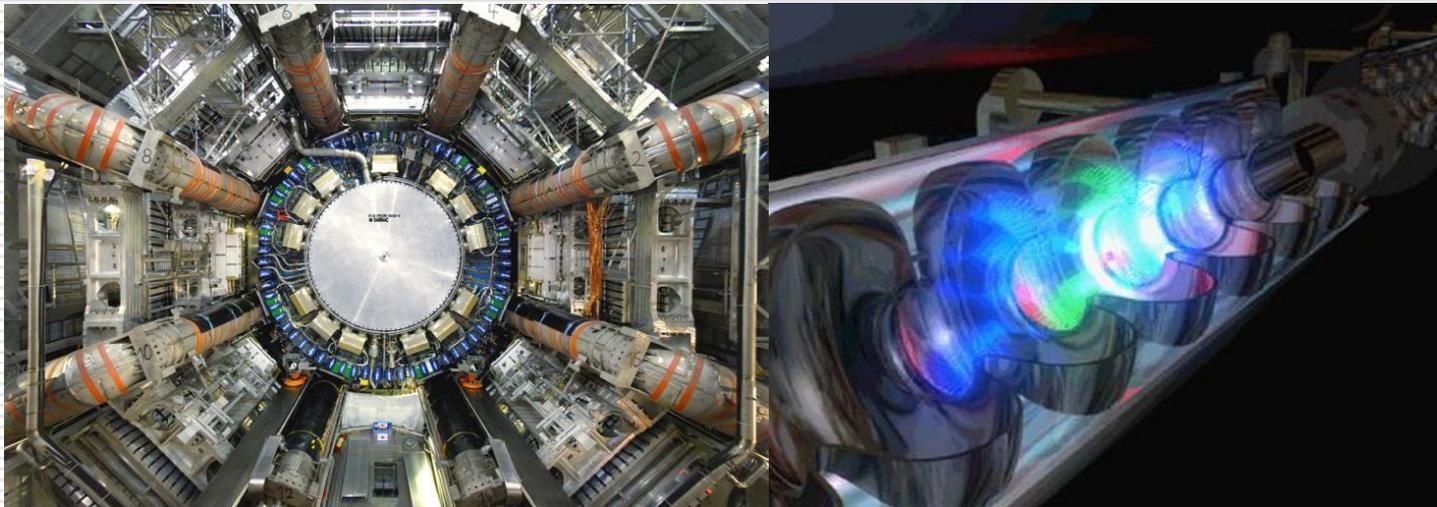


# MC 08: Futurs instruments de la physique subatomique

---



**Développement des techniques expérimentales et des idées en physique au 20ème siècle**

---

# Plan de cette présentation

---

- ❑ A la découverte de la théorie standard
- ❑ Quels furent les principaux outils utilisés
- ❑ La frontière en énergie et en intensité pour les accélérateurs
- ❑ L'évolution des détecteurs
- ❑ La mondialisation de HEP
- ❑ Les perspectives

# En quête de la théorie standard

---

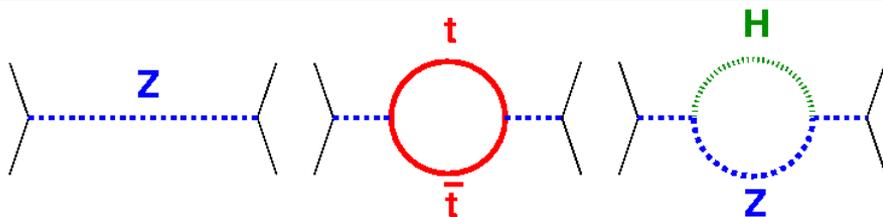
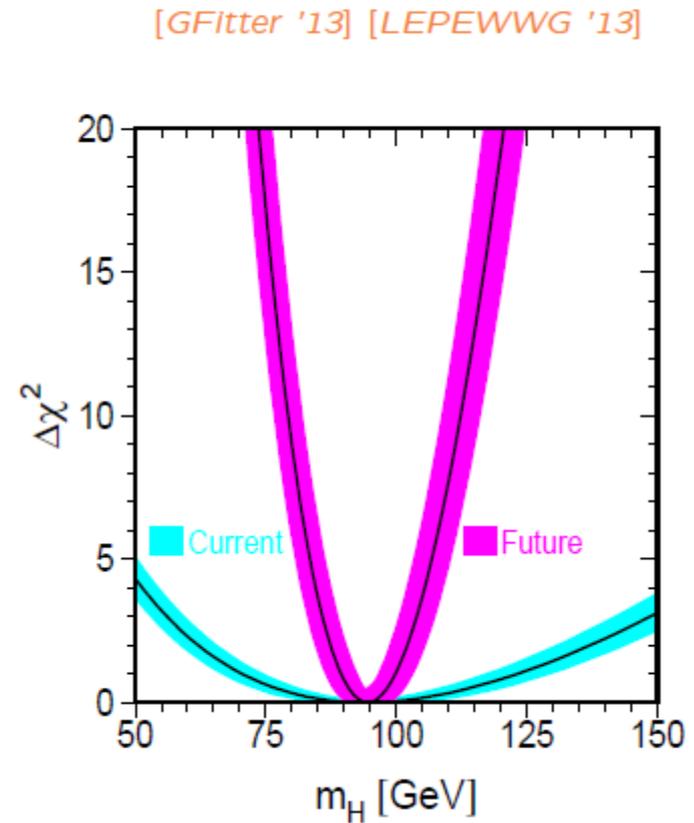
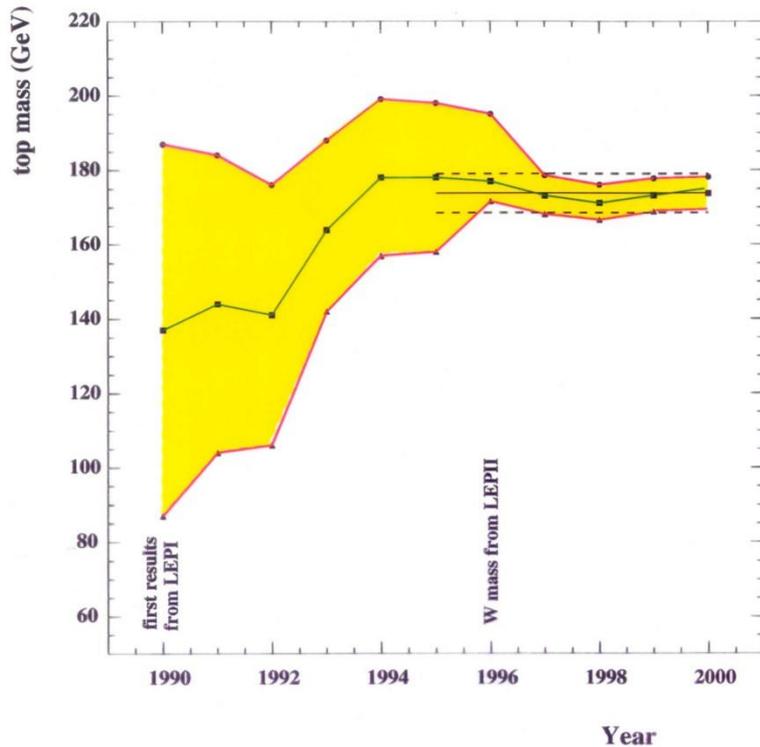
- On peut dire, a posteriori, que la physique des particules au cours des  $\sim 50$  dernières années se caractérise par la mise en évidence progressive des ingrédients du **Modèle Standard**
- A partir des années 1970 s'instaure un dialogue continu théorie-expérience aboutissant à la confirmation impressionnante de la **Théorie Standard** édifice conceptuel majeur de la physique qui vient d'être parachevé par la découverte du boson H

# Quelques étapes

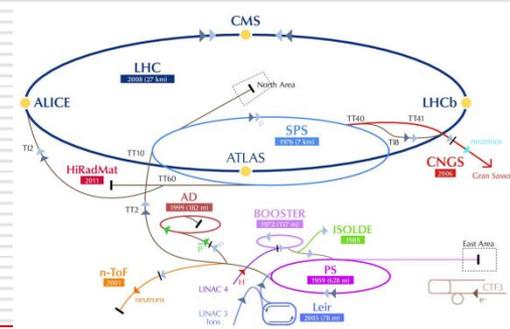
	Fermions			Bosons	Force carriers
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$Z$ Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$g$ gluon	
				Higgs boson	

- Structure partonique (quark/gluons) de la matière (DIS) en 1969
- Courants neutres en 1973 (neutrinos)
- $J/\Psi$  et 3<sup>ème</sup> famille (lepton  $\tau$ ) en 1975 permettant d'interpréter CPV vu avec les  $K^0$  en 1964
- Bosons W/Z en 1983
- top en 1995 et H en 2012 complétant le MS
- Toutes ces découvertes étant 'prévisibles' dans le cadre du MS y compris les masses de certaines particules par les mesures de précision ( $m_c, m_t, m_W, m_Z, m_H$ )

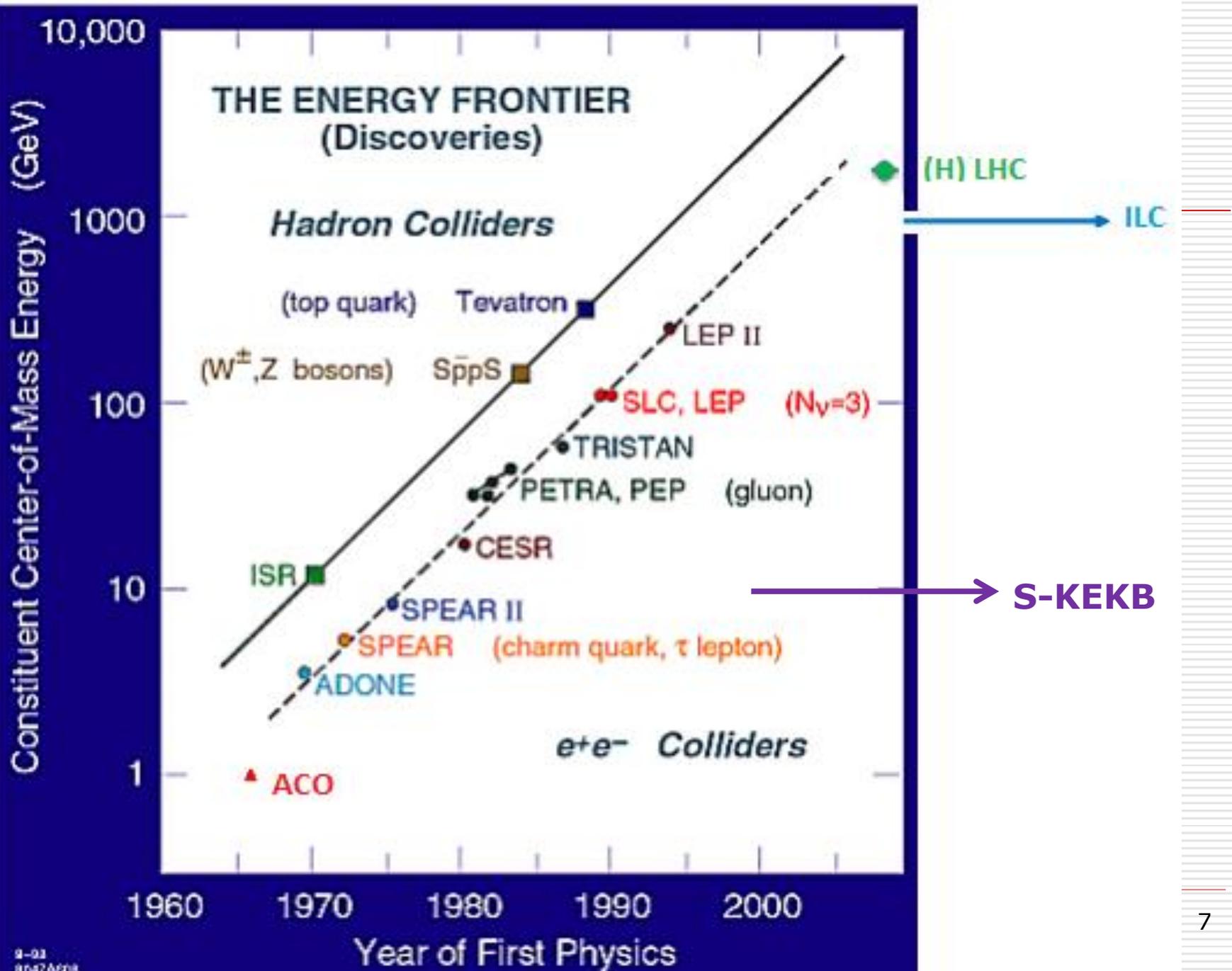
# La sensibilité quantique



# Les Accélérateurs



- ❑ Ces succès s'appuient sur une évolution très rapide de **l'énergie utile** (ECM) des accélérateurs
- ❑ Les modes opératoires des accélérateurs ont évolué avec le temps
- ❑ Faisceaux de protons envoyés sur une cible fixe
- ❑ Avantage : grande variété de **faisceaux secondaires** (pi/K, e/ $\mu$ , neutrinos)
- ❑ Inconvénient: ECM d'augmente que comme  $\square E$
- ❑ Fin des années 60 les collisionneurs e+e- entrent en action offrant des avancées majeures
- ❑ Les collisionneurs pp (ISR,LHC) et ppbar (CERN, FNAL) suivent

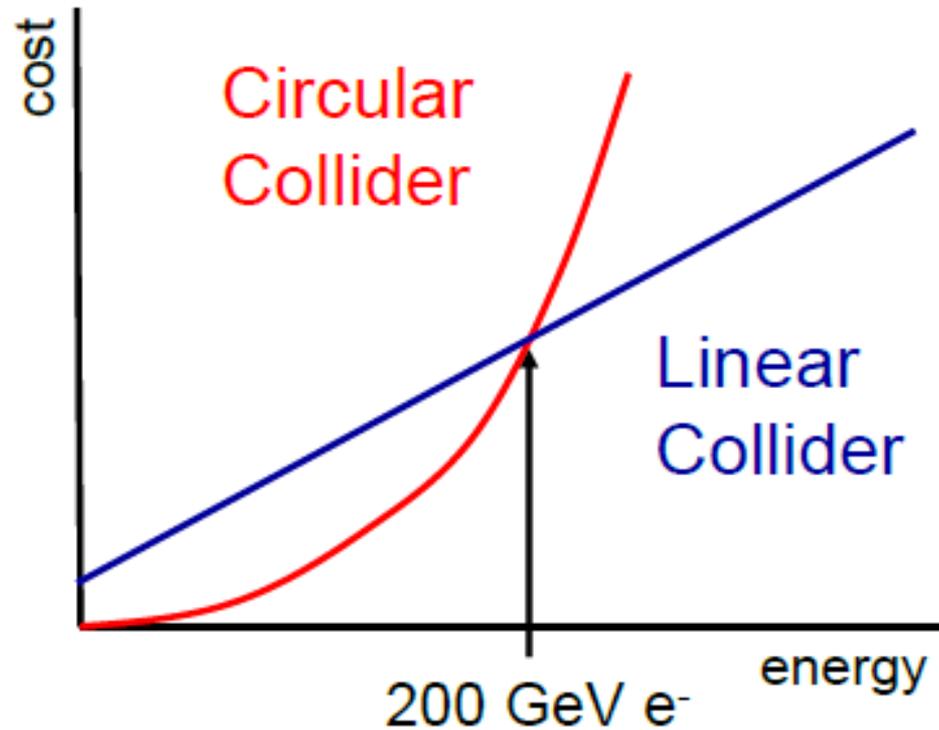


# Commentaires

---

- Diagramme de Livingstone: saturation apparente
- Ce qui compte toutefois c'est la **motivation de physique** ces machines :  $e^+e^-$  (LC et 'usines à B') permettant une exploration indirecte au delà du domaine de LHC
- Rôle crucial du bilan énergétique : la '**supra**' joue un rôle de plus en plus important
- Cette limite est également cruciale pour les accélérateurs laser-plasma qui ambitionnent de plus forts gradients

# Circulaire ou linéaire ?



## Circular Collider

- $\Delta E \sim (E^4/m^4R)$
- $\text{cost} \sim aR + b \Delta E$
- optimization:  $R \sim E^2 \rightarrow \text{cost} \sim cE^2$

## Linear Collider

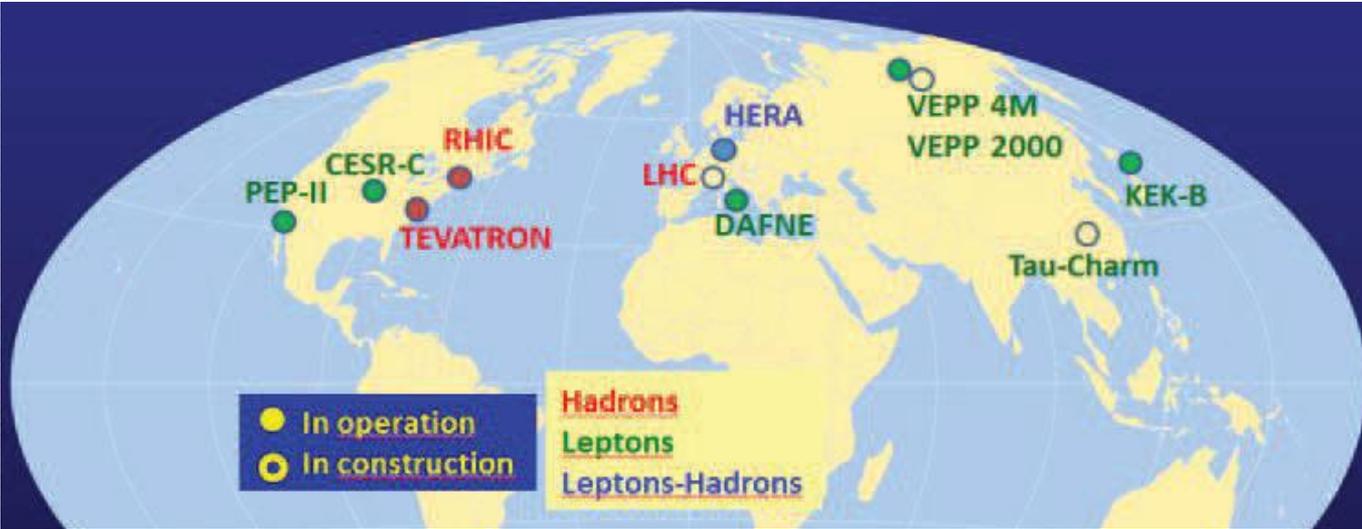
- $E \sim L$
- $\text{cost} \sim aL$

# HEP à l'échelle mondiale

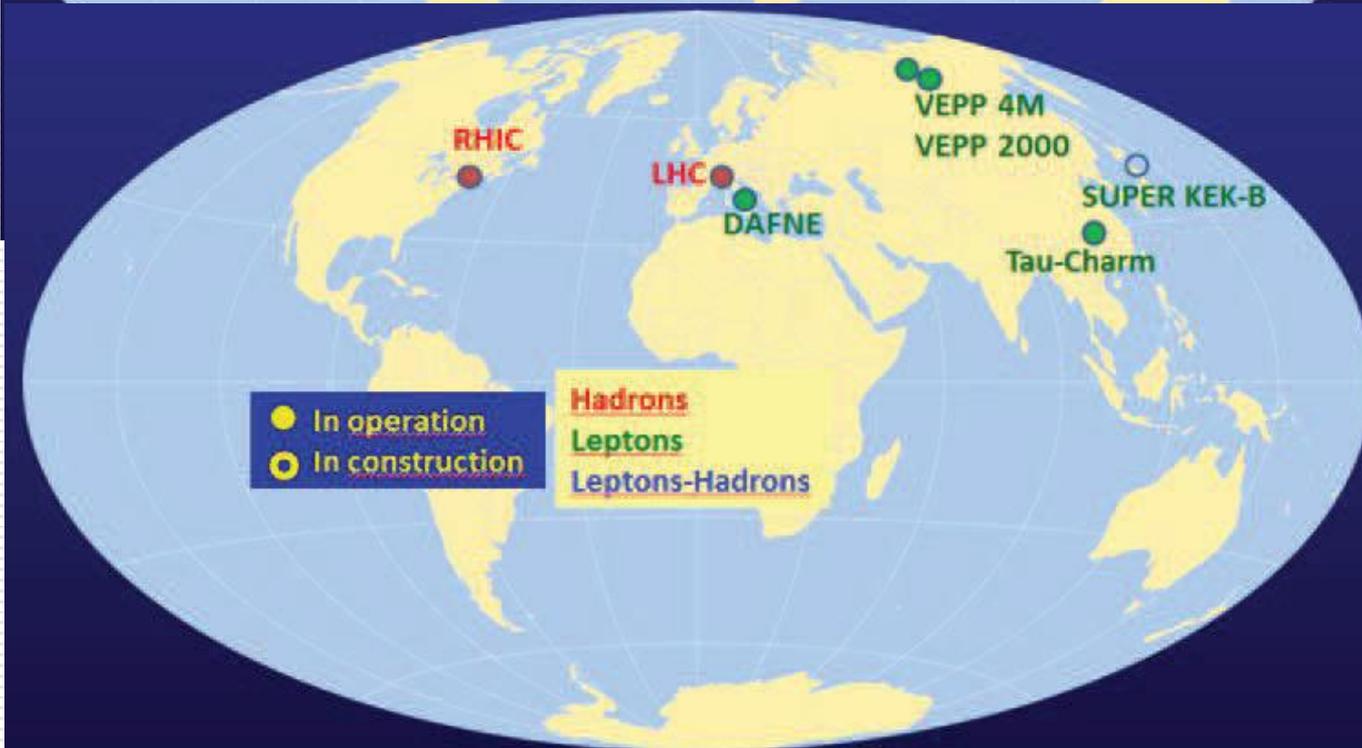
---

- La période faste des 30 glorieuse et le coût relativement modeste des installations a permis de développer plusieurs centres dans le monde avec des **machines similaires** en compétition les unes avec les autres
- A l'échelle de LHC (et de LEP) cette compétition est apparue contre-productive avec l'abandon du SSC
- La concertation mondiale est maintenant préconisée par la stratégie européenne et les 3 régions participent à LHC et projettent de collaborer à la construction de ILC
- On constate un dépérissement inquiétant des grands centres HEP dans le monde

# WORLD MAP OF HEP

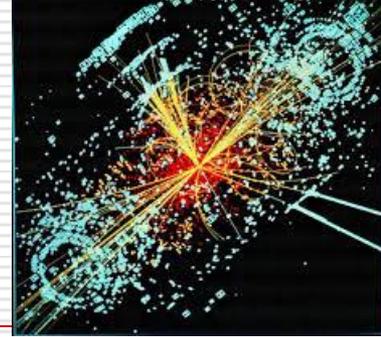


2006



2012

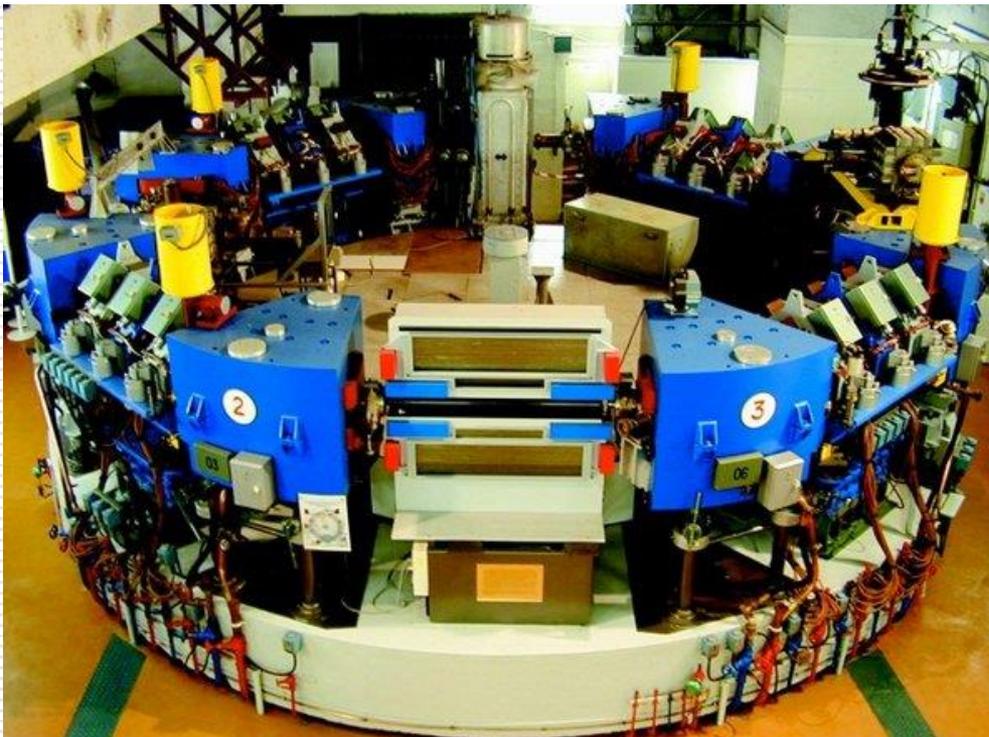
# Les Détecteurs



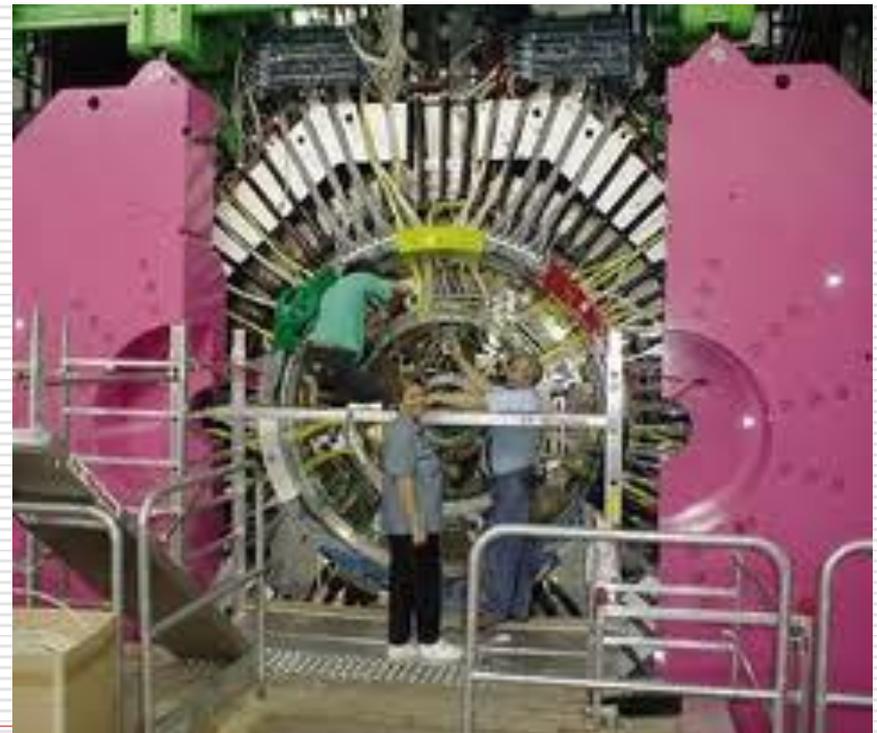
- Fin des années 1960: les 'bulles' cèdent la place aux 'compteurs' (avec l'exception majeure de Gargamelle )
- Avec l'apparition des collisionneurs nécessité d'une couverture ' $4\pi$ ' et d'un champ B solénoïdal SC
- La frontière en intensité évolue en synergie avec les progrès très rapides de l'électronique et du calcul (GRID)
- Remplacement progressif des détecteurs gazeux (chambre de Charpak puis TPC) par des détecteurs Si mais les coûts restent dissuasifs et la 'transparence' pose problème
- La précision  $\sim \mu\text{m}$  du Si s'impose pour la détection des quarks 'lourds'

# Un exemple

□  $e+e^- \rightarrow \Phi$  en 1968  
(ACO) 200 evts



□  $e+e^- \rightarrow \Phi$  en 1999  
(DAFNE)  $> 10^9$  evts



# La R&D détecteurs

---

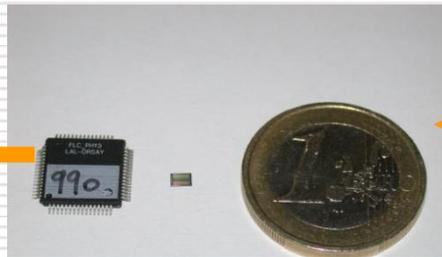
- Une R&D intense et structurée, soutenue par les programmes européens en vue d'ILC et des 'upgrades de LHC' permet des progrès très rapides
- Nécessite reconnue d'une granularité très fine des calorimètres :  $>10^8$  canaux intégrés ds le calorimètre 'Imaging calorimetry' proposé pour ILC
- On retrouve la finesse d'analyse des chambres à bulles mais compatible avec un traitement de données infiniment + puissant

# La solution ?

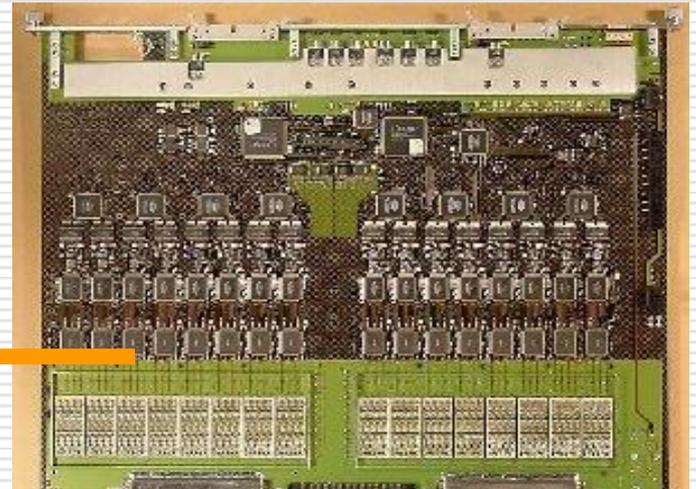
- Intégrer l'électronique de lecture à l'intérieur du calorimètre en réduisant sa taille et sa consommation



ILC : 25 $\mu$ W/ch



Physics Proto. 18ch 10\*10mm 5mW/ch



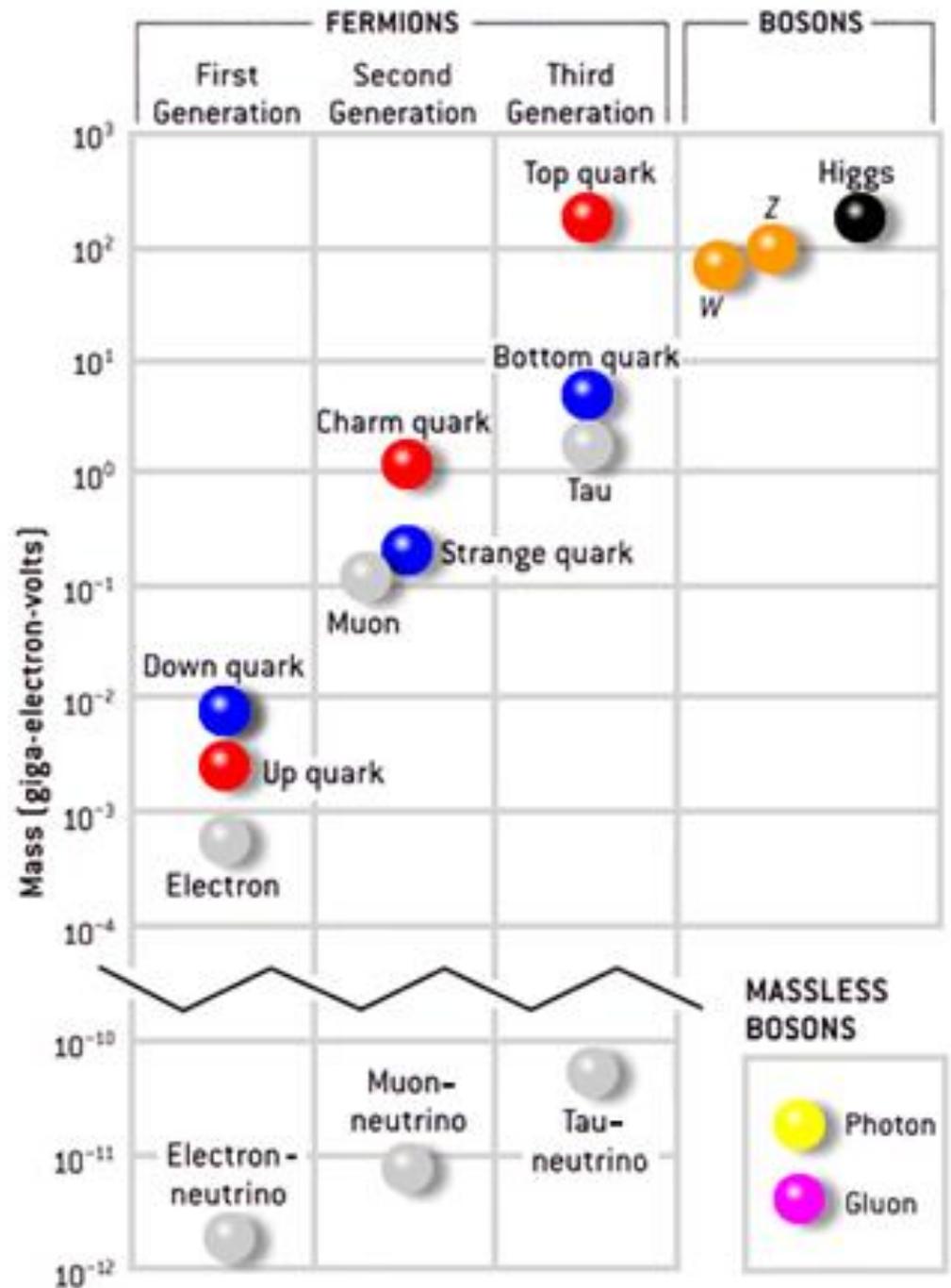
ATLAS LAr FEB 128ch 400\*500mm 1 W/ch

# Perspectives pour la physique

---

- ❑ La **théorie standard** est pleinement cohérente et semble se suffire à elle-même mais :
- ❑ Elle laisse en dehors la **gravitation**
- ❑ Elle n'explique pas l'asymétrie matière-anti-matière avec le niveau observé de **CPV**
- ❑ Elle n'explique pas la transition EF
- ❑ Elle n'explique pas les observations cosmologiques : matière noire, énergie noire
- ❑ Problèmes de hiérarchie des interactions (Planck/EF= $10^{16}$  et des masses des fermions
- ❑ ...

# Hiérarchie



# La stratégie

---

- Des mesures de plus en plus précises pour 'faire tomber' le SM (machines  $e+e^-$ )
- Frontière en énergie (LHC, CLIC) pour produire les particules nouvelles : SUSY, dimensions supplémentaires (KK), composites ( $\rho$ ,  $\pi$  massifs)
- A cela s'ajoutent les expériences neutrino et toutes les recherches hors accélérateur (non discutées ici)
- Ces approches diversifiées sont indispensable pour préciser les prochaines étapes envisageables :
- Un  $e+e^-$  à 3 TeV CLIC ?
- Un LHC avec des aimants à 20 T et un tunnel de 100 km ?

# Conclusion

---

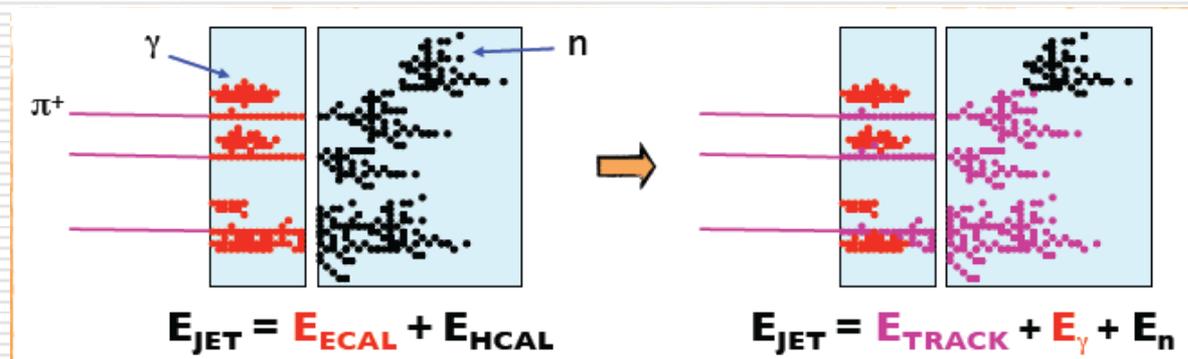
- ❑ Les 50 dernières années ont vu une confirmation progressive mais éclatante du **Modèle Standard**
- ❑ Les collisionneurs pp (anti-p) et e+e-  $\gamma$  ont joué un rôle primordial et complémentaire pour les **découvertes** et les **prédictions** de nouvelles particules
- ❑ Les détecteurs ont pleinement bénéficié (et encouragé) les évolutions rapides de la technologie par une **intensive R&D**
- ❑ La **mondialisation** de HEP est en cours et doit permettre de poursuivre l'effort destiné à découvrir la physique au-delà du MS

---

# BONUS

# Le Particle Flow

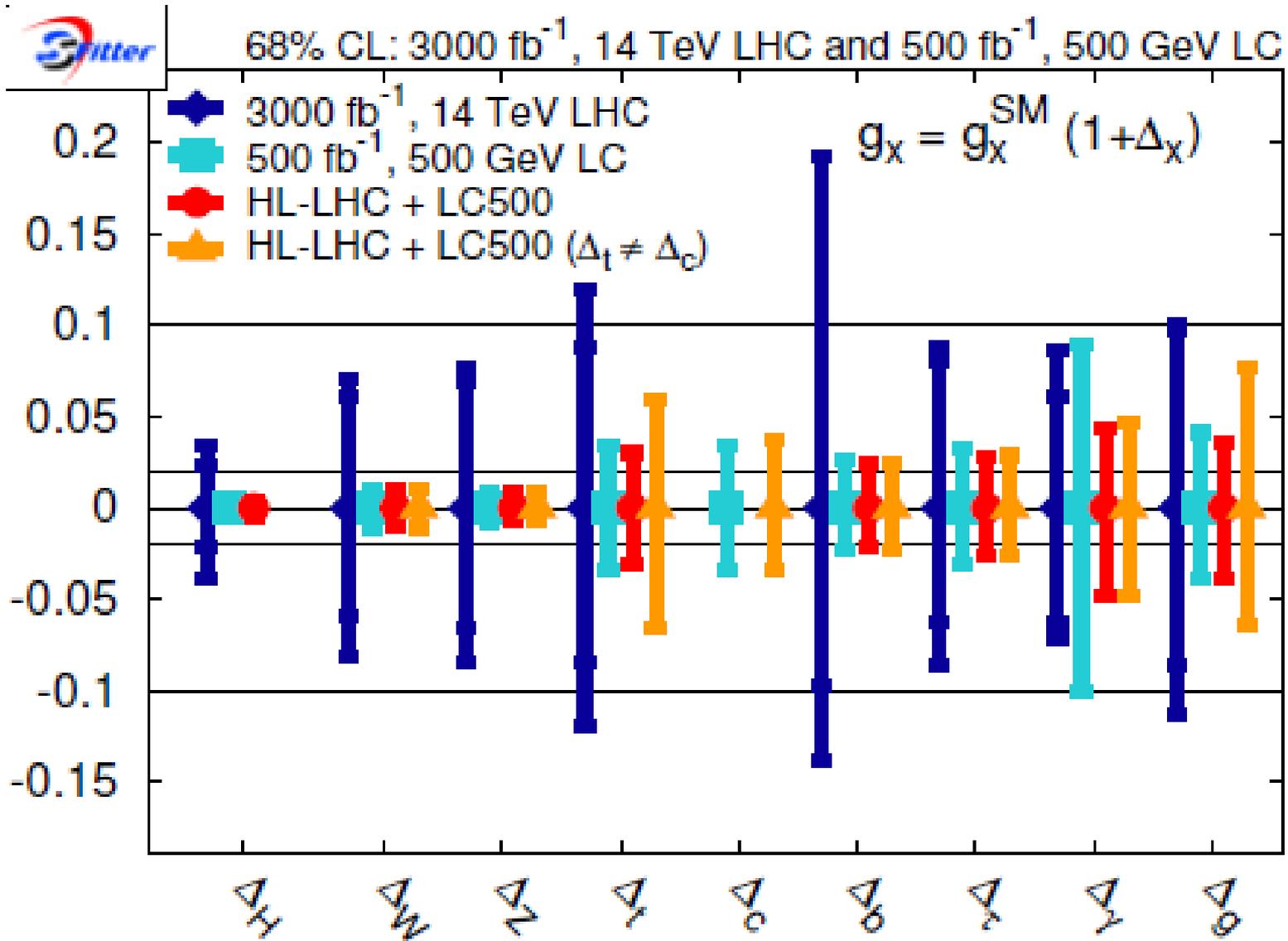
- Joue un rôle majeur dans la reconstruction des jets
- Le problème ?



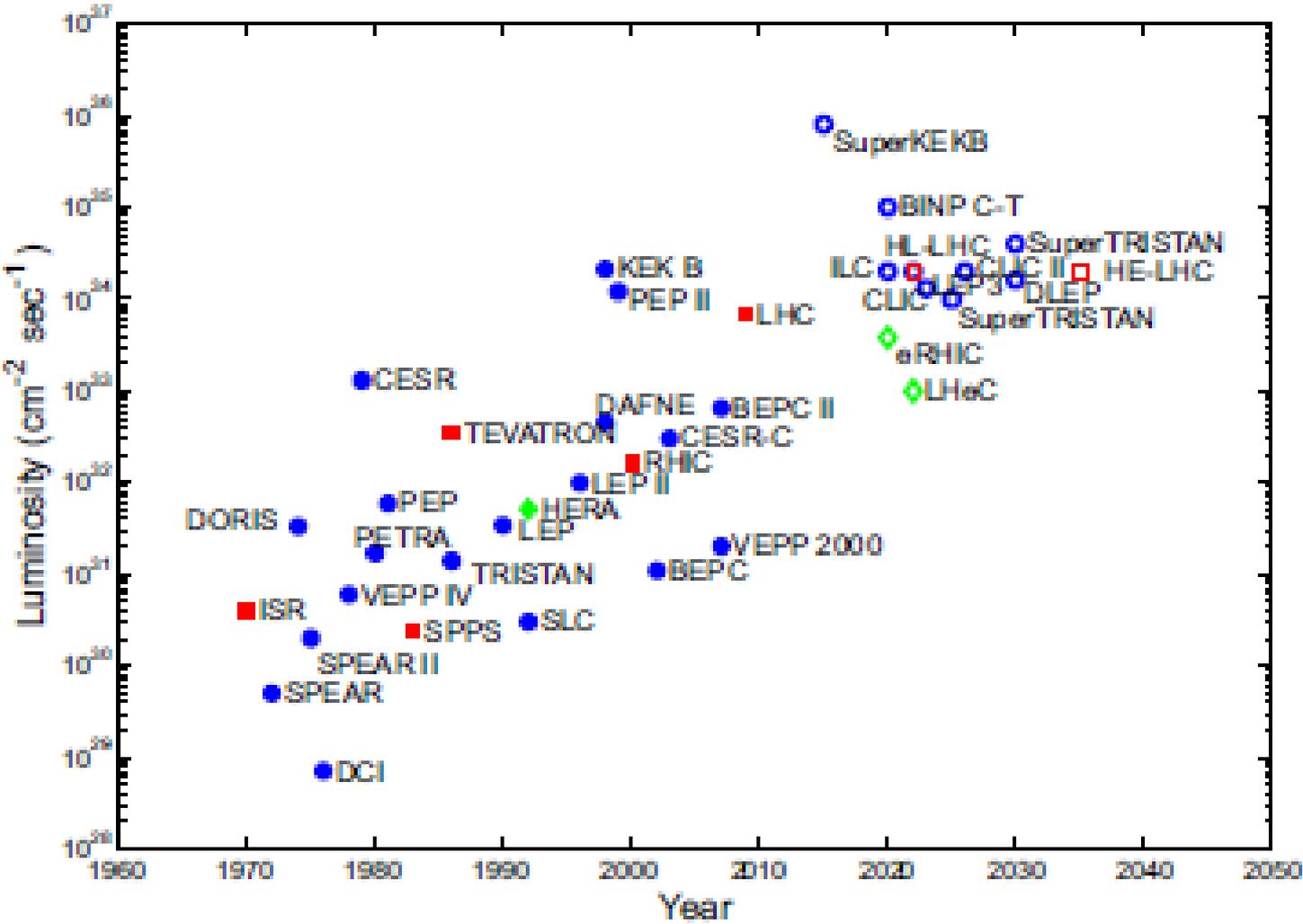
- La limitation principale du PF provient des confusions et non de la résolution en énergie
- Le remède consiste à utiliser un milieu très compact (Si+W) avec une très haute segmentation du détecteur

Topic	Predictions	Discovery	Type of machine
Anti-particles	1927	1932	Cosmics
Parity violation	1956	1957	Beta decay
Neutrino e	1931	1956	Nuclear reactor
Neutrino $\mu$		1962	Accelerator
Neutrino masses		1998	cosmics, accelerators, cosmology
Majorana/Dirac ?	1937		Underground detectors
W (Fermi theory)	1933	1983	p-antip
Partons/quarks	1964	1969	e-p
BEH(iggs)	1964	2012	p-p
Neutral current	1964	1973	Bubble chamber
Z	1964	1983	p-antip
Charm	1964	1975	
3d generation	1973	1975(tau) 1977(b) top( 1995)	e+e- and p-p
CPV		1964	Accelerator, e+e-, LHC, n/e
Number of neutrinos	1973	1989	e+e-
Unification of em and weak force		1989	e+e-
Higgs	1964		2012
GUT	1974		pp
Proton decay	1974		e+e-
SUSY	1971		Underground detectors
Extra dimensions	1921/1981		LHC
Compositeness			LHC

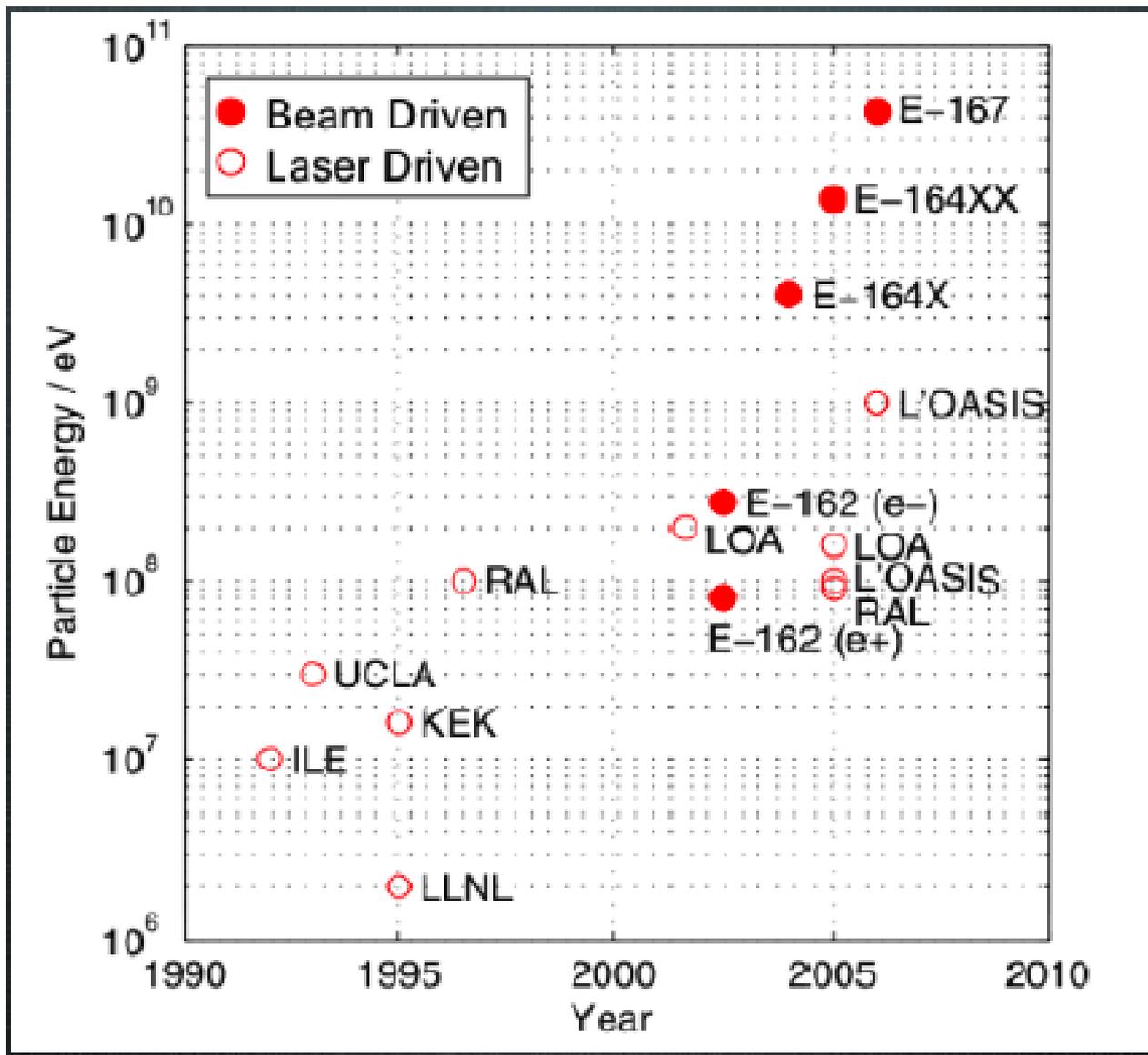
	Fermions			Bosons	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	Force carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$Z$ Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$g$ gluon	
				Higgs boson	



# Frontière en intensité

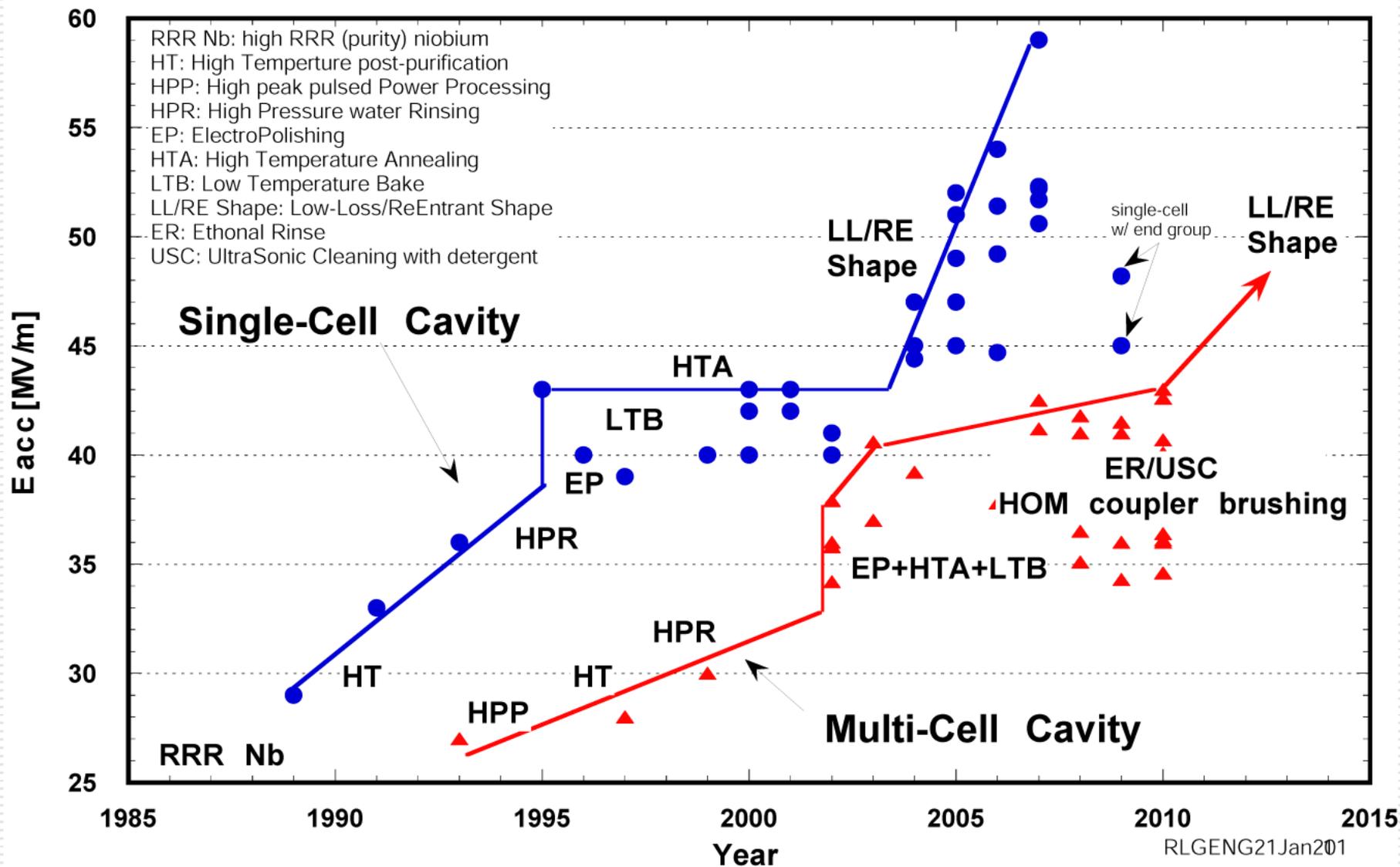


# Accélération par plasma



# Progress on SC cavity gradients

## L-Band SRF Niobium Cavity Gradient Envelope Evolution



# Particle Flow

