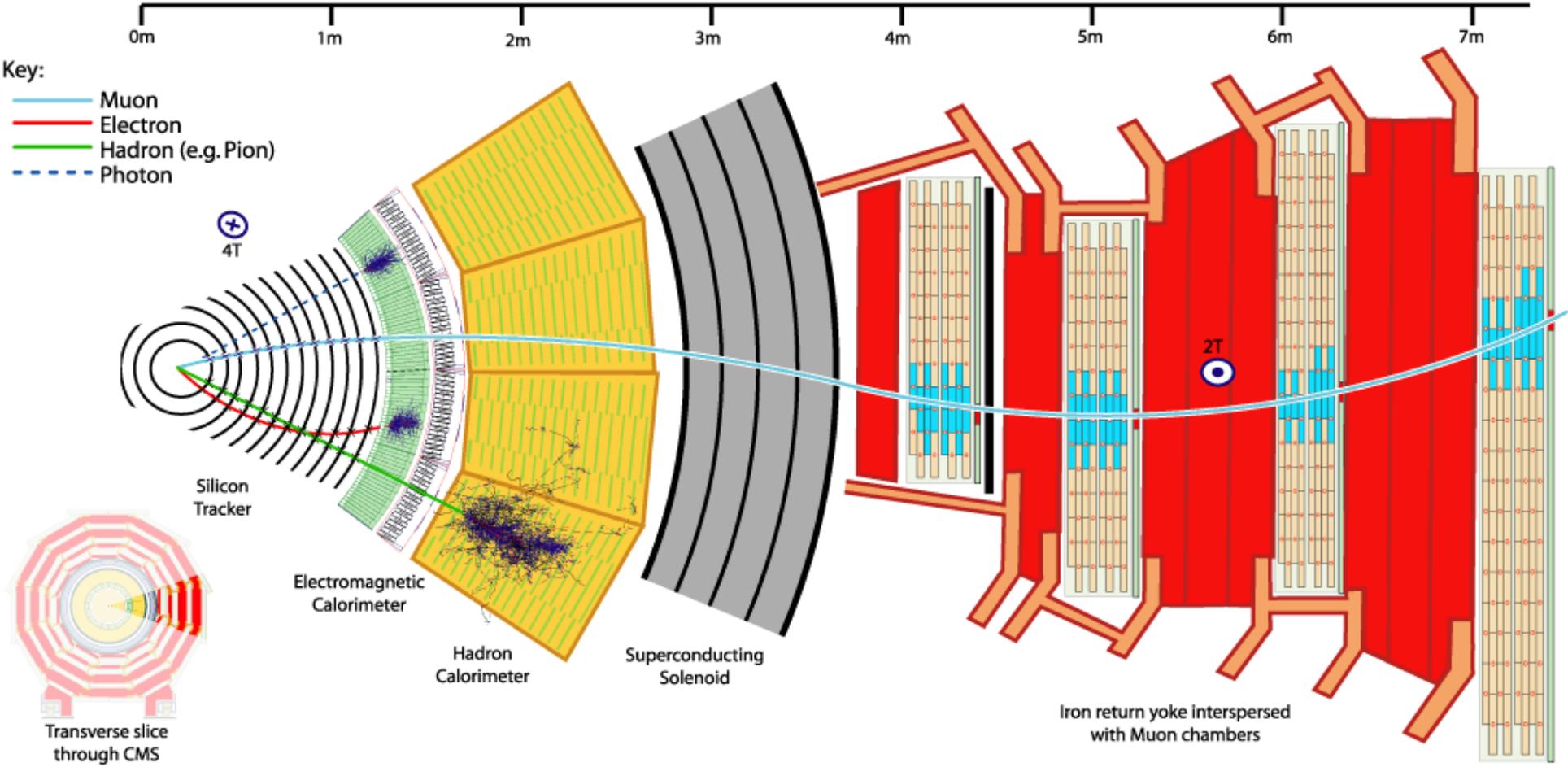
Rayonnement synchrotron

Les détecteurs en physique des particules

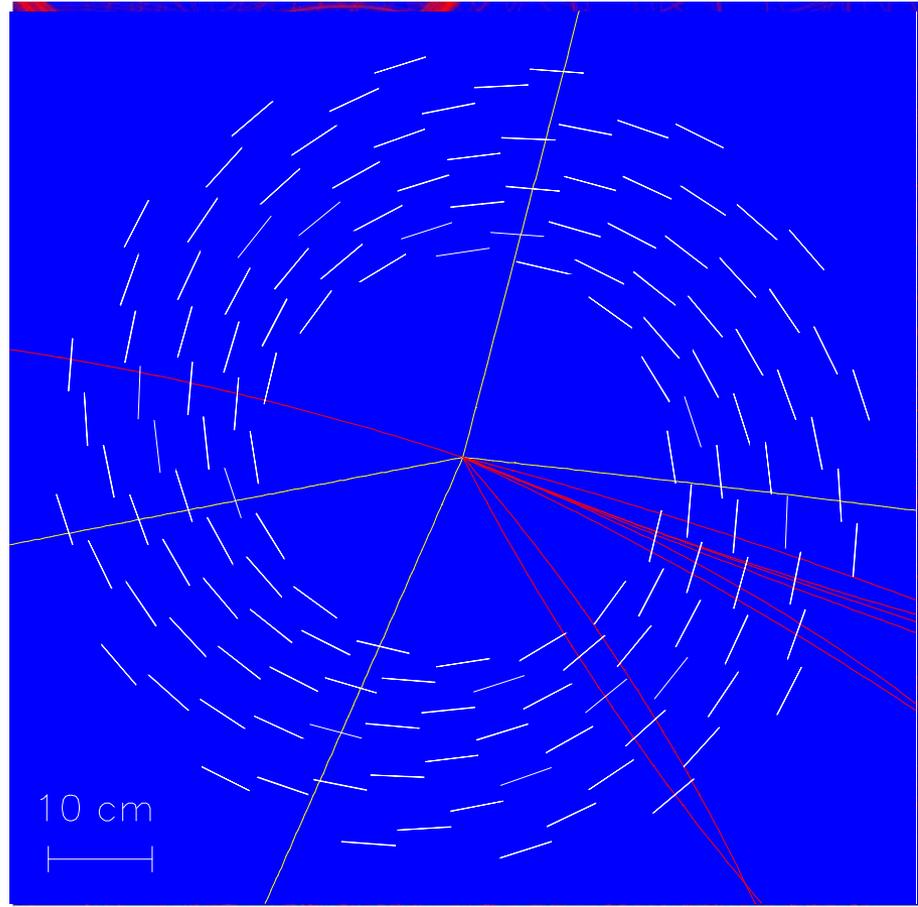
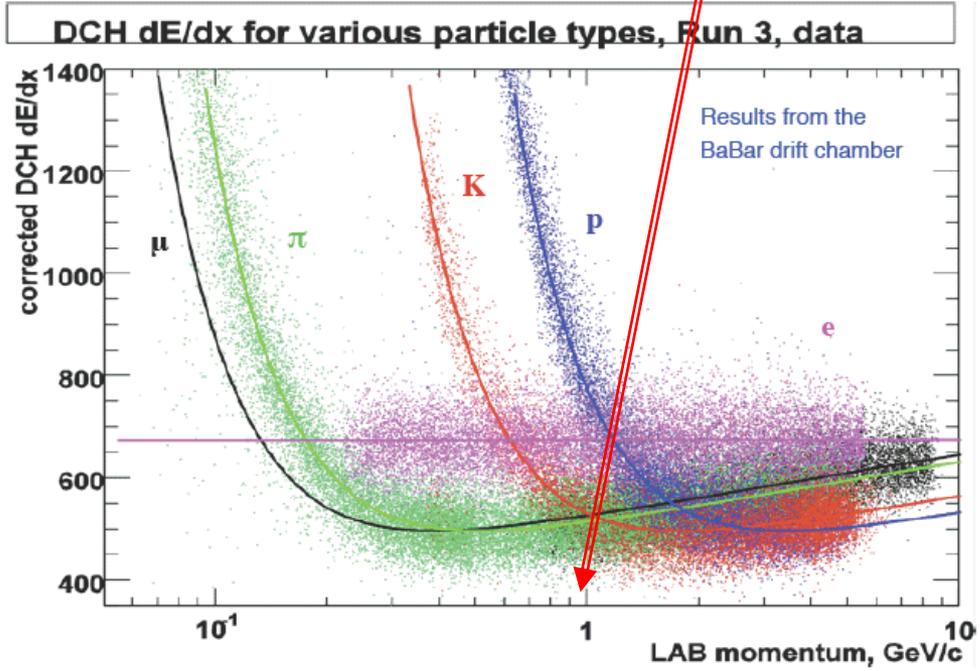
Accélérateur circulaire / synchrotron



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)

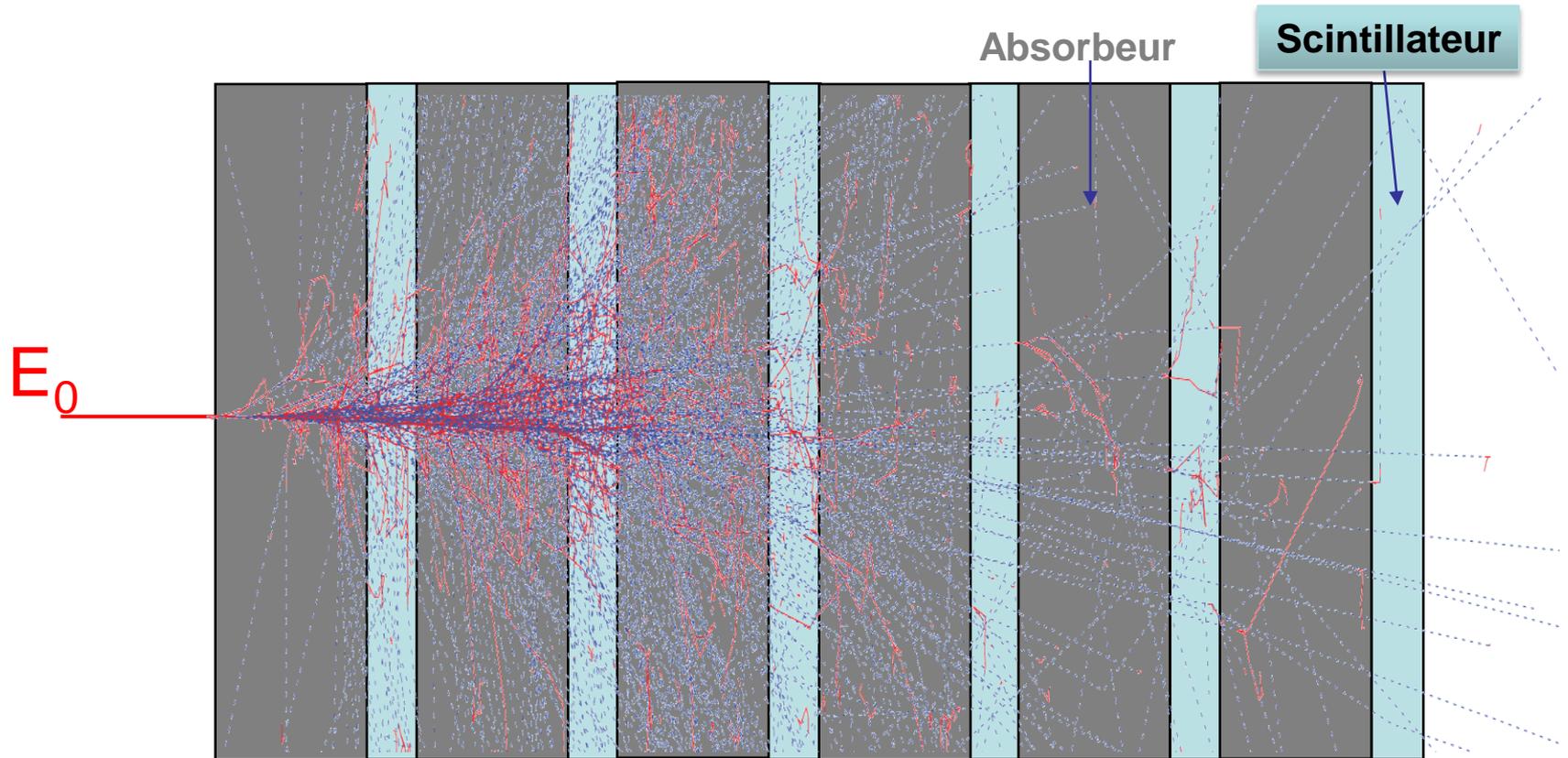


Grâce au champ magnétique on mesure les impulsions des traces chargées

Ex : événement simulation
Higgs → ZZ → 4 muons

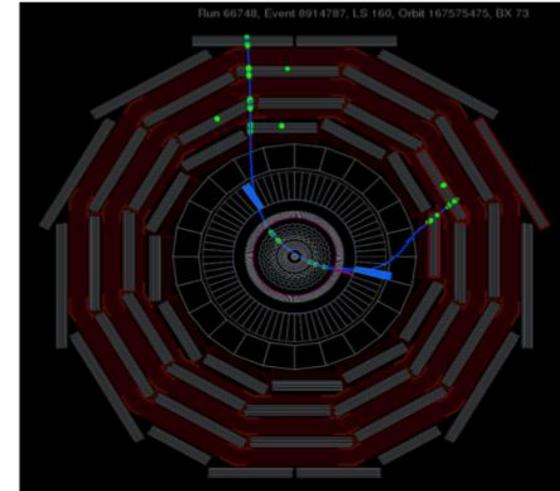
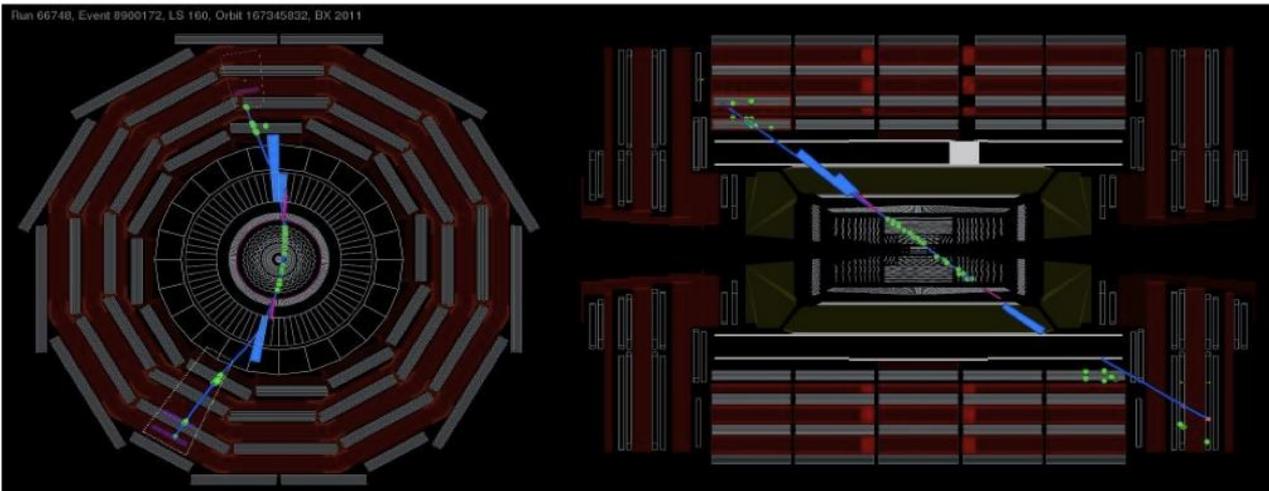
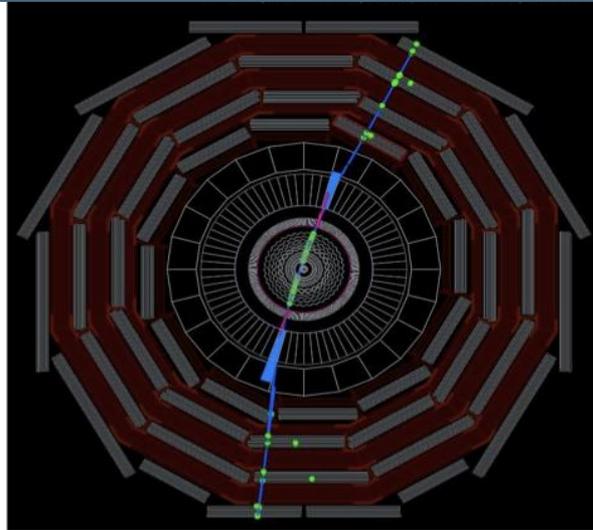
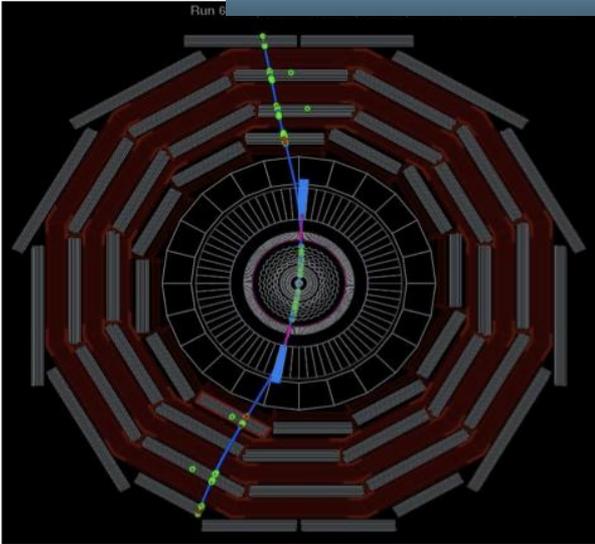
Find 4 straight tracks.

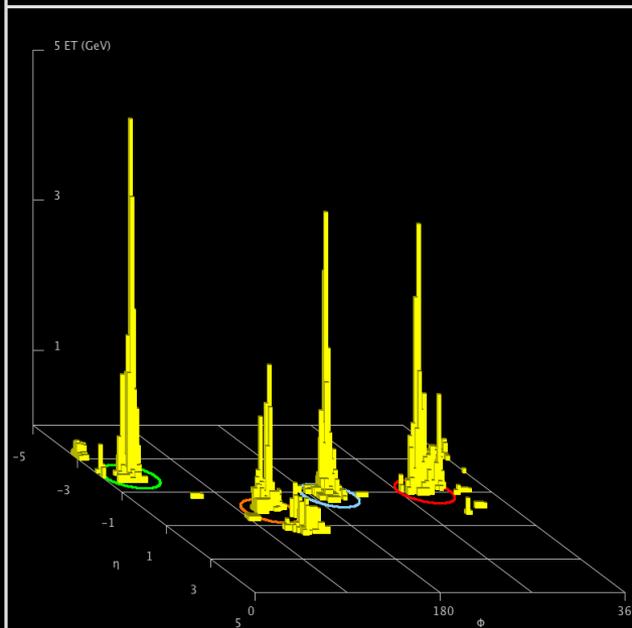
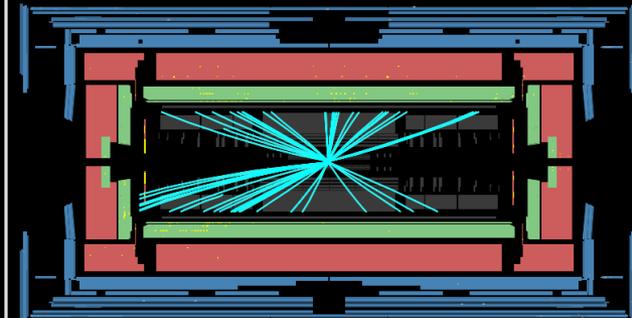
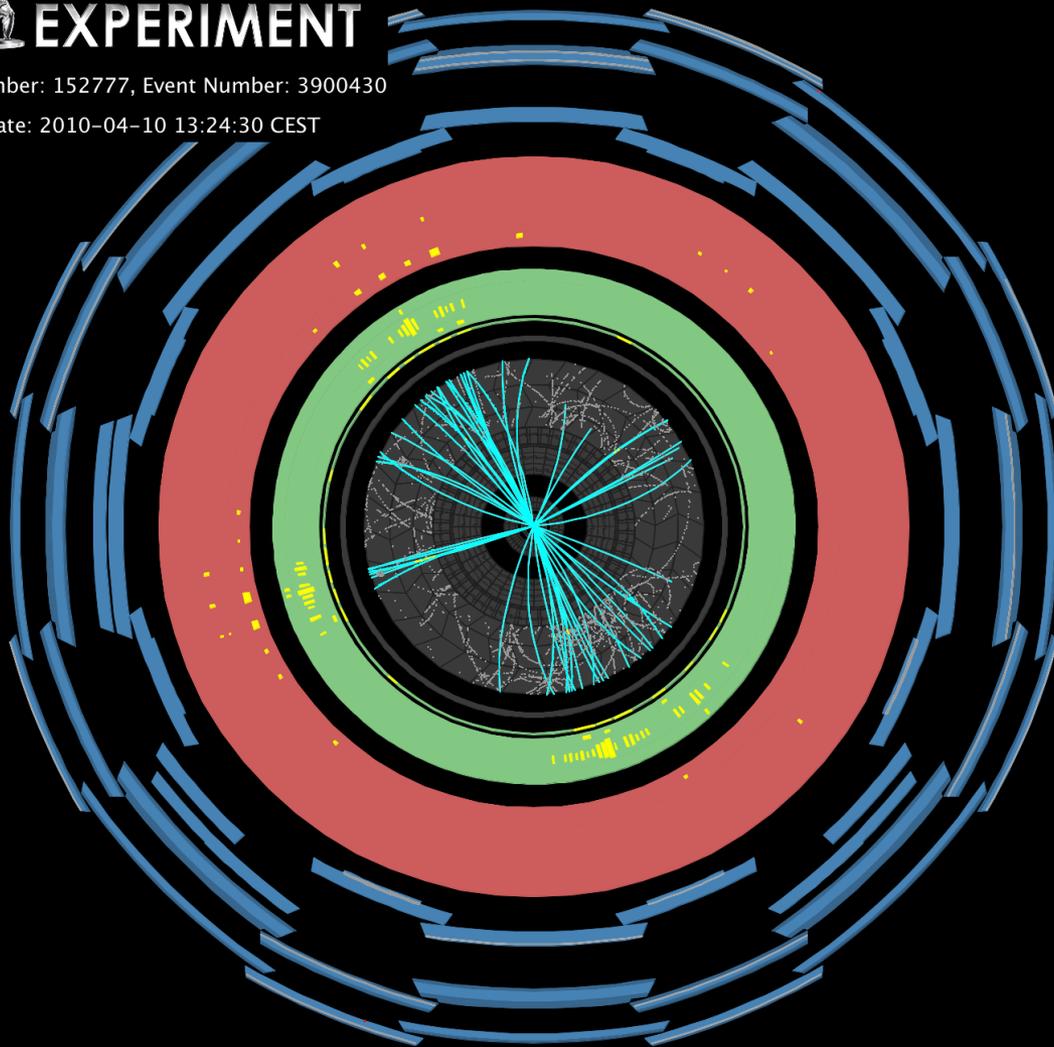
Calorimetre pour la mesure de l'énergie et l'identification des particules à haute énergie



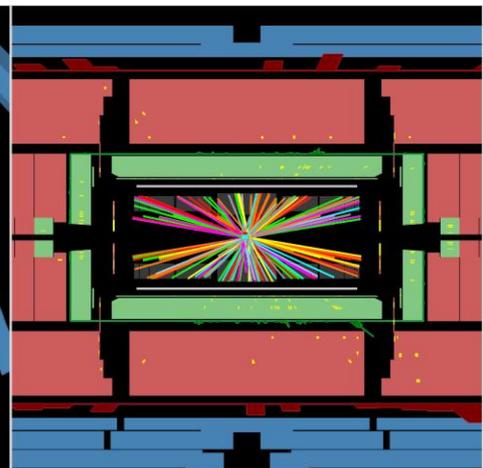
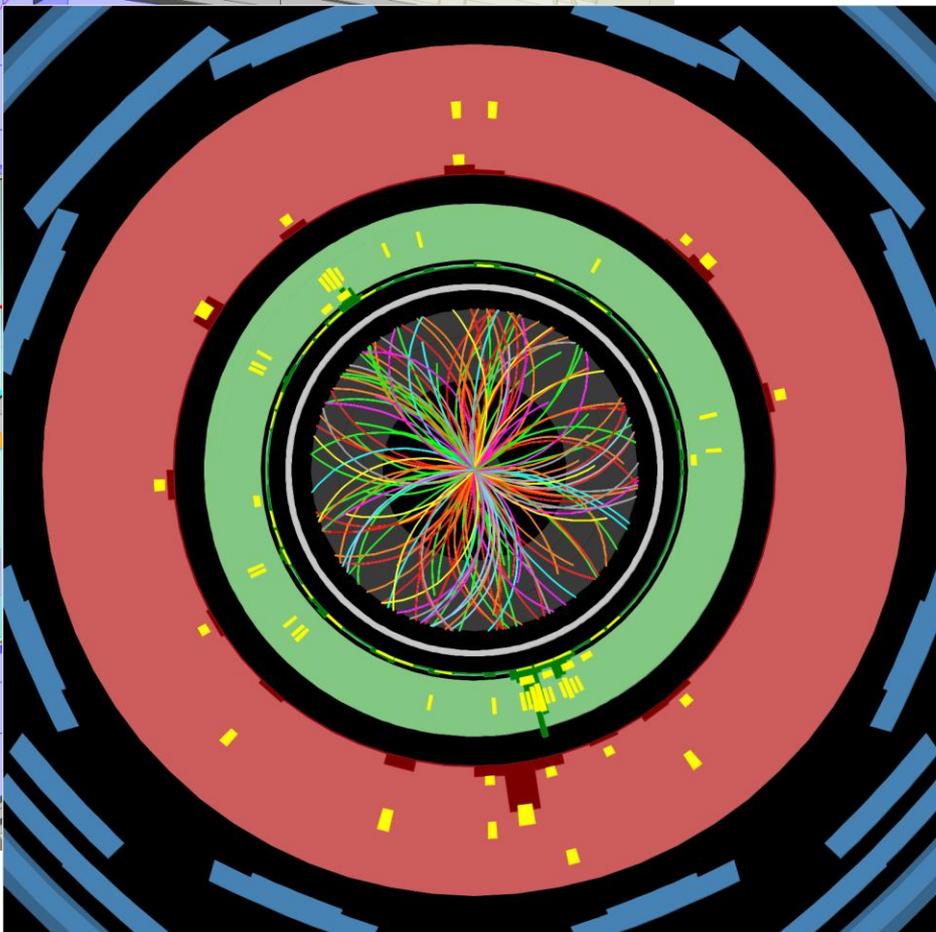
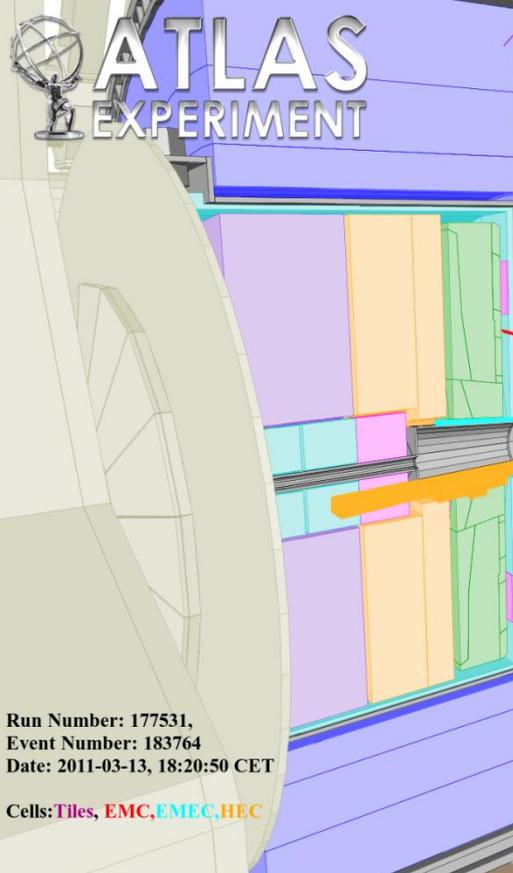
Les électrons et photons sont arrêtés 'tout de suite'
Les hadrons peuvent pénétrer beaucoup plus loin avant d'interagir

exemple : μ cosmiques dans CMS

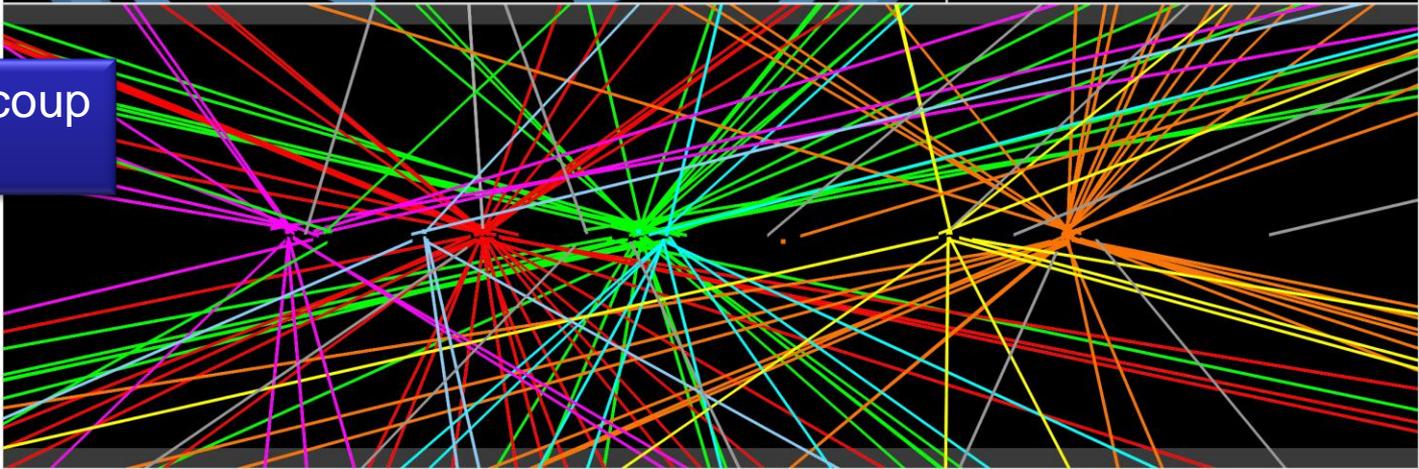




Événement avec 4 jets



Événement avec beaucoup de traces chargées



Collisions plomb-plomb dans ATLAS

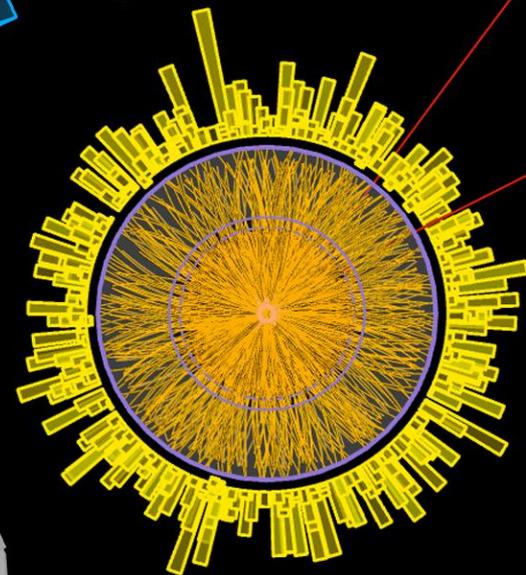
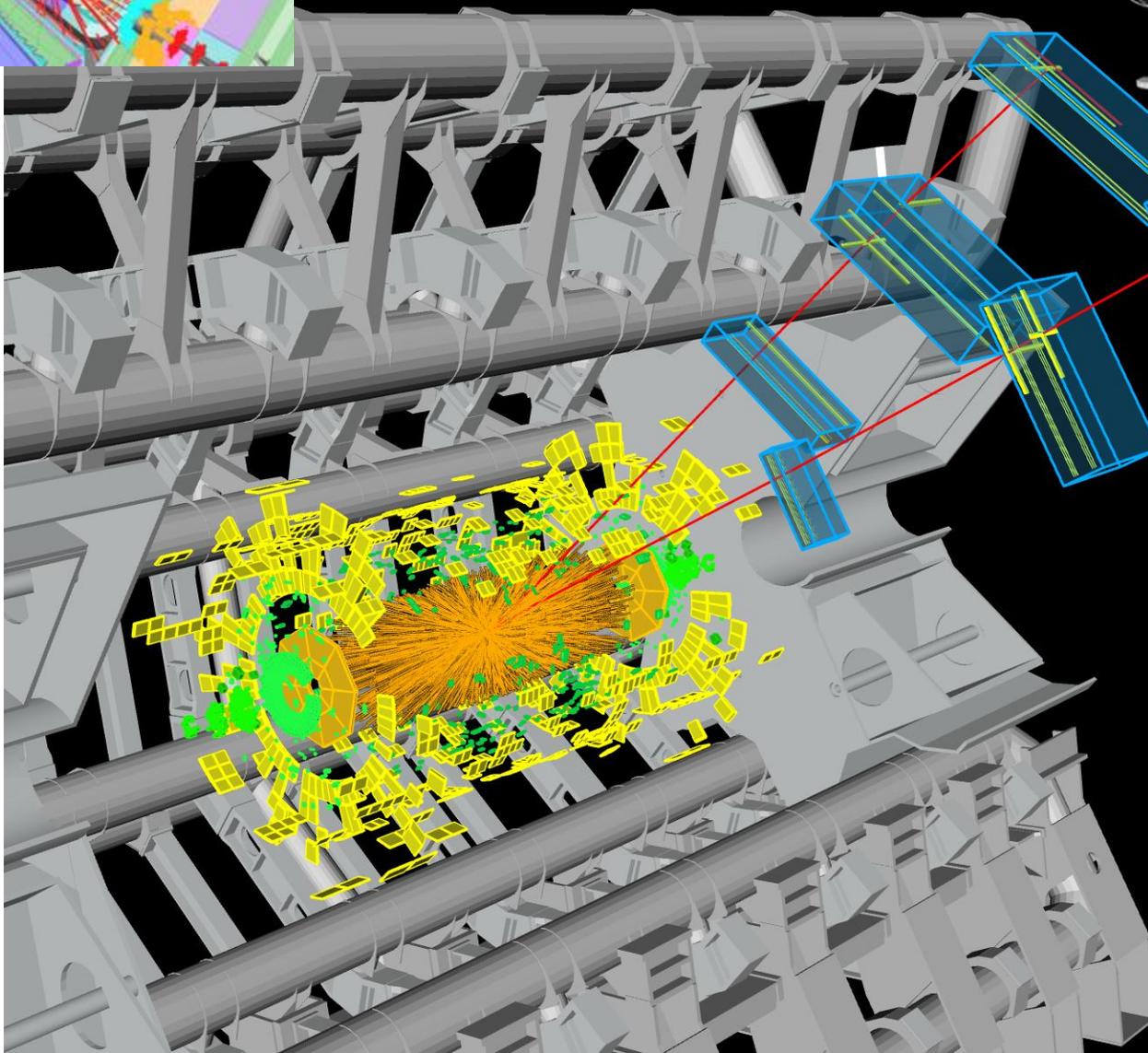
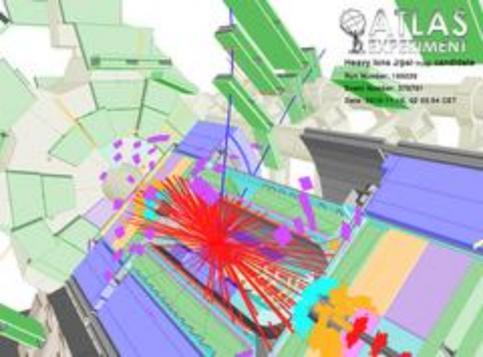
$J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$

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



ATLAS

EXPERIMENT



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

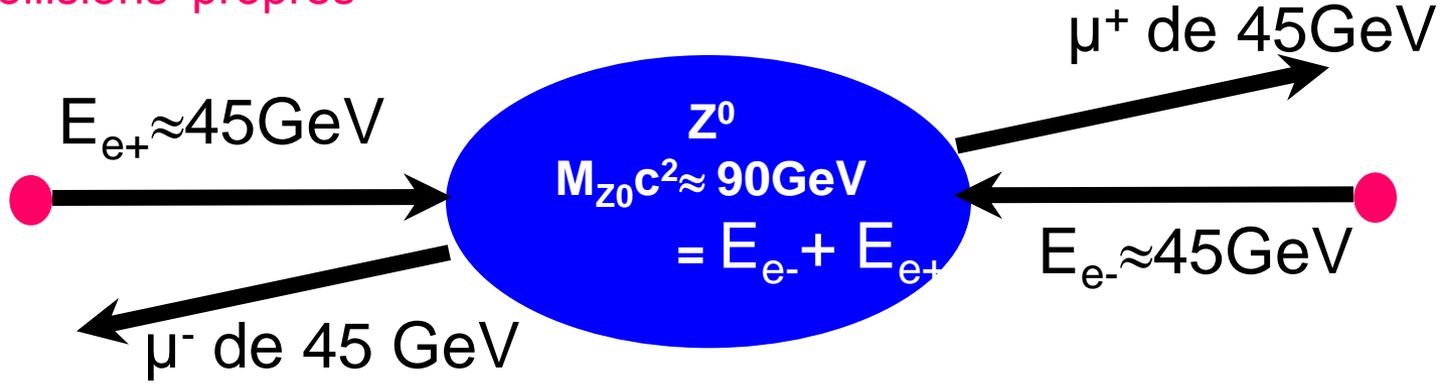
Deux types de collisionneurs :

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

Collisionneur e⁺e⁻ : ex. la production du boson Z⁰ au LEP

e⁺e⁻ sont 2 particules élémentaires

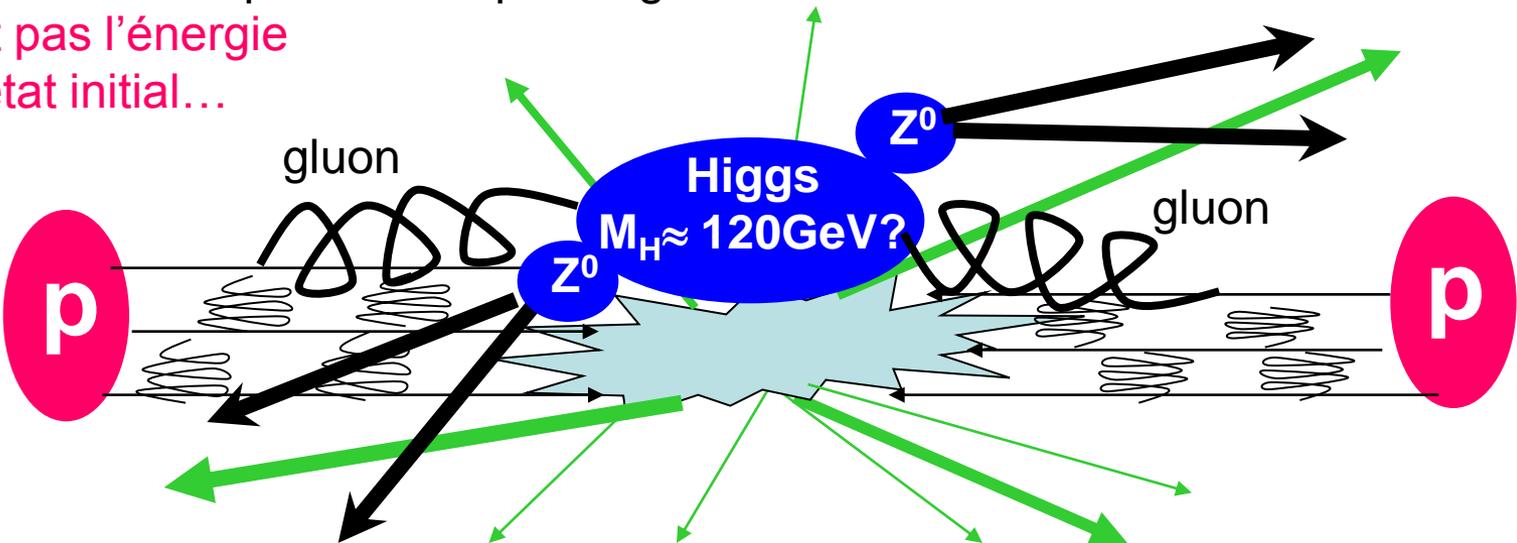
- On connaît bien l'énergie et la nature de l'état initial
- Collisions 'propres'



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

P, Pbar sont 2 particules composées de quarks/gluons

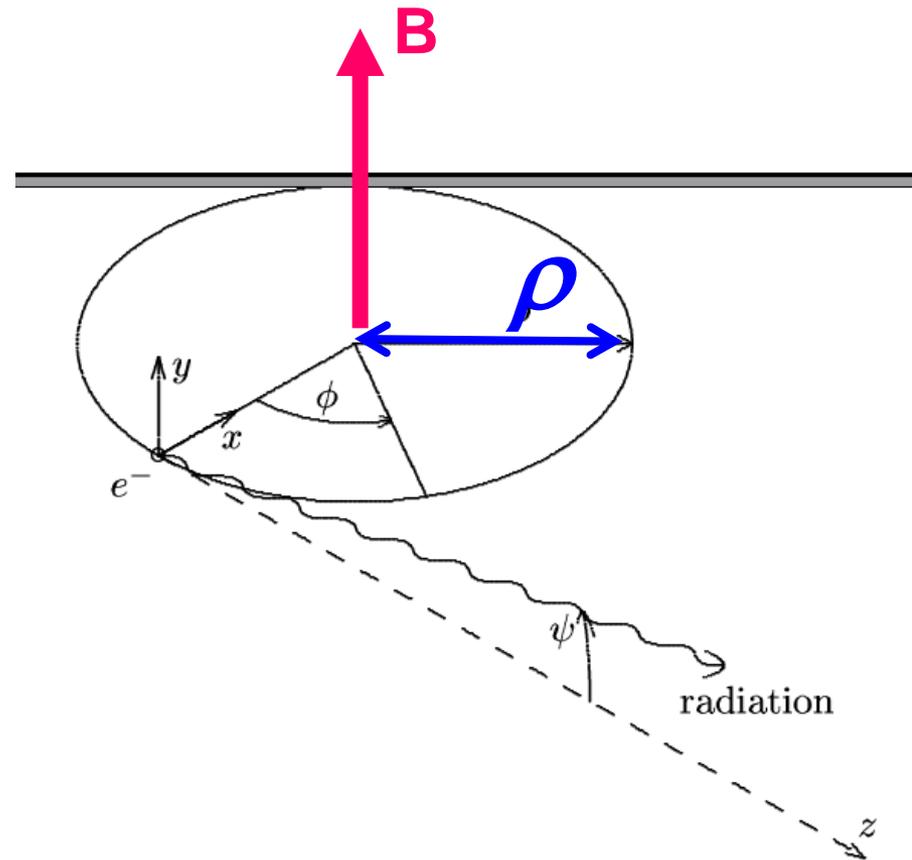
- On ne connaît pas l'énergie et la nature de l'état initial...



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 ?**

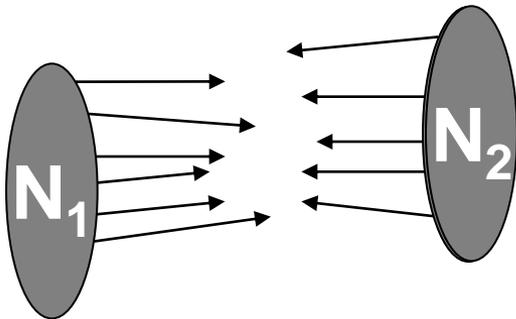
Pour voir des phénomènes rares il faut :

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

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

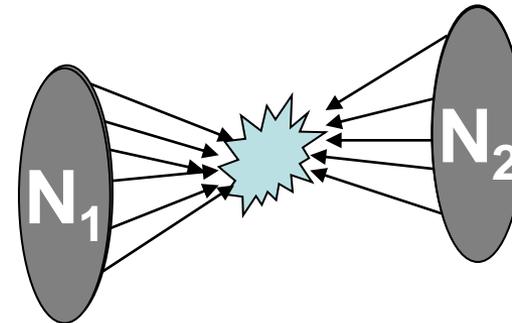
Mauvaise focalisation...

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

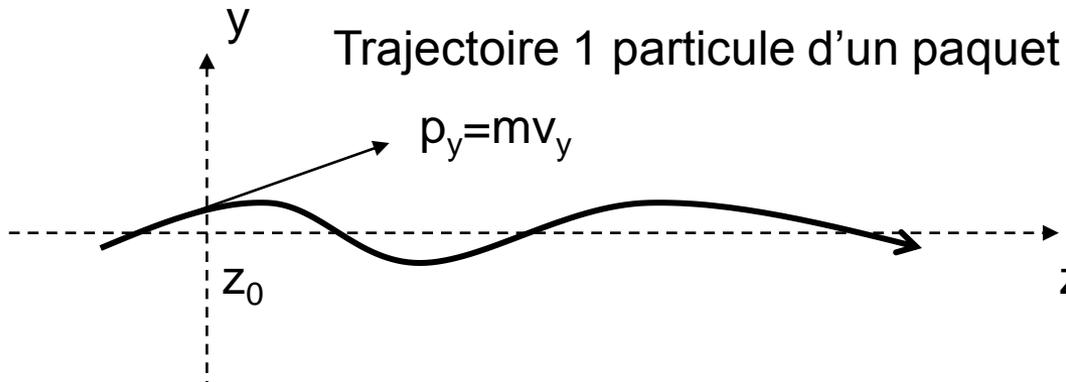
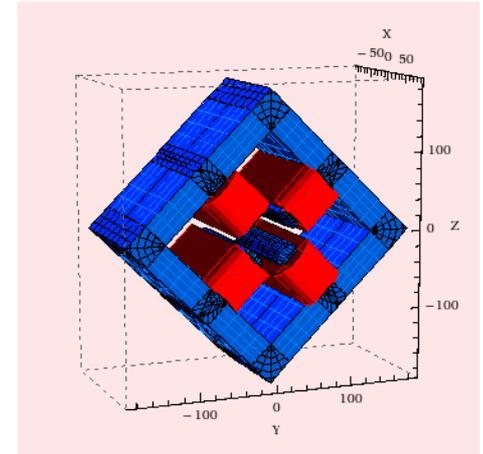
Mais un faisceau de particules chargées ne se focalise pas comme un faisceau lumineux ...

Il faut des champs magnétiques quadripolaires (équivalent des lentilles)

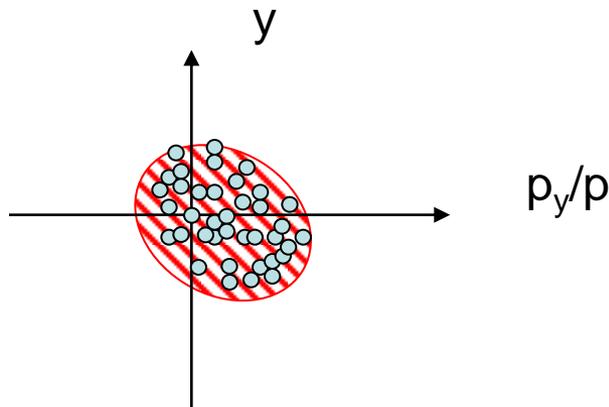
ET il faut 'pouvoir' focaliser les faisceaux :

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=

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

β_y est le facteur focalisant des aimants

Donc : pour une fonction β_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 !!!

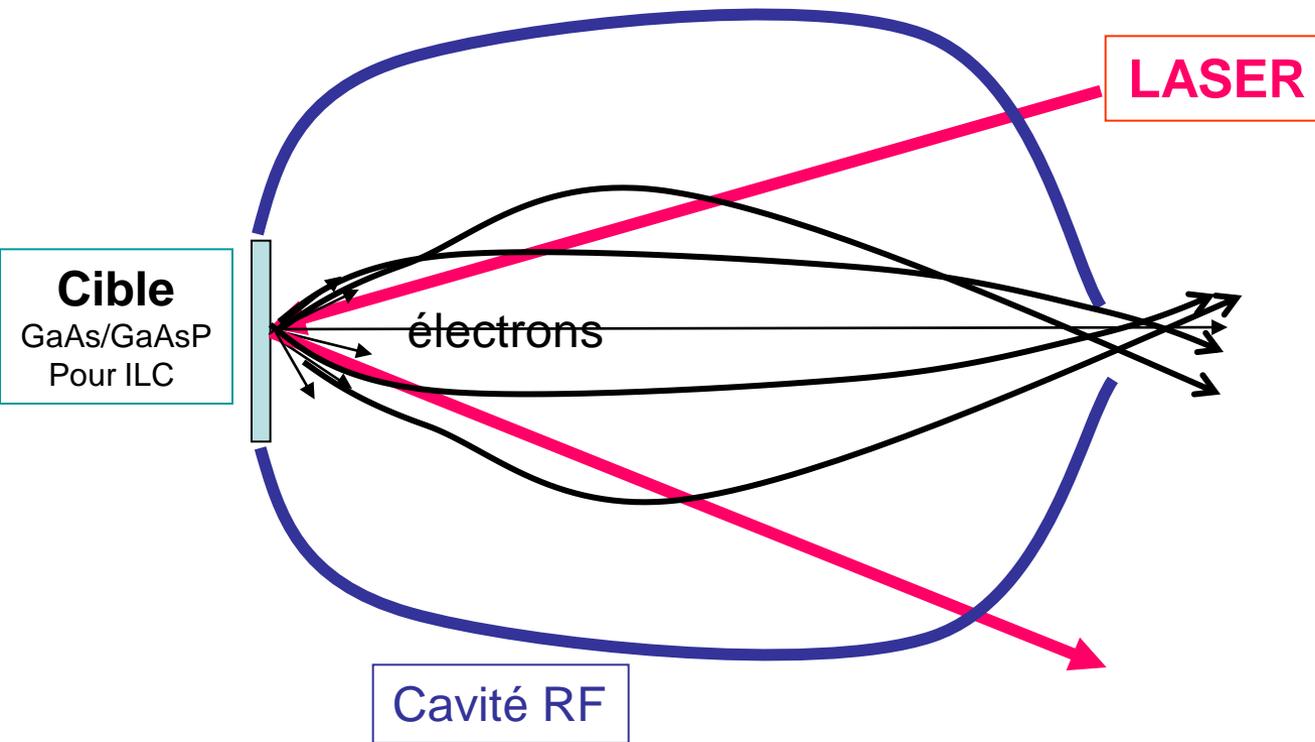
Note : une fois créée, il faut aussi conserver la bonne émittance ...

Comment faire des faisceaux d'électrons de faibles émitances?

c.f. cours H. Monard

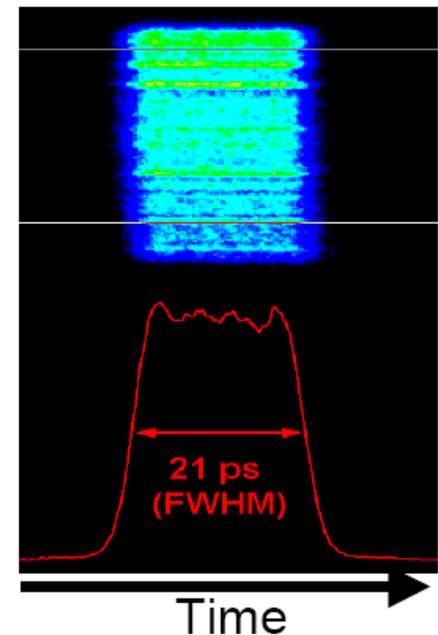
1° : utiliser un canon photo_déclenché

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



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

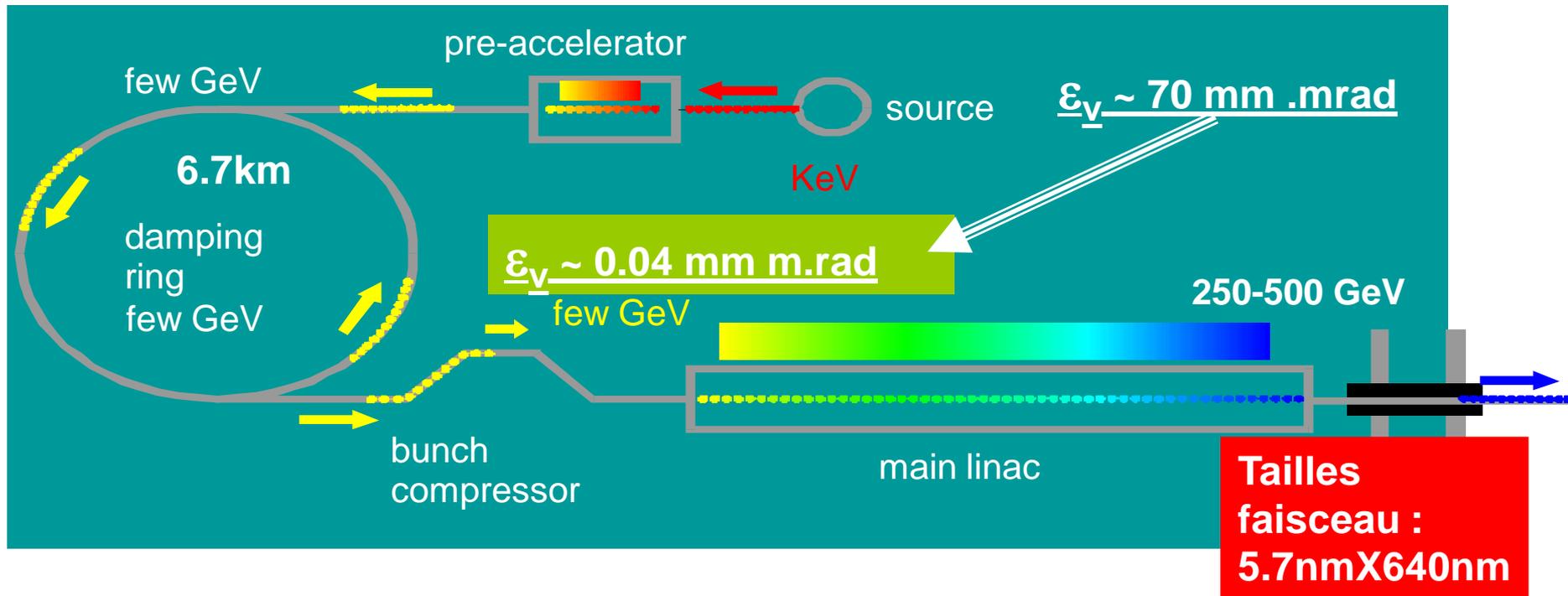
- UV: 266nm
- 20 μJ /pulses
- 3000 pulses @ 5Hz



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 ~ 200 !
 - Tout ça au rythme de 3000 paquets @ 5Hz ...
 - Soit ~ 200 ms dans le damping ring...



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

Source de protons :

- Ionisation H

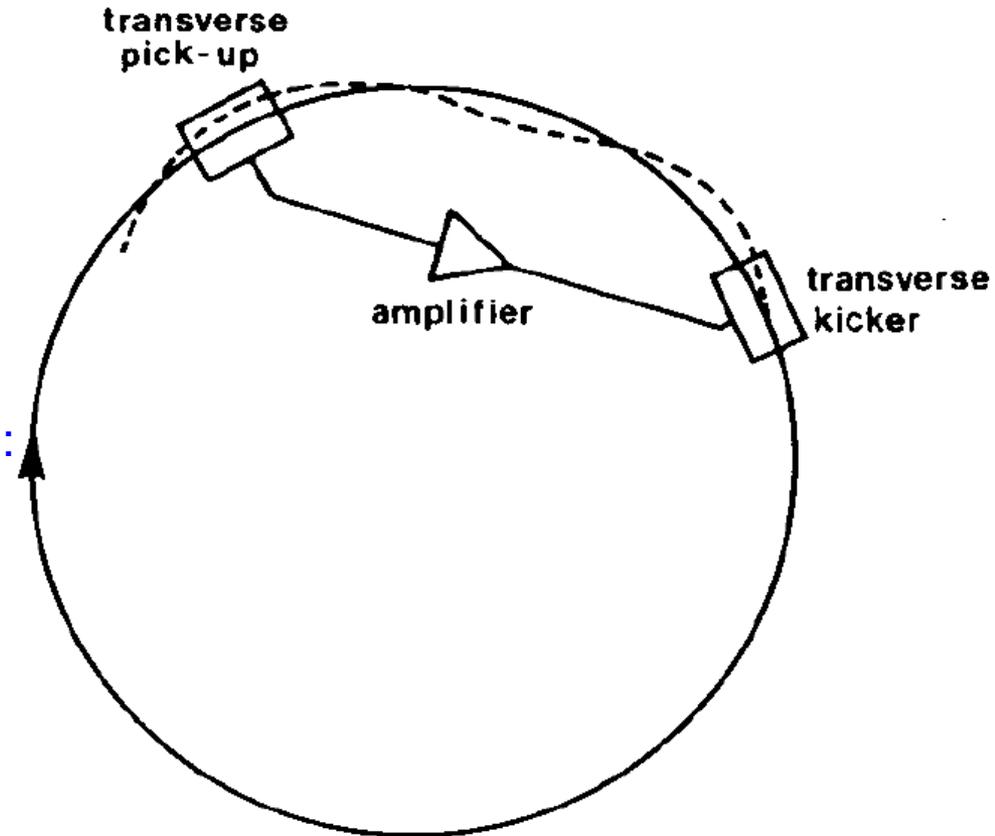
Source d'antiprotons :

- 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 ...

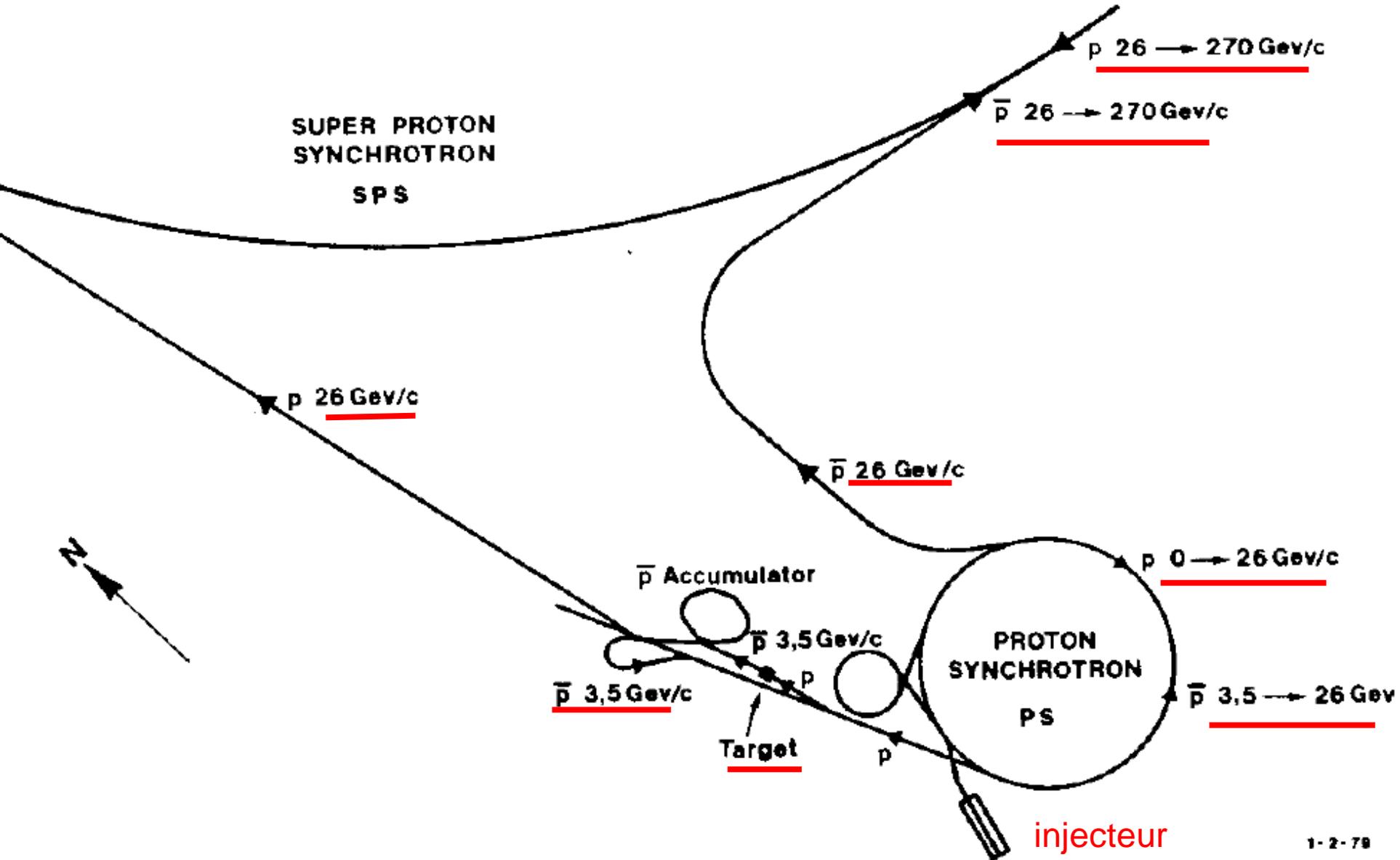
→ technique du Stochastic cooling pour antiprotons (Van der Meer)



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)