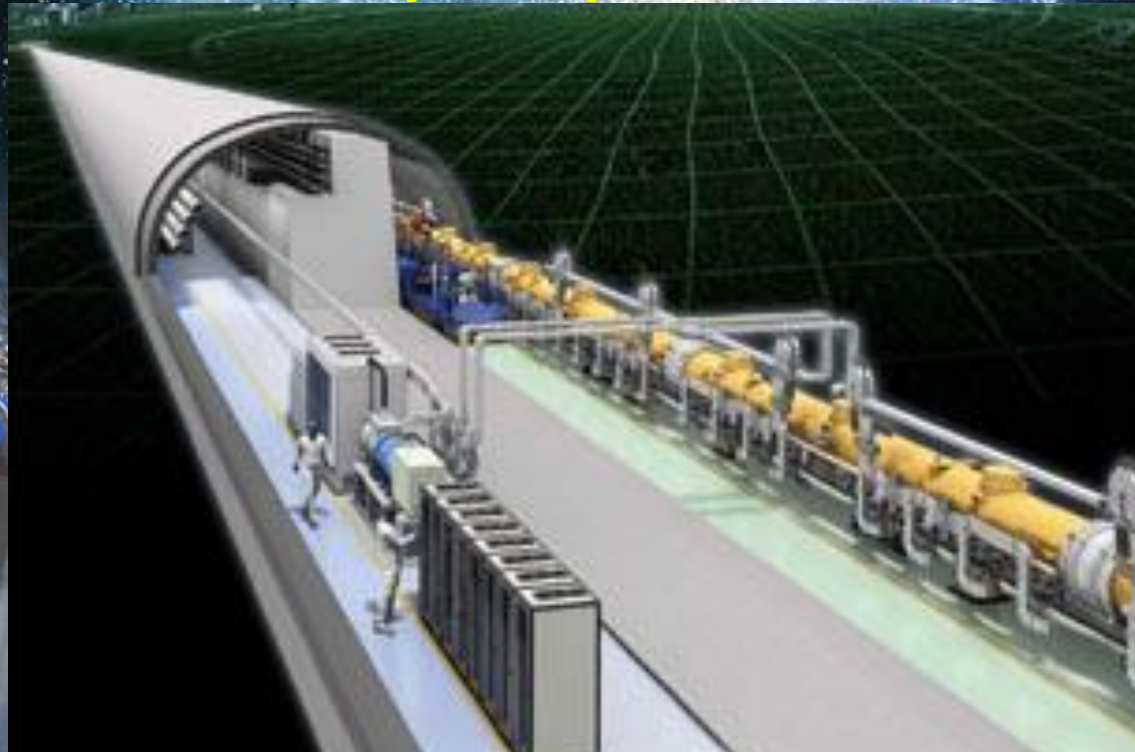


Collisionneurs du Futur : montée en luminosité LHC, ILC, ...



Olivier Napoly

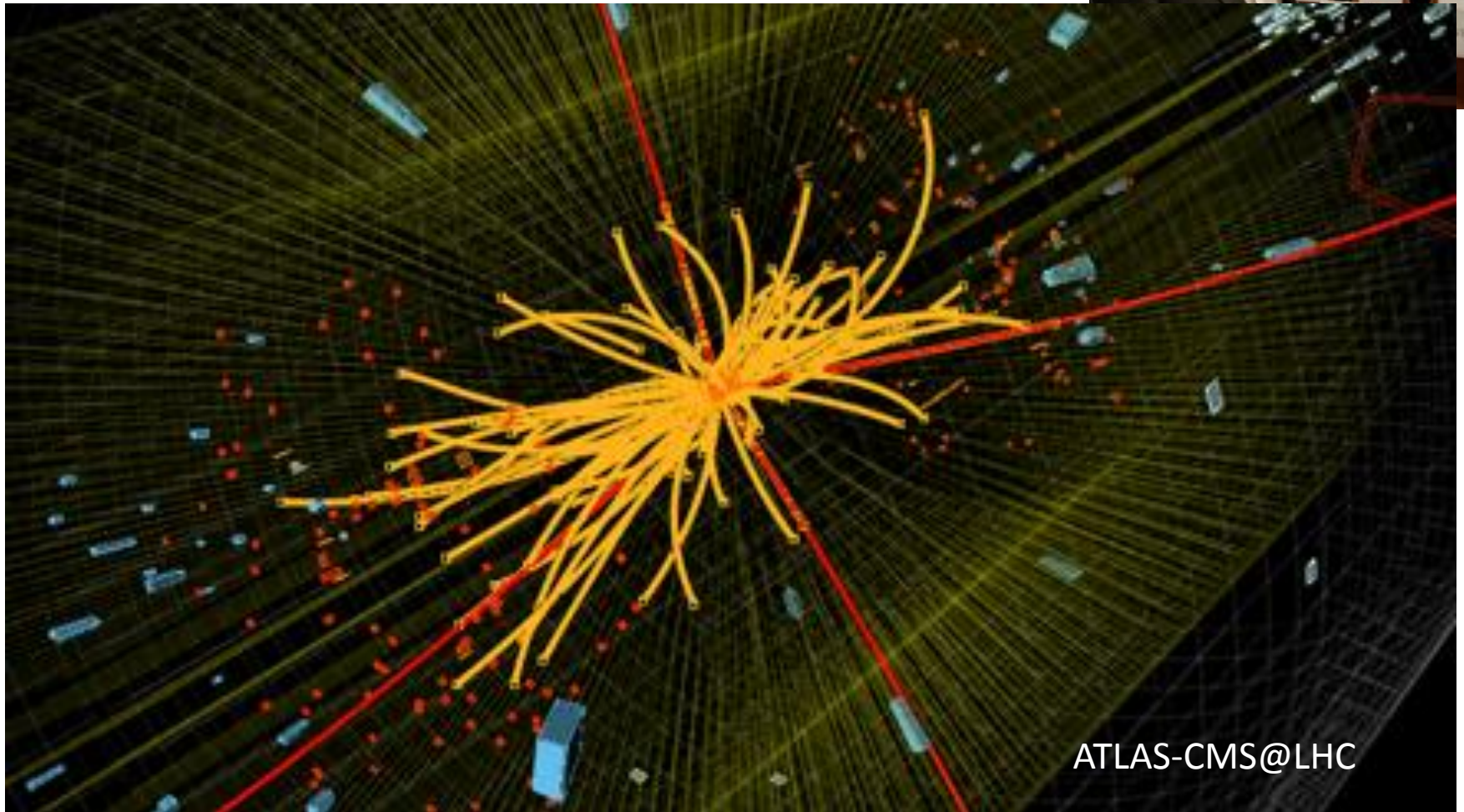
CEA/Irfu

Chef de Projet CEA-XFEL

Sommaire

- Collisionneurs proton-proton (pp)
- Collisionneurs électron-positon ($e^+ e^-$)
- Collisionneurs de photon ($\gamma\gamma$)
- Collisionneurs de muons ($\mu^+ \mu^-$)

Découverte du Boson de Higgs (Higgs-Kibble-Brout-Englert)



Usine à Higgs: nouvelle floraison de projets

Linear Colliders



ILC
CLIC
SLC-type
Adv.
Concepts

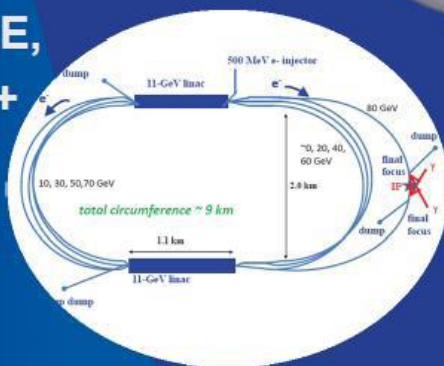
Circular e⁺e⁻ Colliders



LEP3
TLEP
Super-Tristan
FNAL
Site-filler
IHEP, +
...

Higgs Factories

SAPPHIRE,
CLICHÉ, +
...

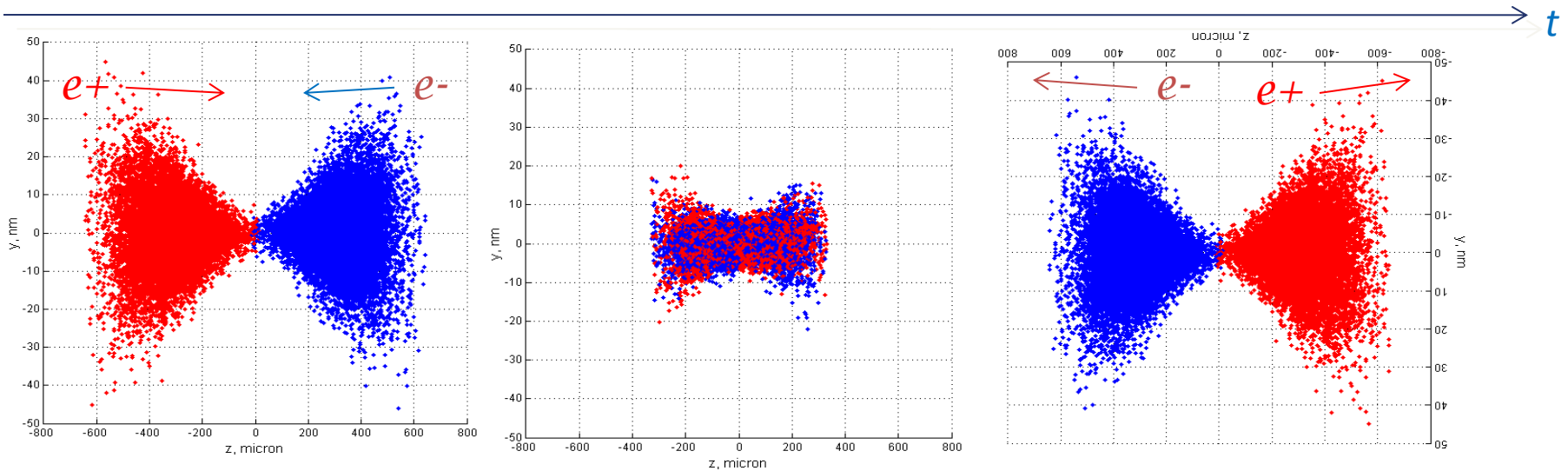


γ - γ Colliders



Muon Colliders

Fermilab



D'après l'expression de la force de Lorentz, l'énergie d'une particule chargée est donnée par la composante longitudinale du champ électrique:

$$E = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = q \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Le champ magnétique accélère transversalement, mais ne travaille pas !

L'énergie relativiste de collision est donnée par le module de la résultante des quadrivecteurs de quantité de mouvement (e.g. collision frontale):

$$\sqrt{s} = \sqrt{(\tilde{p}_+ + \tilde{p}_-)^2} = \sqrt{\tilde{p}_+^2 + \tilde{p}_-^2 + 2\tilde{p}_+ \cdot \tilde{p}_-} \approx 2\sqrt{E_+ E_-} \neq (E_+ + E_-)$$

Collisionneur = Microscope / ∞ -Petit

Equivalence distance-énergie

$$E = \hbar c / d$$

Constante de Planck :

$$\hbar c \approx 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

Masse du proton : $1 \text{ GeV} \approx 0,2 \text{ fm}$

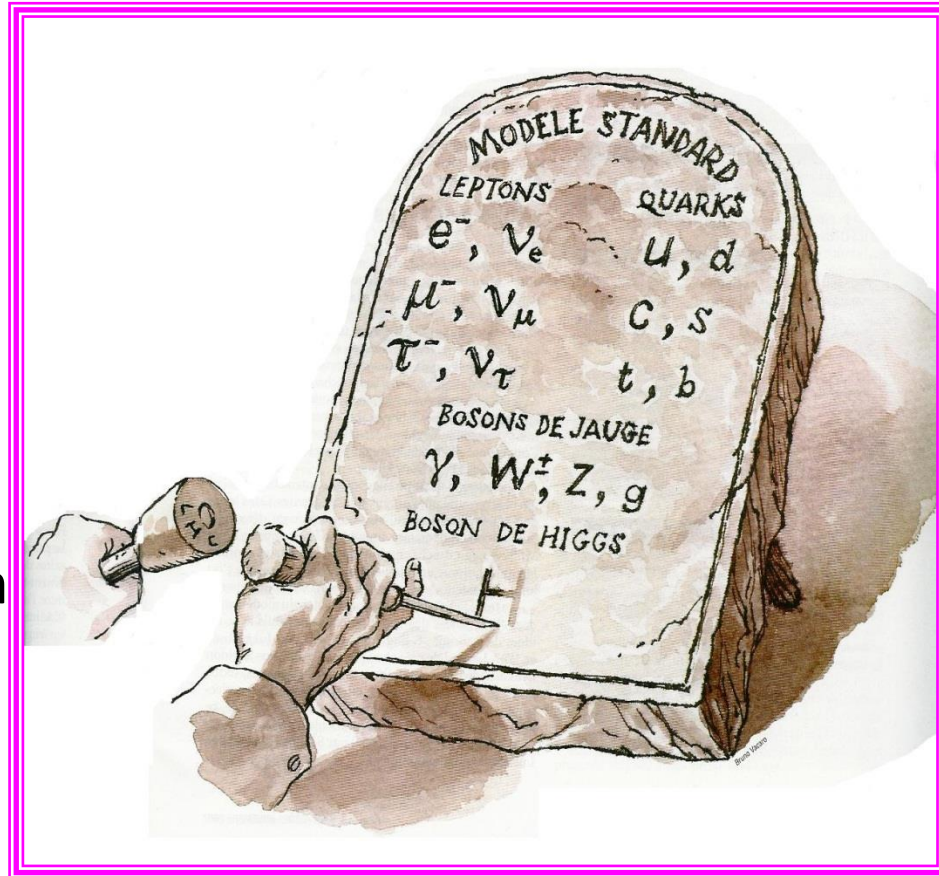
Masse du Z^0 : $91 \text{ GeV} \approx 2,2 \text{ am}$

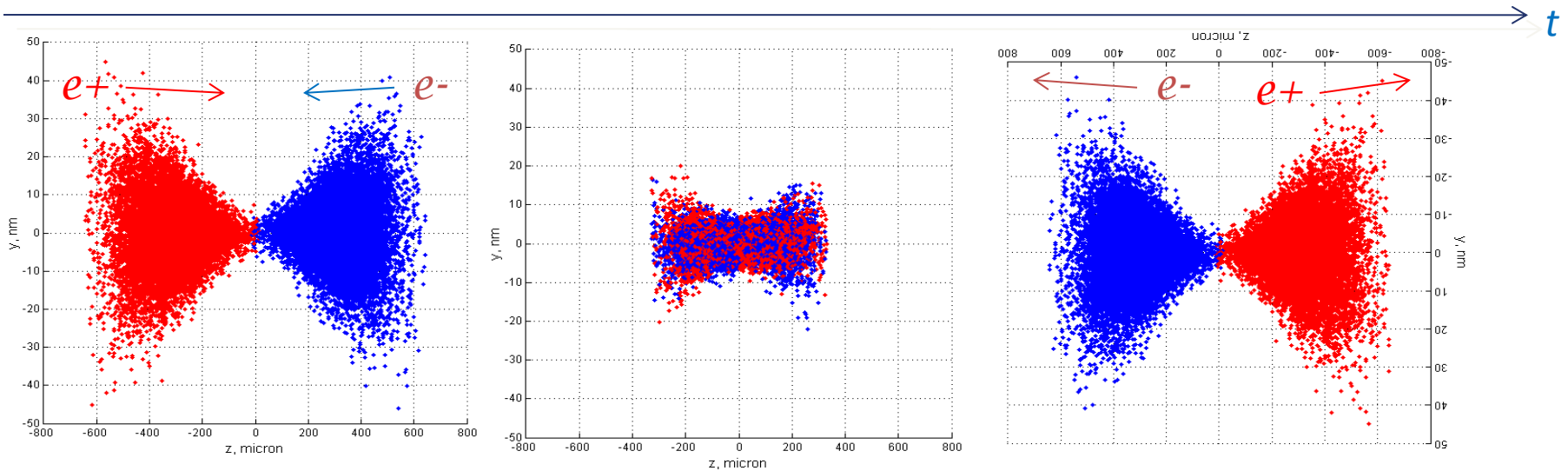
Masse du Higgs : $126 \text{ GeV} \approx 1,6 \text{ am}$

Terascale : $1 \text{ TeV} \approx 0,2 \text{ am}$

* $1 \text{ fm} = 1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$

* $1 \text{ am} = 10^{-18} \text{ m}$





Le taux de comptage $N_{\mathcal{E}}$ d'évènements \mathcal{E} de physique générés pendant la durée d'une collision de deux paquets, est donné par:

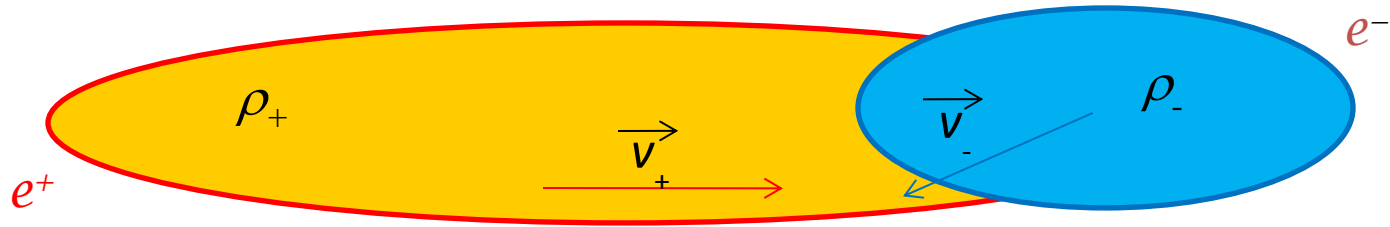
$$N_{\mathcal{E}} = \overline{\mathcal{L}} \cdot \sigma_{\mathcal{E}}$$

où

- $\sigma_{\mathcal{E}}$ est la 'section efficace' de l'évènement \mathcal{E}
- $\overline{\mathcal{L}}$ est la 'luminosité' intégrée pendant la durée de la collision.

$N_{\mathcal{E}}$, $\sigma_{\mathcal{E}}$, et $\overline{\mathcal{L}}$ sont des quantités invariantes de Lorentz.

La luminosité pour des faisceaux monocinétiques



$$\bar{\mathcal{L}} = \frac{1}{c^2} \int c dt d^3 x \left((\mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_2)^2 - \mathbf{J}_1^2 \mathbf{J}_2^2 \right)^{1/2}$$

Pour des faisceaux relativistes $\gamma_+, \gamma_- \rightarrow \infty$:

$$\bar{\mathcal{L}} = \frac{1}{c^2} \int c dt d^3 x \mathbf{J}_+ \cdot \mathbf{J}_- = \frac{1}{c^2} \int c dt d^3 x \rho_+ \rho_- (c^2 - \vec{v}_+ \cdot \vec{v}_-)$$

Par exemple: collisions frontales $\vec{v}_+ = -\vec{v}_- = c\hat{z}$ de faisceaux Gaussiens:

$$\rho_{\pm}(\vec{x}, t) = \frac{N_{\pm}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{\sigma_x^{\pm} \sigma_y^{\pm} \sigma_z^{\pm}}} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^{\pm 2}} + \frac{y^2}{\sigma_y^{\pm 2}} + \frac{(z \pm ct)^2}{\sigma_z^{\pm 2}} \right)$$

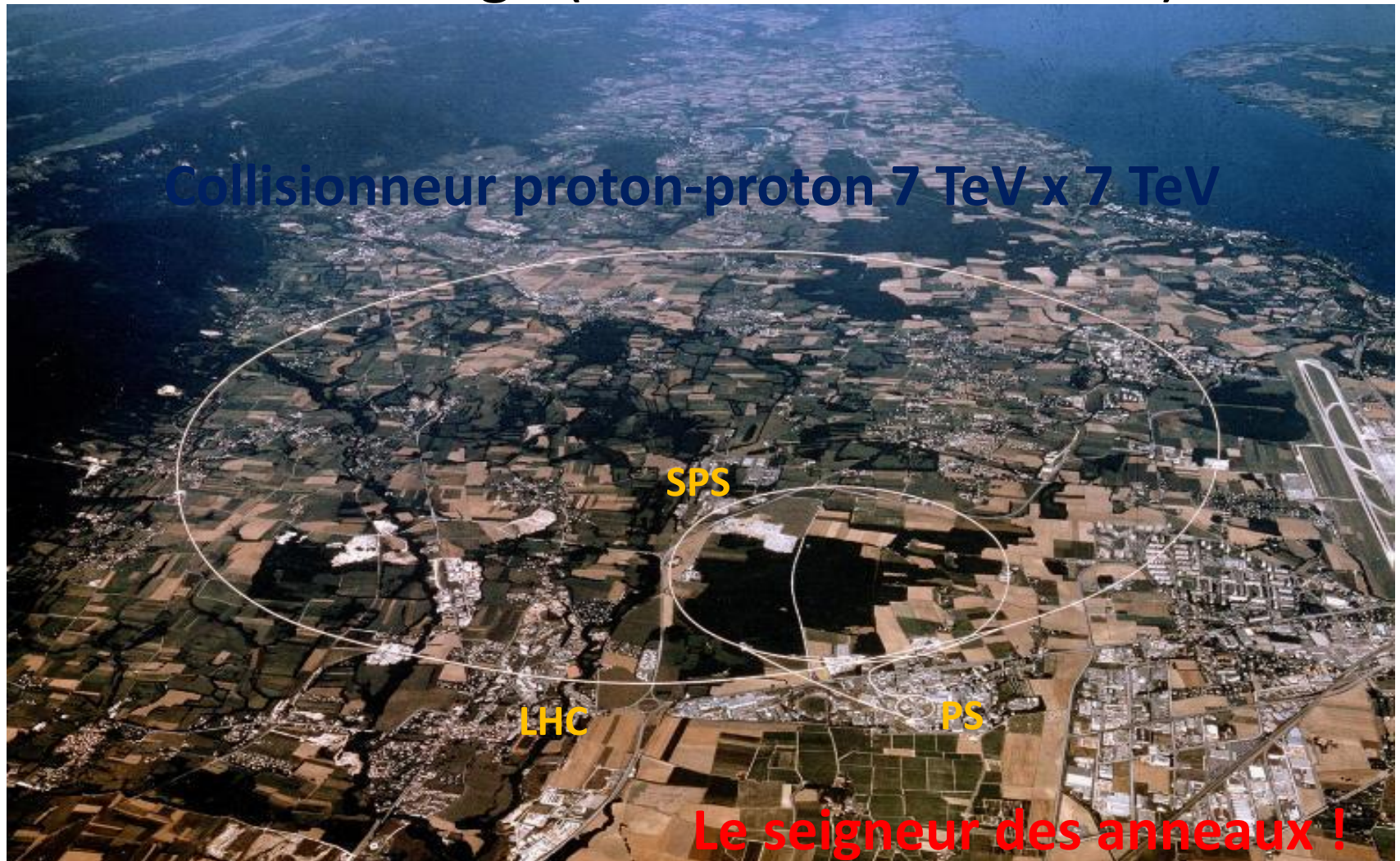
$$\bar{\mathcal{L}} = 2 \int c dt d^3 x \rho_+ \rho_- = \frac{N_+ N_-}{4\pi \Sigma_x \Sigma_y} \quad \text{avec} \quad \Sigma^2 = \frac{1}{2} (\sigma_+^2 + \sigma_-^2)$$

Le Tevatron à Fermilab (Chicago) : microscope de frontière en énergie jusqu'en 2010

Collisionneur proton-antiproton 1 TeV x 1 TeV



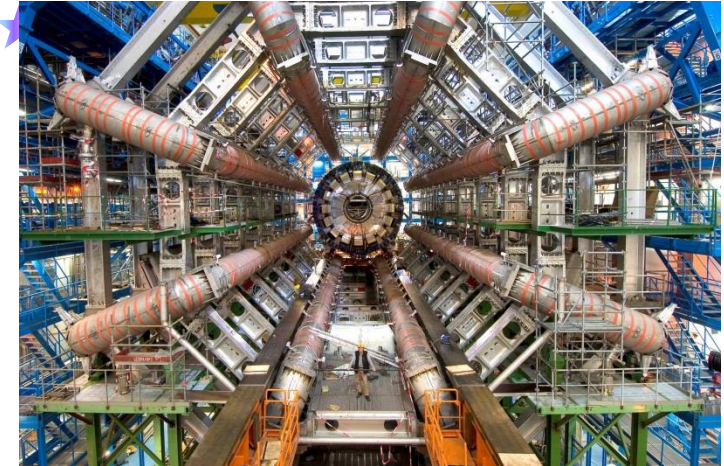
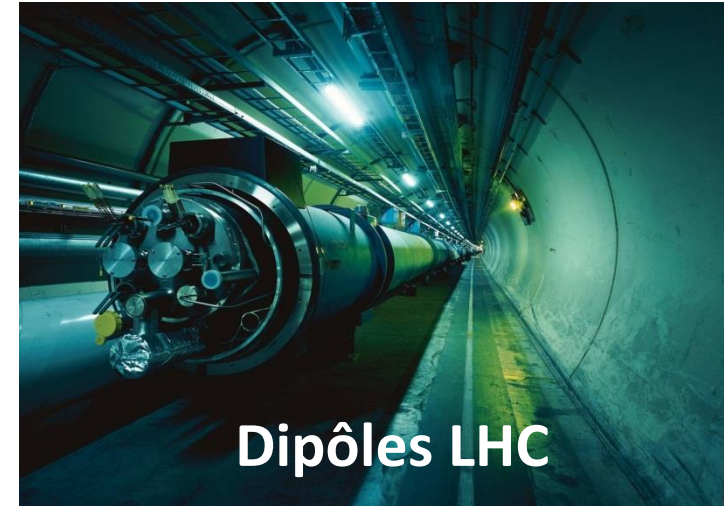
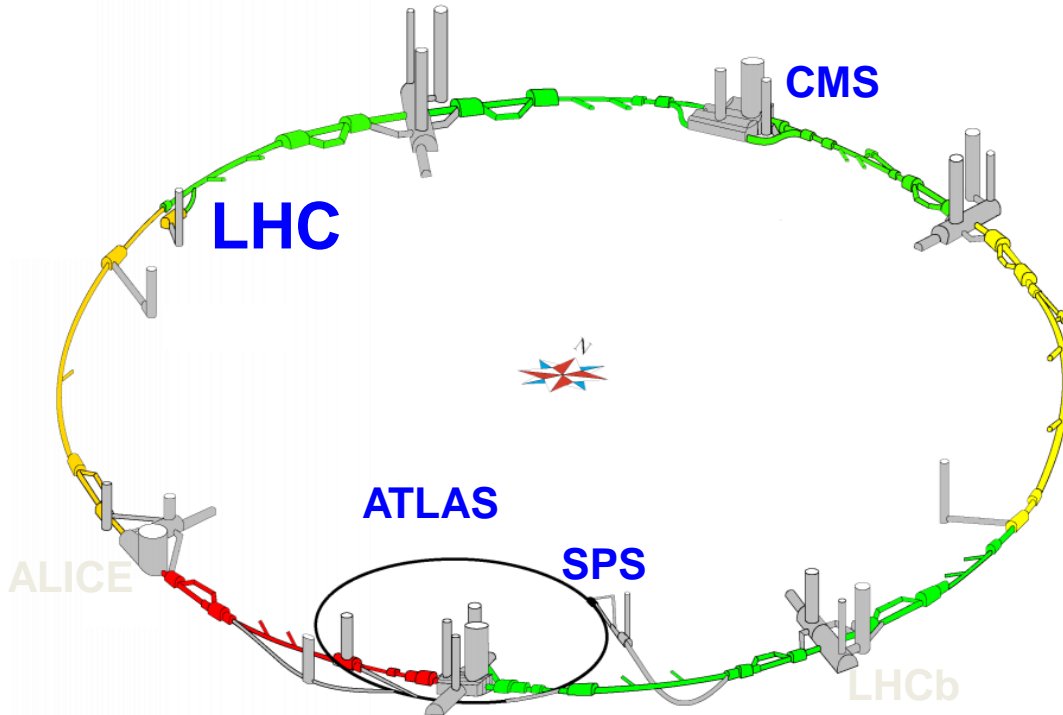
Le LHC: collisionneur proton-proton fonctionnant en synchrotron et en anneau de stockage (27 km circonférence)



Le LHC au CERN

LHC: collisionneur proton-proton 7+7=14 TeV

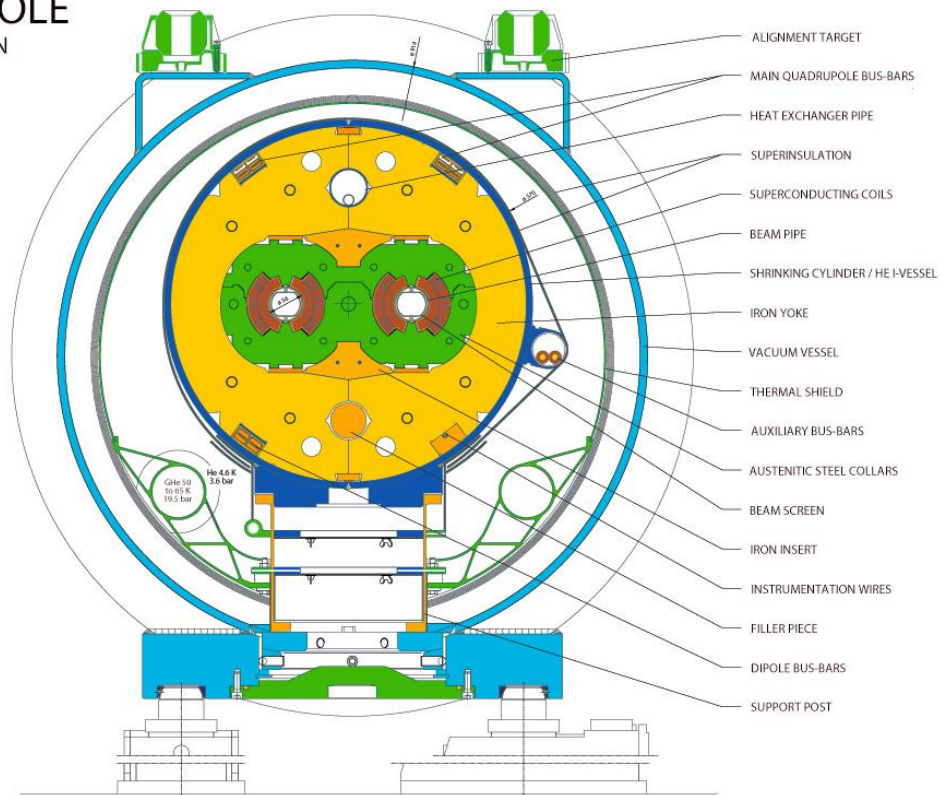
- ✓ facteur 7 en énergie
- ✓ facteur 100 en luminosité par rapport au Tevatron



Le LHC en chiffres

- 27 km, p-p à 7x7 TeV
3.5x3.5 TeV en 2011,
4 x 4 TeV in 2012
- 1232 dipôles de 15 m
- Champ magnétique 8.3 T pour 7 TeV
- Réfroidi à l'Helium superfluide à 1.9 K (130 tonnes He).
- Homogénéité de champ magnétique : 10^{-5}

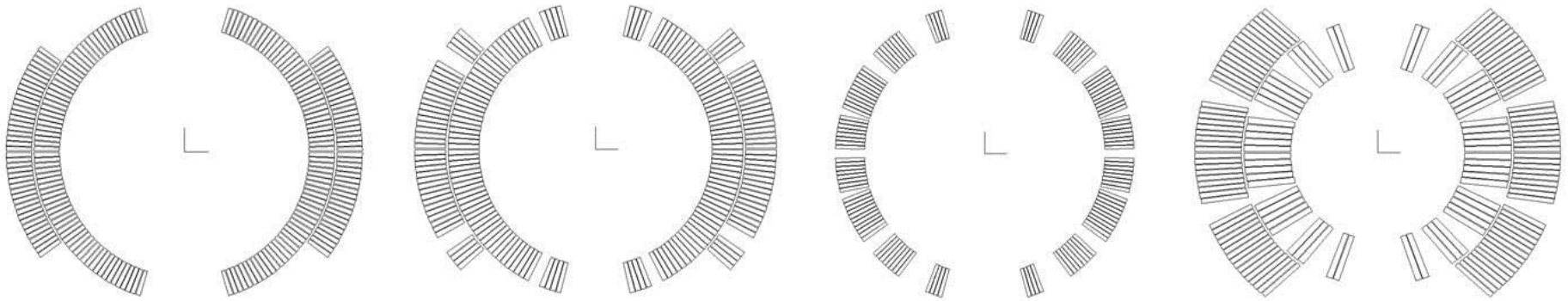
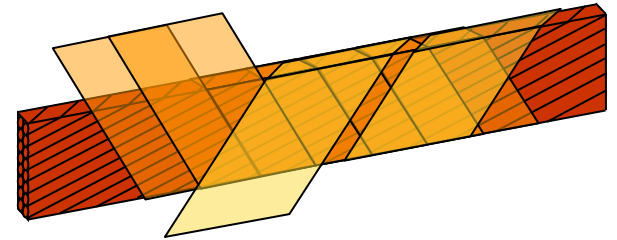
LHC DIPOLE
CROSS SECTION



CERN AC/DI/MM — 06-2001

Dipôles des machines existantes

- câble de Rutheford
- bobines supra ($\sim \cos\vartheta$)



Tevatron



HERA



RHIC



LHC

Un dipôle et ses harmoniques naturelles

La configuration dipolaire la plus simple est donnée par une paire de conducteurs:

$$B_c(z) = B_y + iB_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi(z - R_0)} - \frac{\mu_0 I}{2\pi(z + R_0)}$$

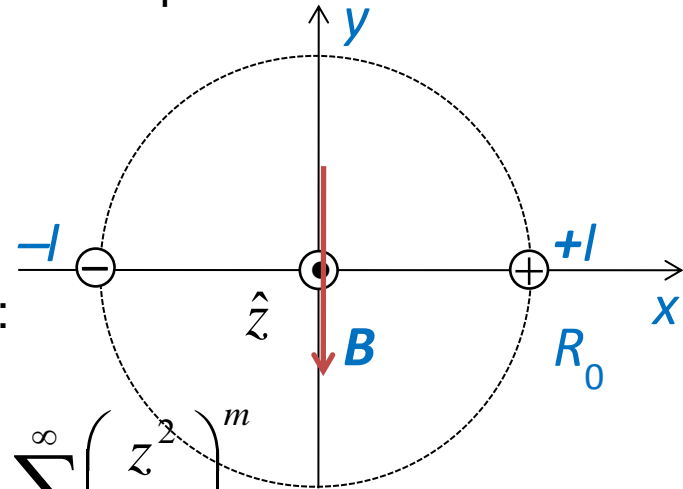
Cette expression peut être développée pour $|z| < R_0$:

$$B_c(z) = \frac{\mu_0 I R_0}{\pi(z^2 - R_0^2)} = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0 (1 - z^2/R_0^2)} = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{z^2}{R_0^2} \right)^m$$

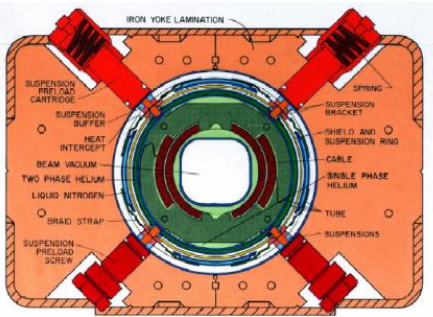
$$m = 0 \rightarrow \text{Dipole : } b_1 = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0} \quad ; \quad m = 2 \rightarrow \text{Décapole : } b_5 = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0^5}$$

$$m = 1 \rightarrow \text{Sextupole : } b_3 = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0^3} \quad ; \quad m \rightarrow (2m+1)\text{-pole : } b_{2m+1} = -\frac{\mu_0 I}{\pi R_0^{2m+1}}$$

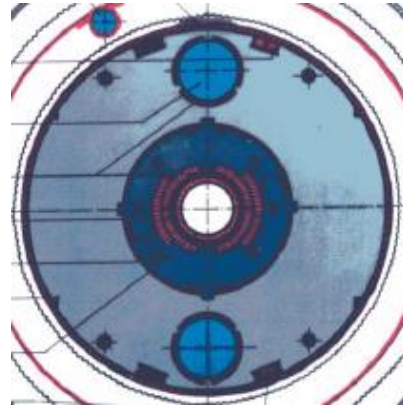
$$\text{Nappe en } \cos(\theta) : B_c(z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{R_i}^{R_e} \int_0^{2\pi} r dr d\theta [J(r) \cos \theta] \frac{1}{(z - r e^{i\theta})} = -\frac{\mu_0}{2} \int_{R_i}^{R_e} dr J(r)$$



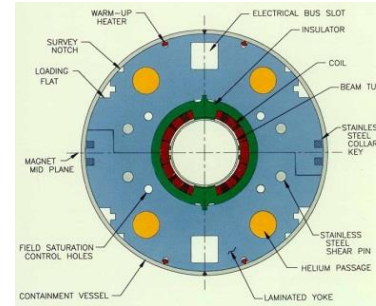
Montée en champs des dipôles



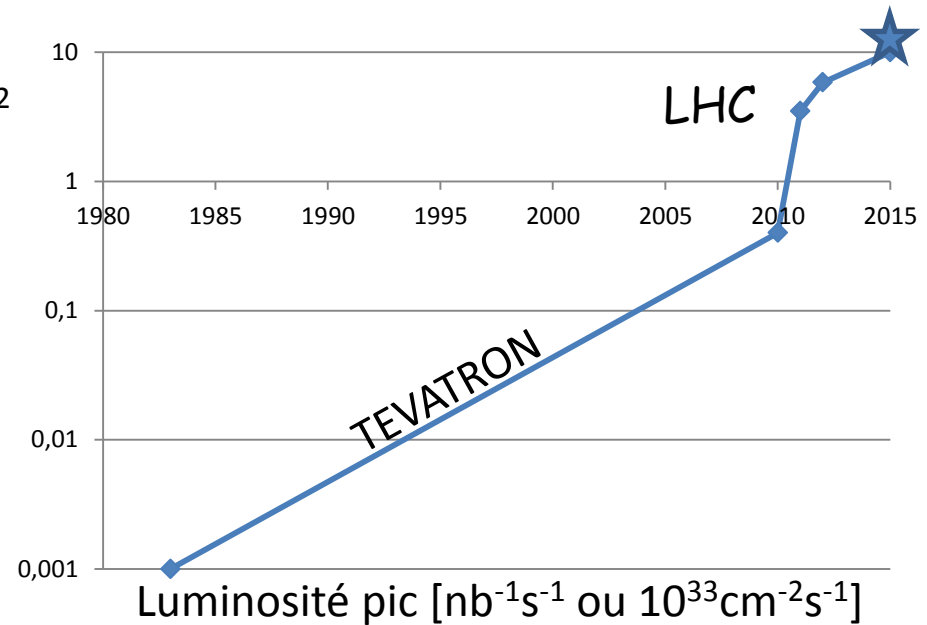
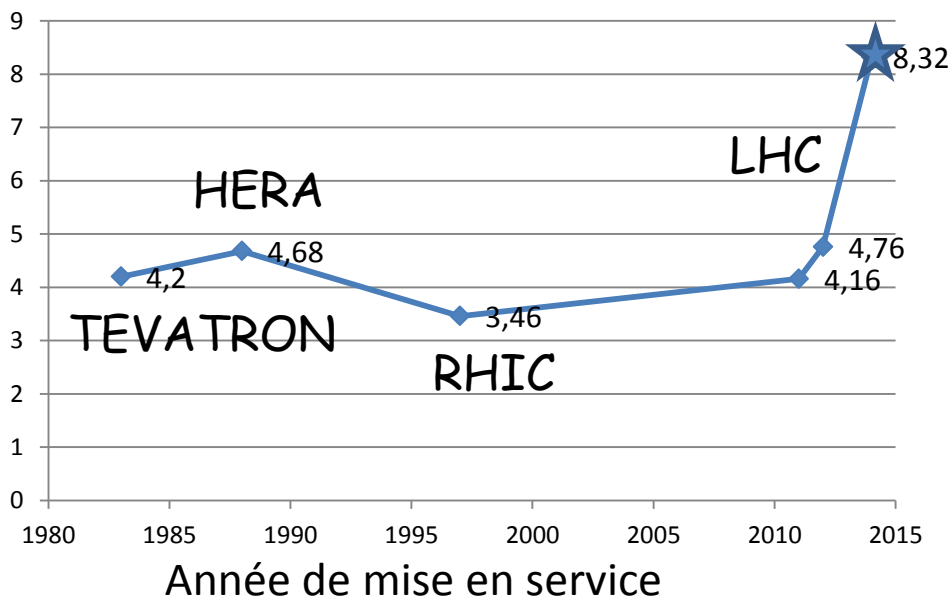
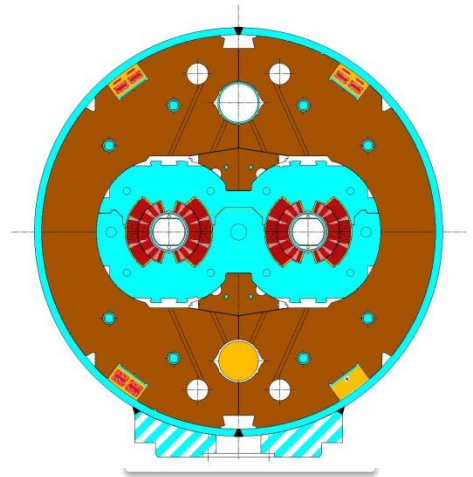
Tevatron



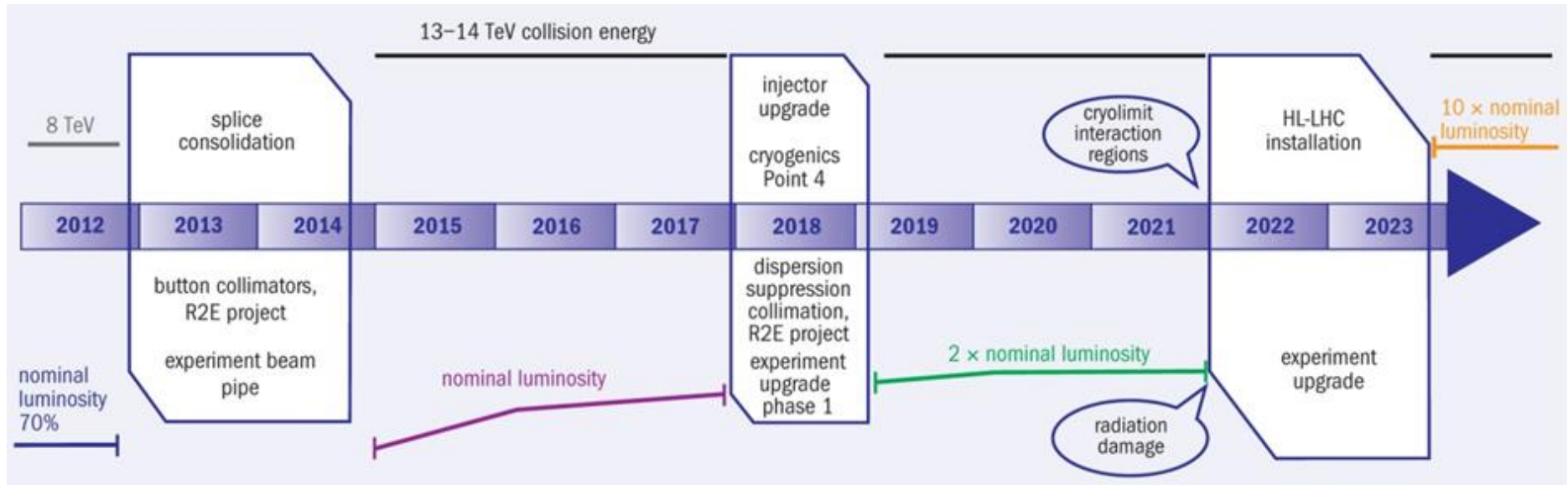
HERA



RHIC



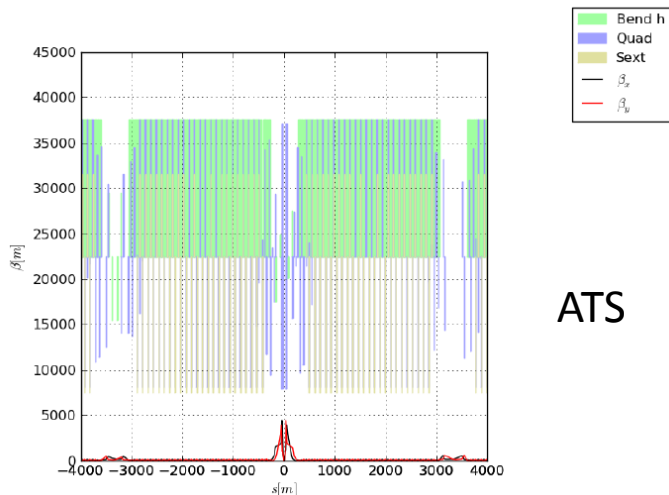
Le LHC : feuille de route à 10 ans



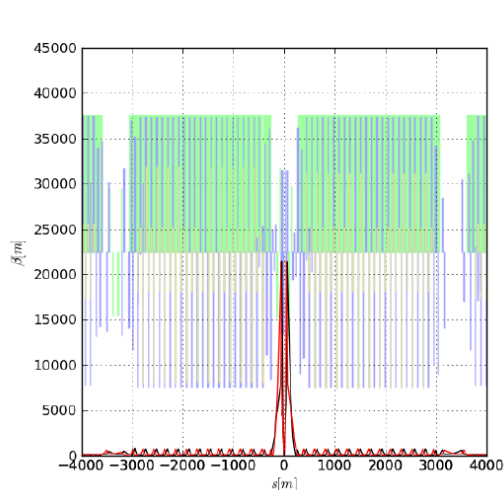
1^{ère} Transformation : HL-LHC : LHC à Haute luminosité

HL-LHC : focalisation finale

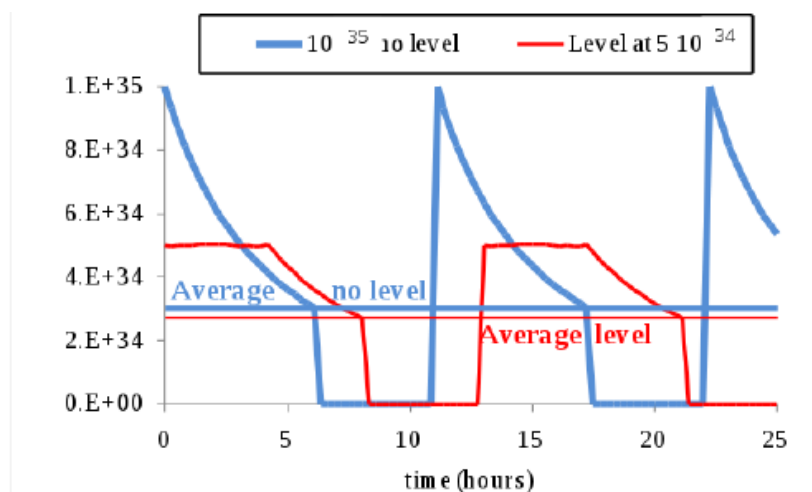
$\beta^* = 55 \text{ cm}$



$\beta^* = 15 \text{ cm}$



Le schéma 'Achromatic Telescopic Squeezing' (S. Fartoukh) prépare le faisceau dans les arcs pour une focalisation plus forte au point d'interaction.



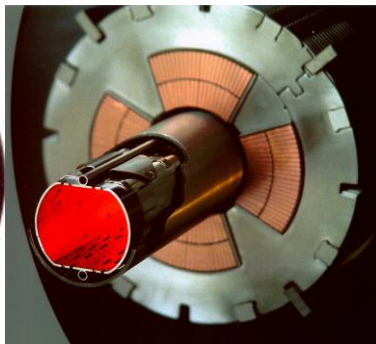
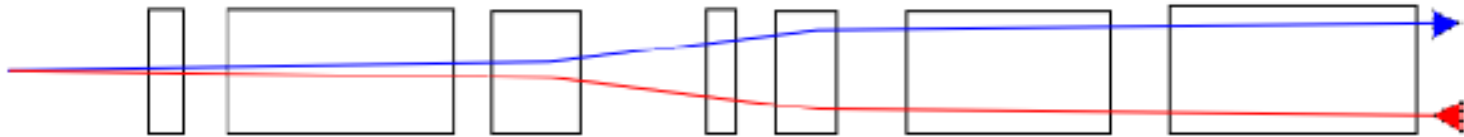
Luminosity leveling: change dynamically one beam parameter to compensate the natural luminosity decay starting the fill with a lower but, virtually possible, peak luminosity.

La luminosité pic est contrôlée en jouant sur les paramètres faisceaux au point de collision, e.g. l'angle de la collision.

HL-LHC : triplet de quadripôles

La plus forte focalisation finale implique une plus grande ouverture et donc un champ pic plus élevé dans les lentilles de focalisation (triplet de quadripôles).

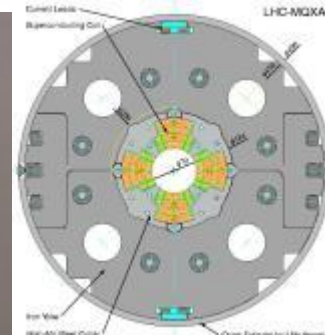
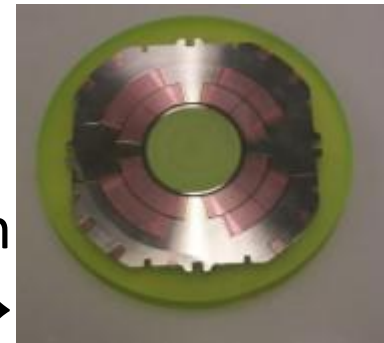
IP TAS Q1-Q3 D1 TAN D2 Q4-Q6 Q7-Q13



Quadripôles en $\cos(2\theta)$ du LHC:

← maille

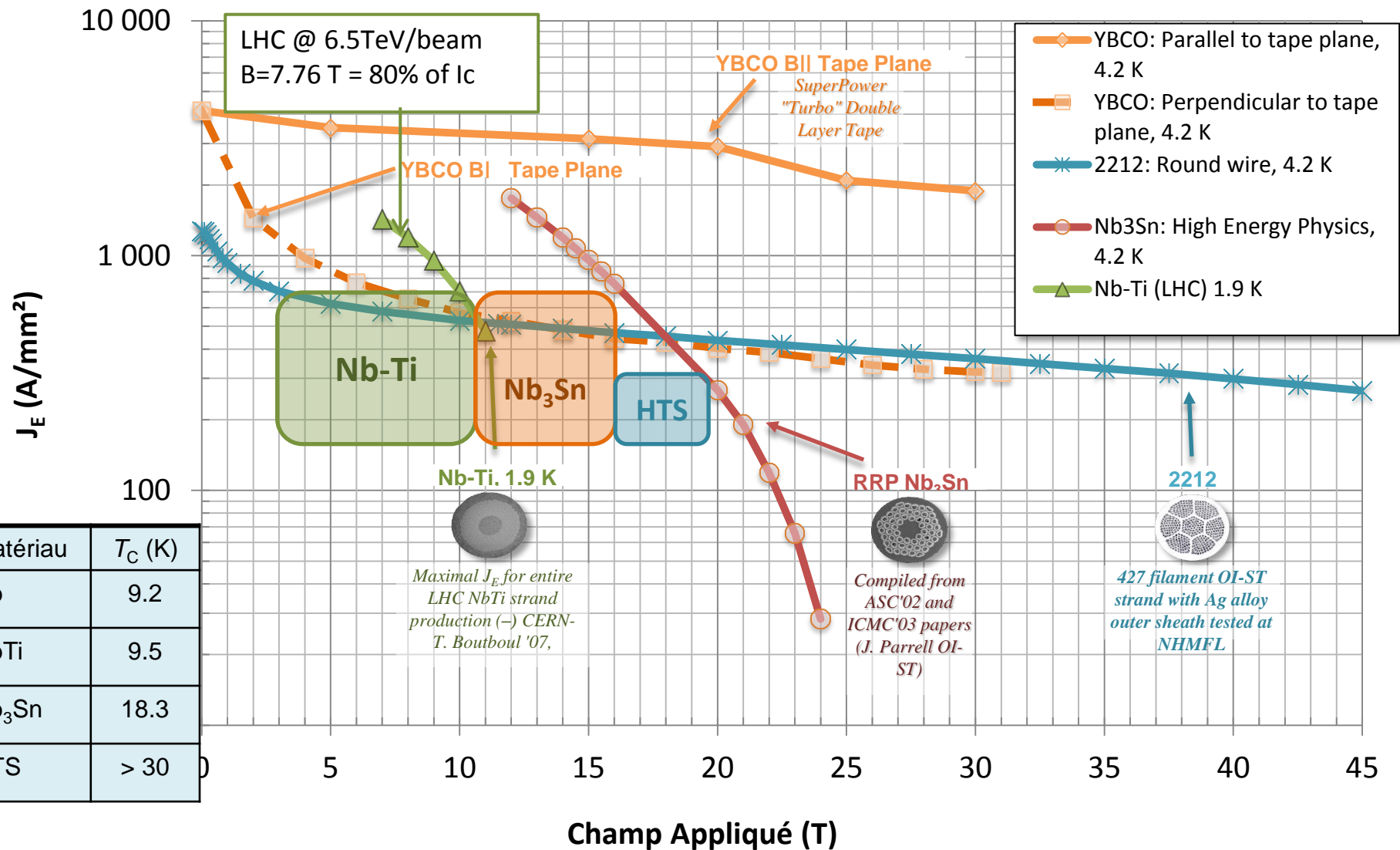
focalisation finale →

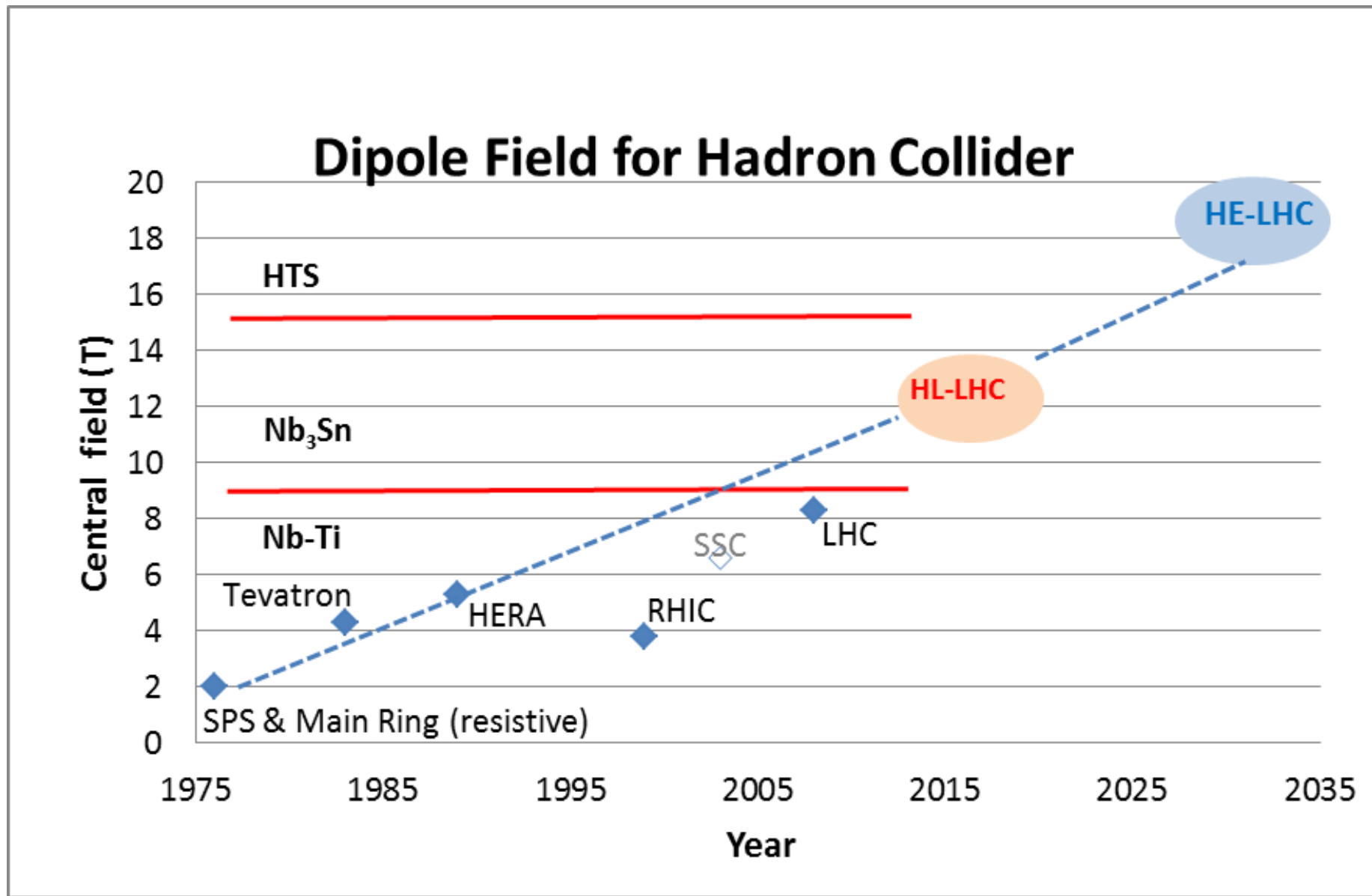


Changement des triplets Q1-Q3 et Q4-Q6 de quadripôles de focalisation finale en 2017 pour deux raisons:

- 1) tenue au radiation
- 2) $\beta^* = 15$ cm

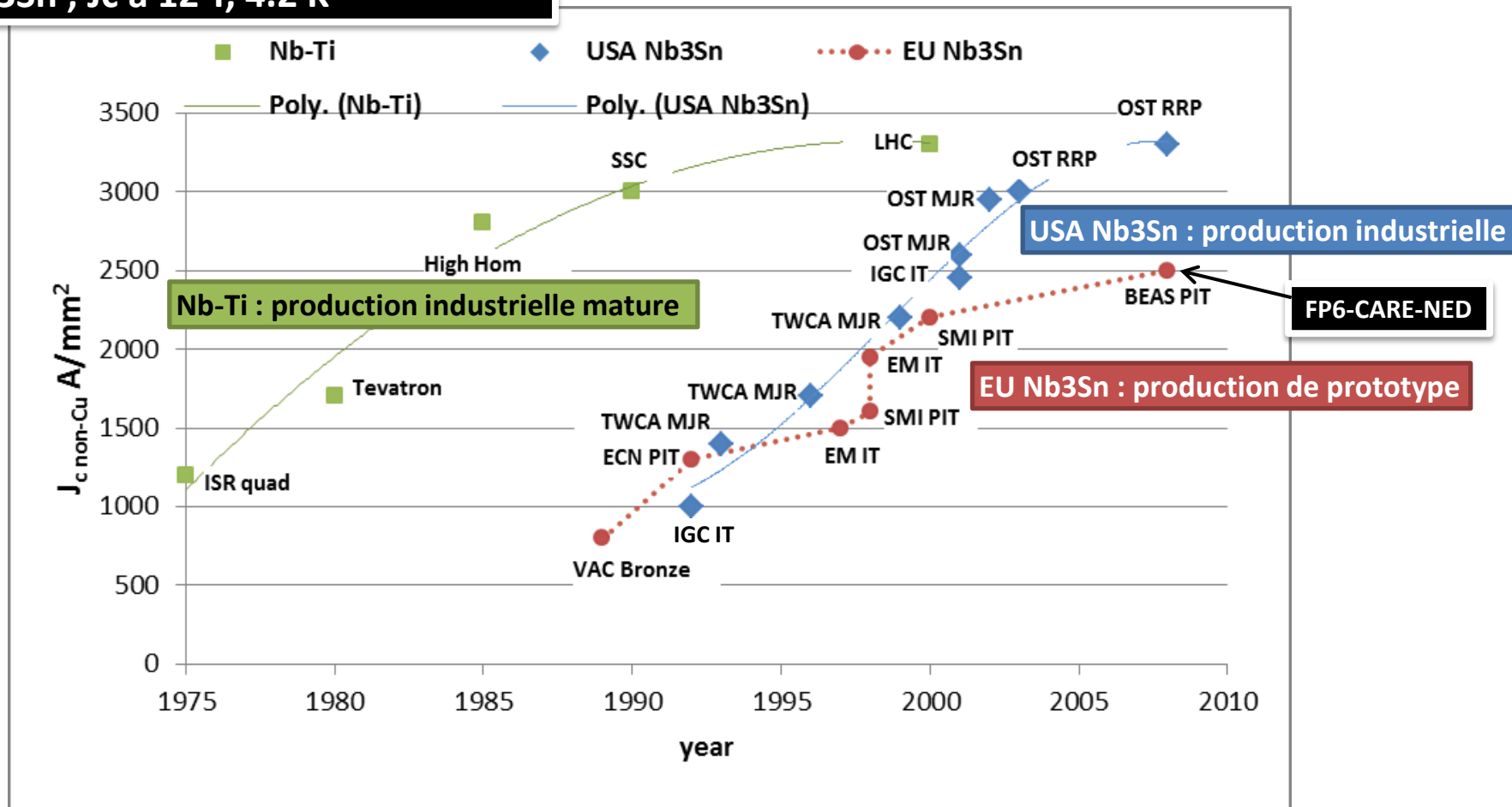
Les Câbles Supraconducteurs: Densité de Courant Critique J_c vs. Champs B





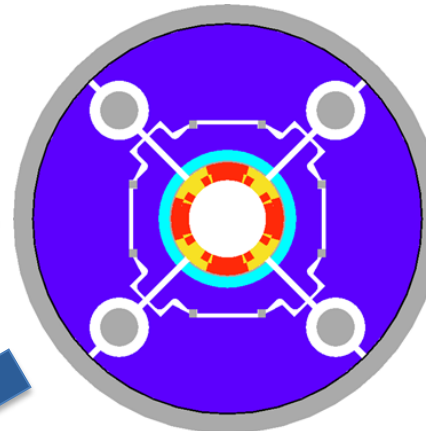
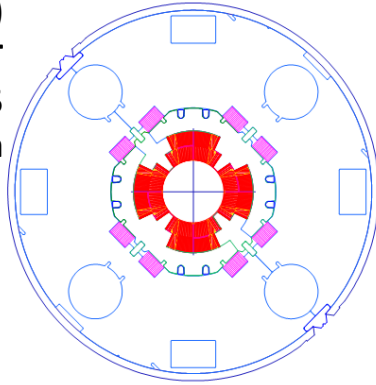
Conducteurs NbTi vs. Nb₃Sn

Nb-Ti : J_c à 5 T, 4.2 K (ou 8 T à 1.9K)
Nb₃Sn ; J_c à 12 T, 4.2 K



Quadripole $\cos(2\theta)$: de LHC à HL-LHC

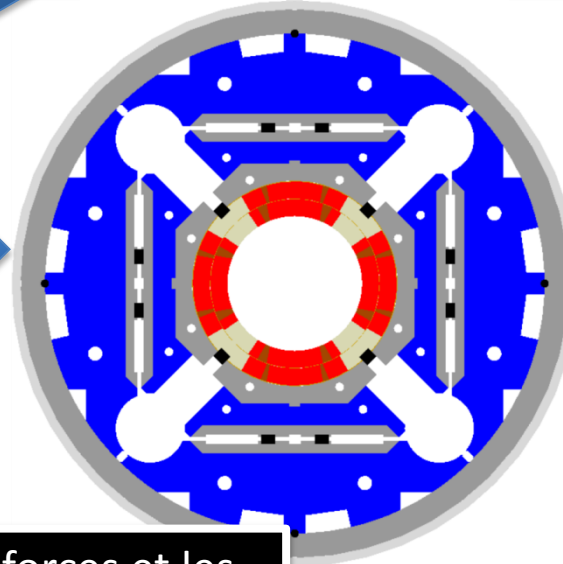
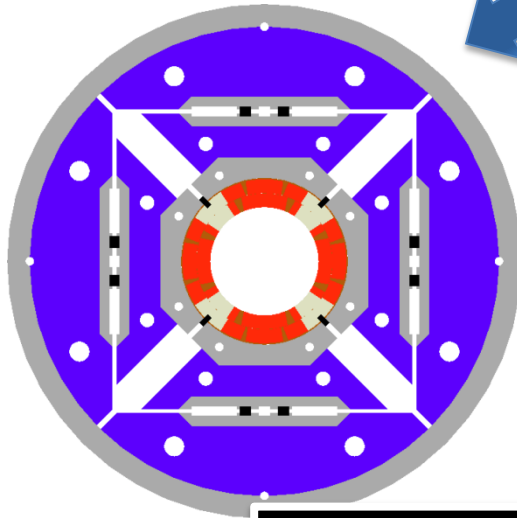
LHC (USA & JP, 5-6 m)
 $\varnothing 70$ mm, $B_{\text{peak}} \sim 8$ T
 1992-2005
 $G=215$ T/m



LARP TQS & LQ (4m)
 $\varnothing 90$ mm, $B_{\text{peak}} \sim 9$ T
 2004-2010
 $G=200$ T/m

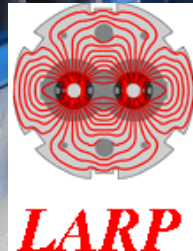
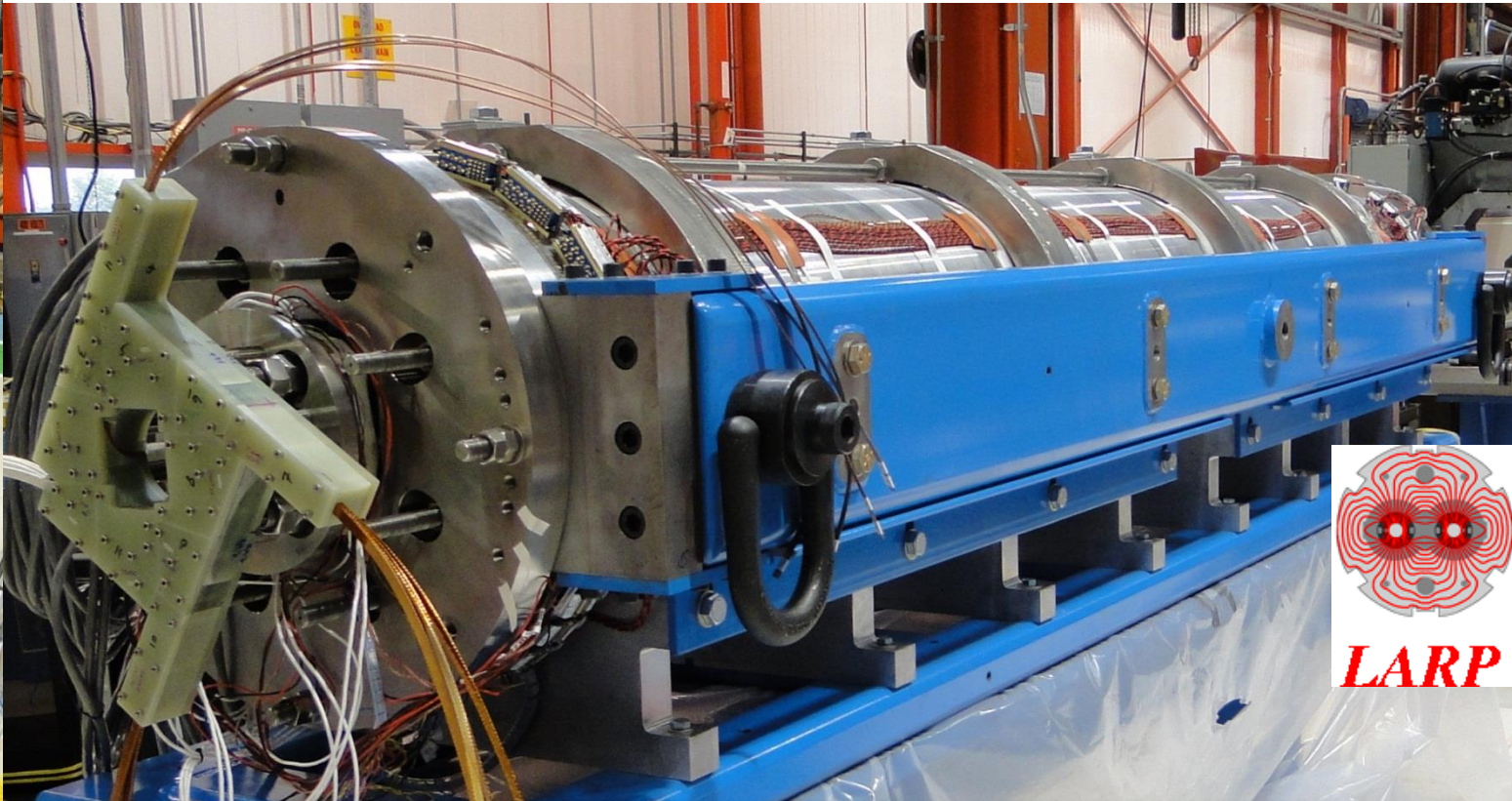


LARP HQ
 $\varnothing 120$ mm,
 $B_{\text{peak}} \sim 12.5$ T
 2008-2014
 $G=200$ T/m



LARP & CERN
 MQXF
 $\varnothing 150$ mm,
 $B_{\text{peak}} \sim 12.3$ T
 2013-2020
 $G=164$ T/m

Clé: maîtrise des forces et les
 énergies magnétiques $\sim R \times B^2$



4m longueur, 90 mm diamètre, 200 T/m à 1,9 K

LQS01a: 202 T/m à 1.9 K

LQS01b: 222 T/m à 4.6 K

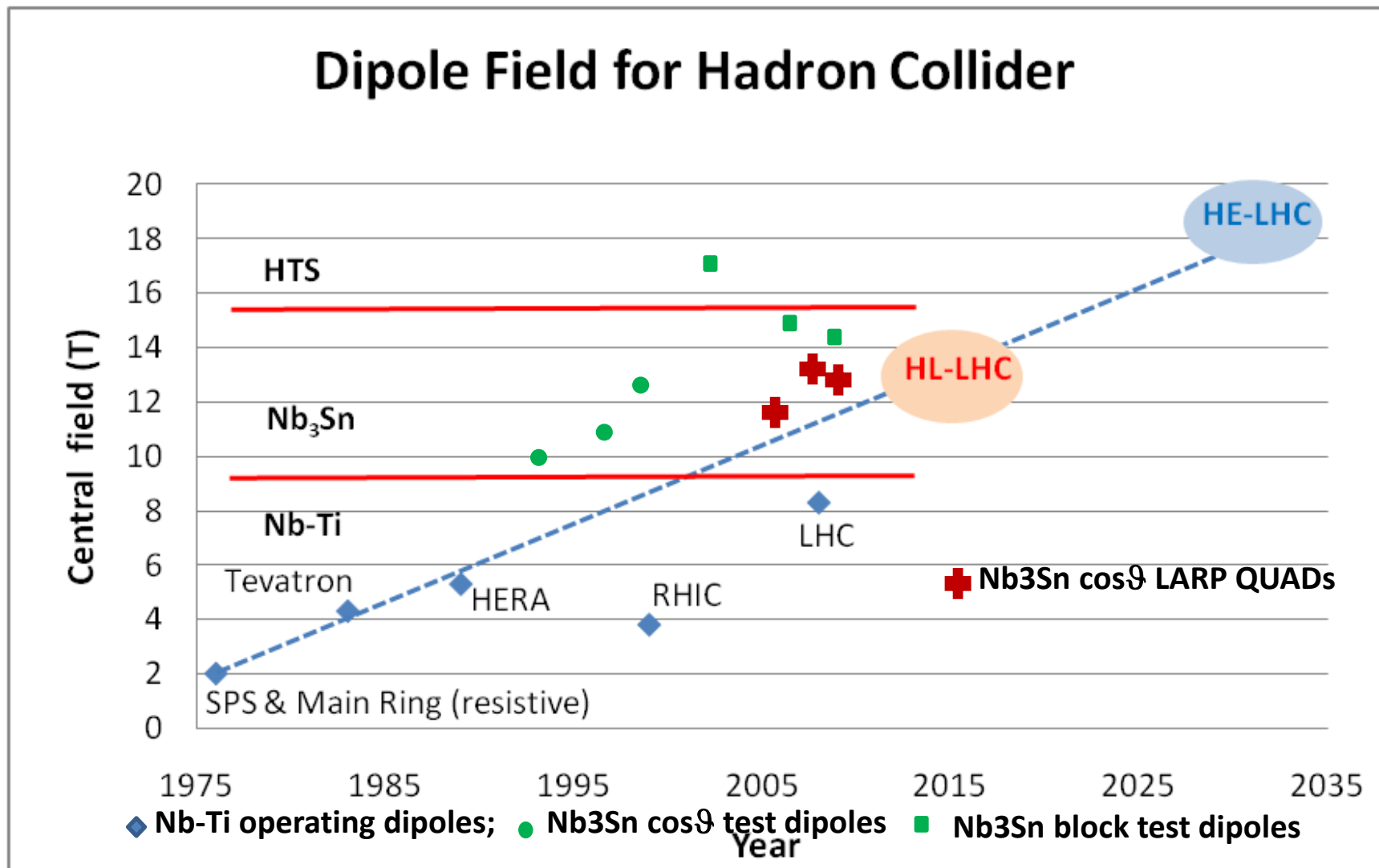
227 T/m à 1.9 K

LQS03: 208 T/m à 4.6 K

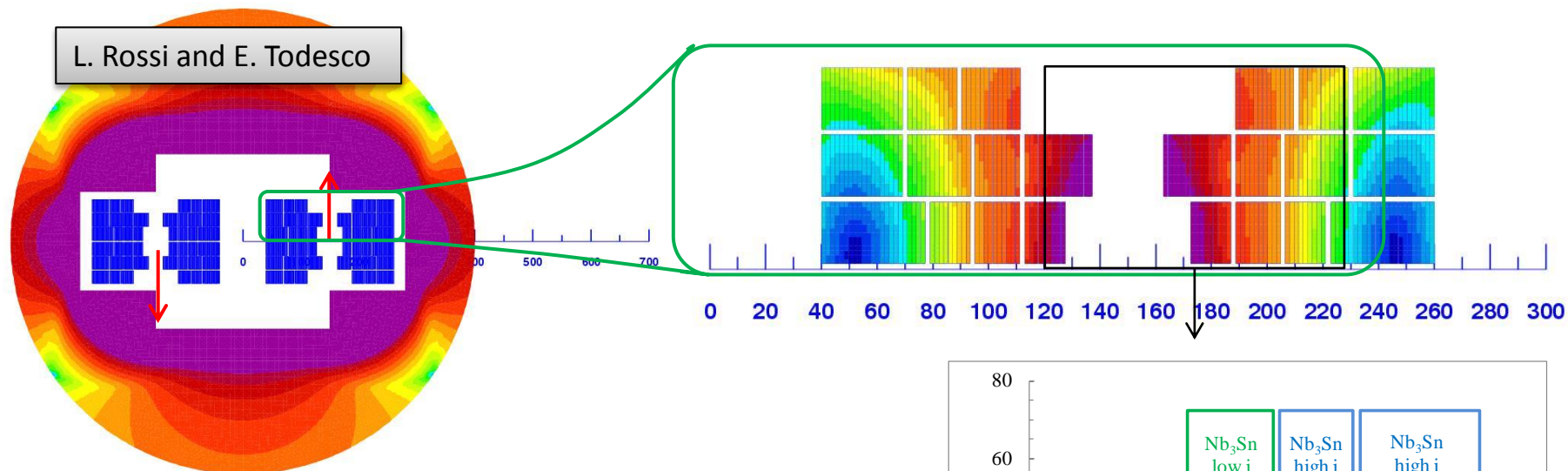
210 T/m à 1.9 K

1st quench: 86% limite des protos courts

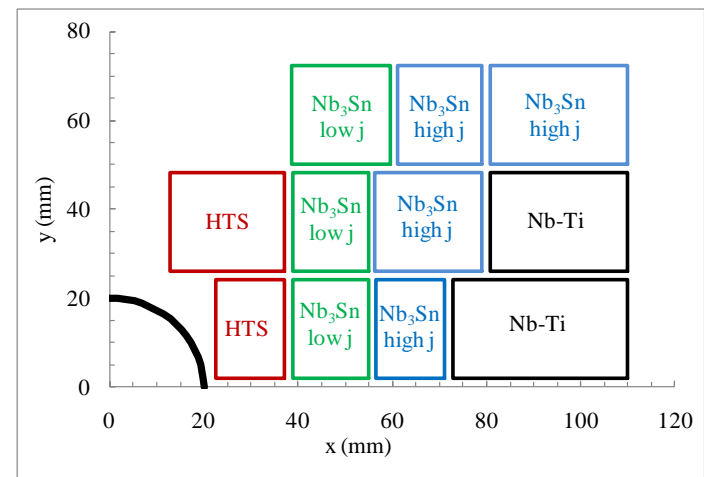
Nb₃Sn: champ pic 11-13 T pour HL-LHC



Modèle 2D d'Aimant Hybride 20 T



Material	N. turns	Coil fraction	Peak field	J_{overall} (A/mm ²)
Nb-Ti	41	27%	8	380
Nb3Sn (high Jc)	55	37%	13	380
Nb3Sn (Low Jc)	30	20%	15	190
HTS	24	16%	20.5	380



Conclusions de L. Rossi (CERN)

- HE-LHC déclenche des idées et des programmes de R&D pour repousser les limites technos.
 - HE-LHC: 1000 t de Nb-Ti, 1500 t de Nb3Sn, 500 t de HTS (ITER 400 t Nb3Sn@700 A/mm² 2K)
 - 10-15 années de R&D ne seront pas du luxe
- La mienne : → 30-45 années !!

John Osborne (CERN), Caroline Waaijer (CERN)

16 T \Rightarrow 100 TeV in 100 km
20 T \Rightarrow 100 TeV in 80 km

even better
100 km?

LEGEND

— LHC tunnel

••••• HE_LHC 80km option
● potential shaft location

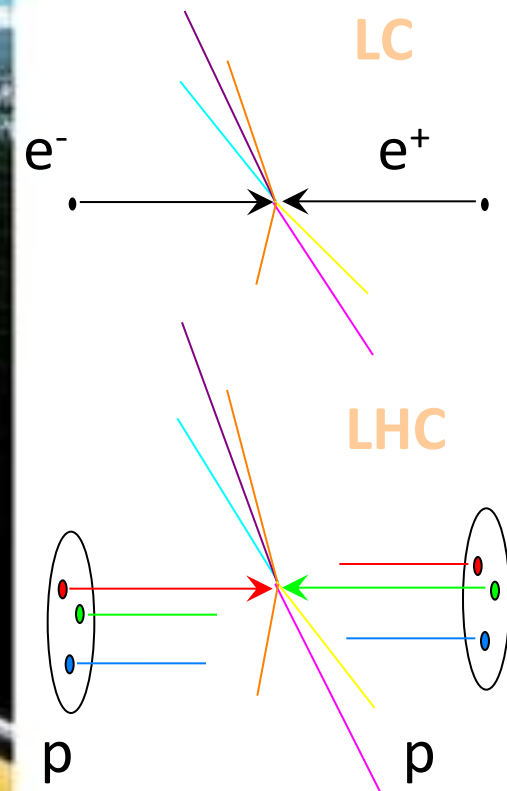
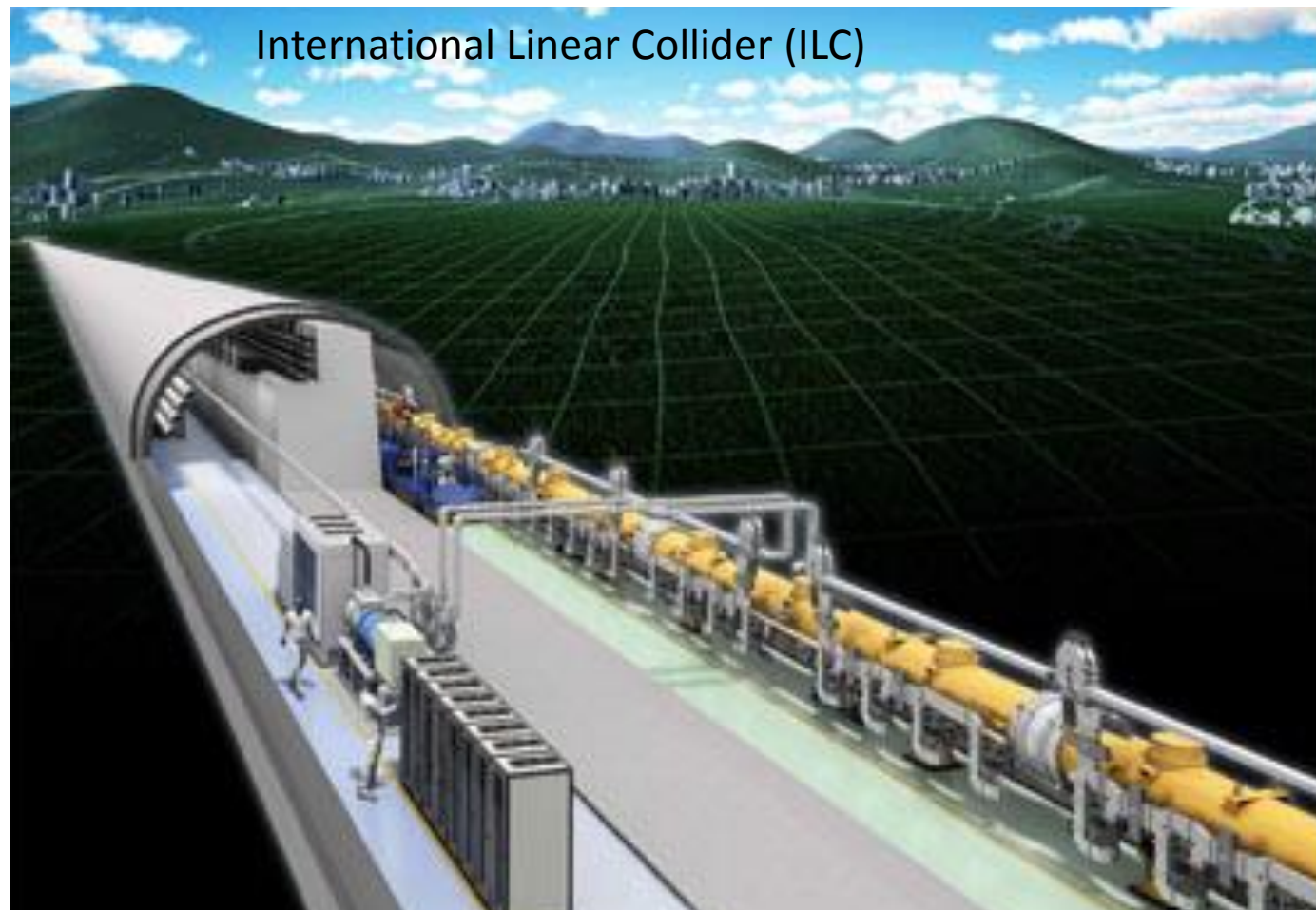
3 juillet 2013

G. Napolé

© 2012 Google
Image © 2012 GeoEye
Image © 2012 IGN France

Collisionneur de leptons

International Linear Collider (ILC)



Collisionneurs e^+e^- : Linéaire vs. Circulaire

Anneau: $P_{\text{faisceau}} = P_{\text{Synchrotron Radiation}} = U_{\text{RS}} I_{\text{faisceau}}$

avec $U_{\text{SR}} = 4\pi/3 r_e m_e c^2 (\beta\gamma)^4 / \rho$: voltage par tour
 $= 88.5 \text{ kV} \times E [\text{GeV}]^4 / \rho [\text{m}]$

e.g. LEP: $\rho = 3096 \text{ m}$, $I_{\text{faisc.}} = 2 \times 3 \text{ mA}$, $L \approx 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

\sqrt{s} [GeV]	100	200	500
U_{SR} [GV]	0.18	2.9	113
P_{SR} [MW]	1.1	17	664
P_{RF} [MW]	12 Cu	190 Cu 0.3 Nb	11 Nb

Par comparaison
l' ILC

$L \approx 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

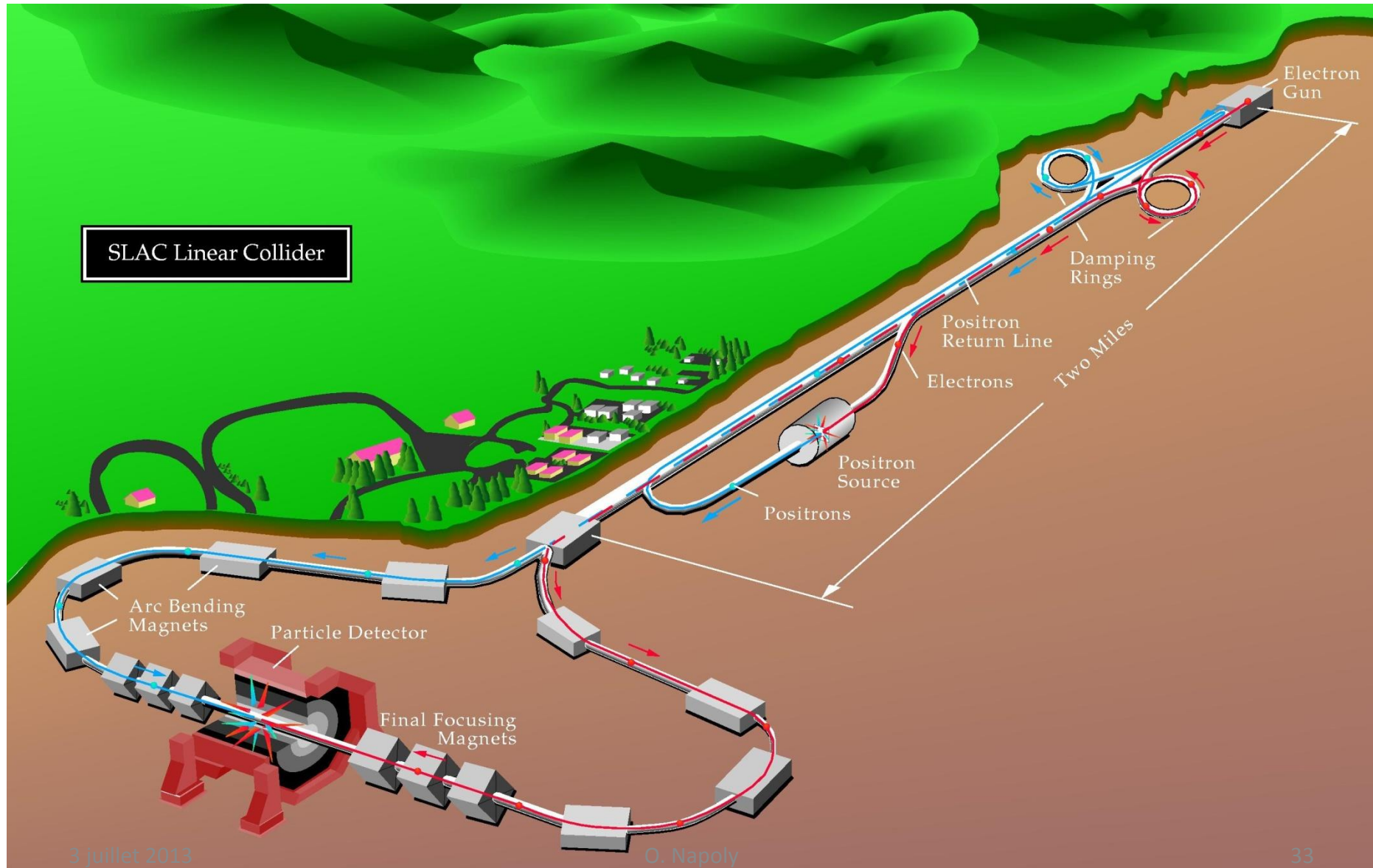
avec

$P_{\text{faisc.}} = 23 \text{ MW}$

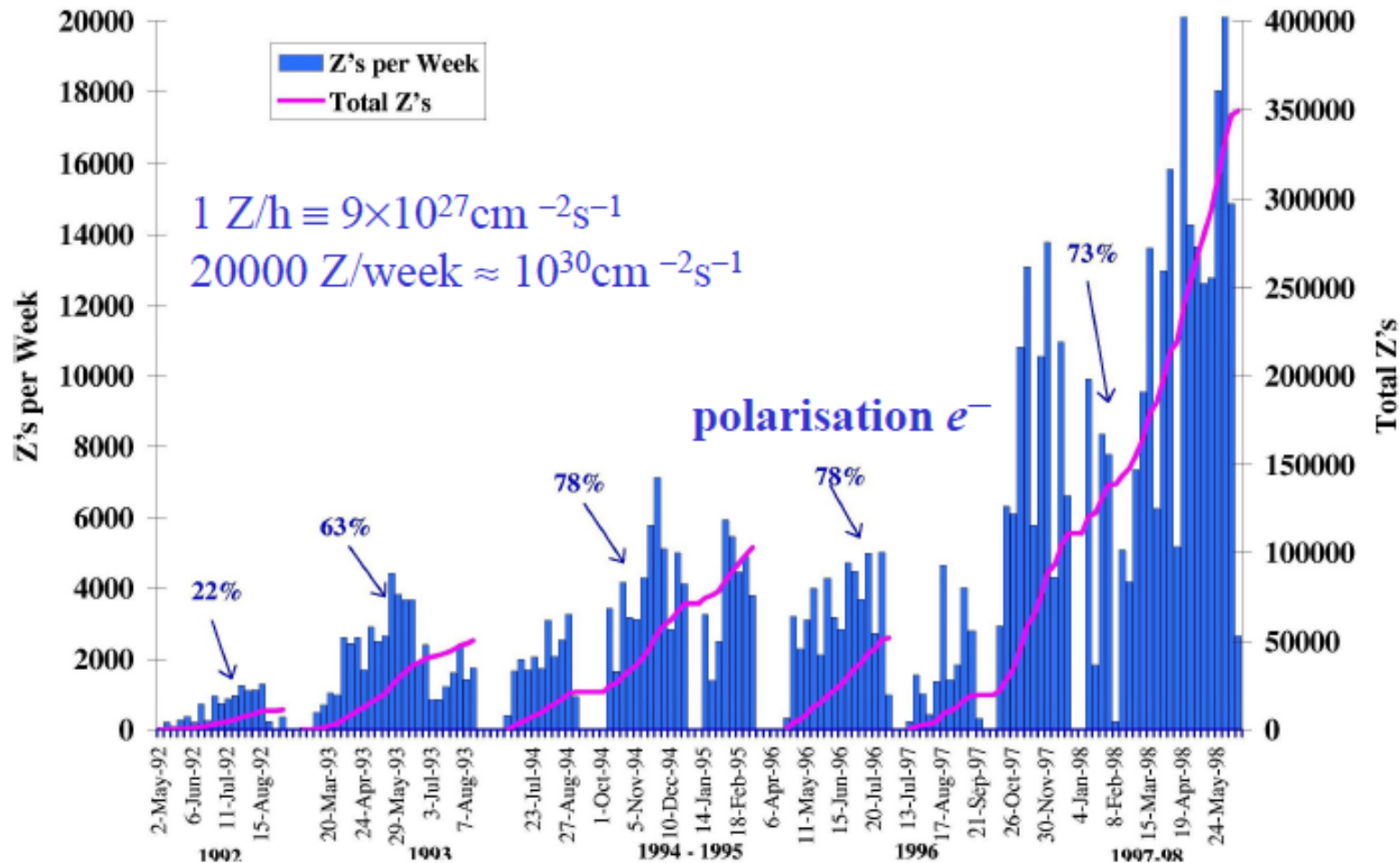
Les collisionneurs circulaires consomment trop de puissance à haute énergie.

SLC : SLAC Linear Collider

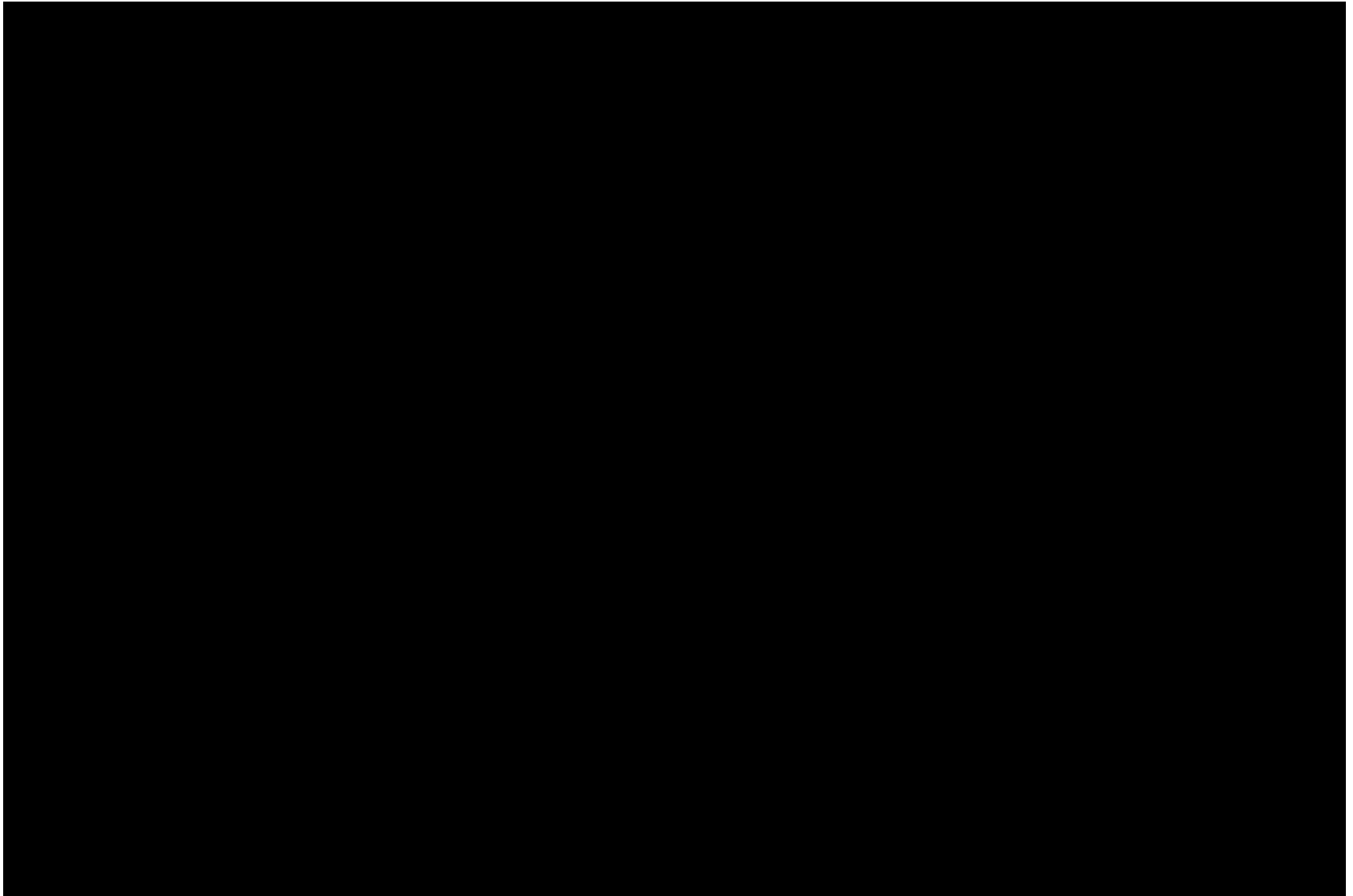
Collisionneur e+e-: usine à Z₀ (91 GeV)



1992-1998 : Luminosité dans SLD



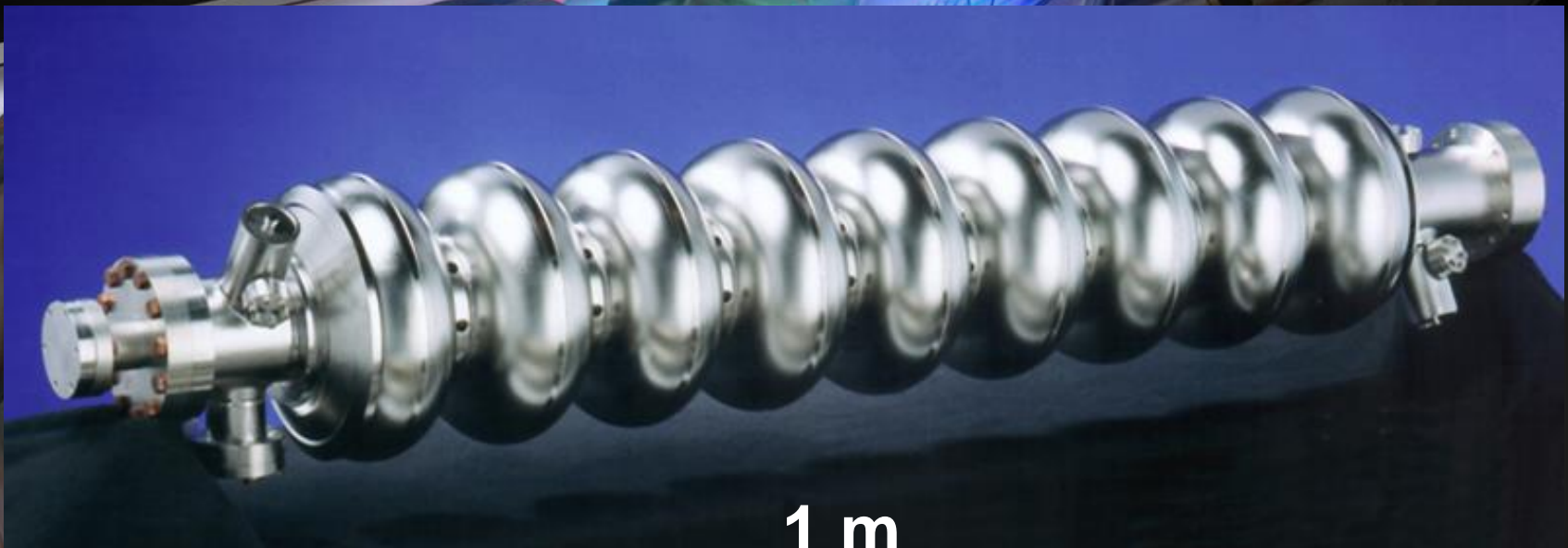
Le Collisionneur Linéaire International ILC



Cavités accélératrices TESLA

Cavités RF supraconductrices 9-cellules @ 1.3 GHz

Gain d'Énergie = 25-35 MV/m



1 m



Technologie RF Supraconductrice: TTC

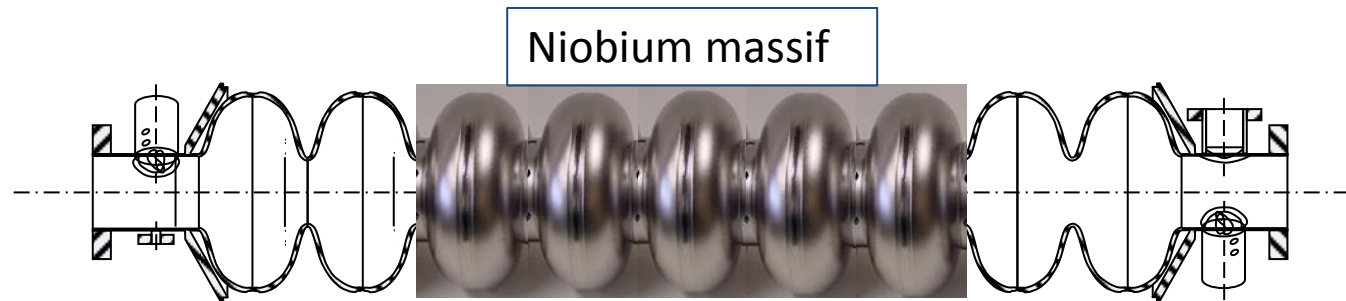
FNAL, ANL
SLAC
Cornell
JLAB
DESY
Orsay
Saclay
INFN Milan
KEK, Japan



Cavités Radio Fréquence

Cavité RF, 1.3 GHz

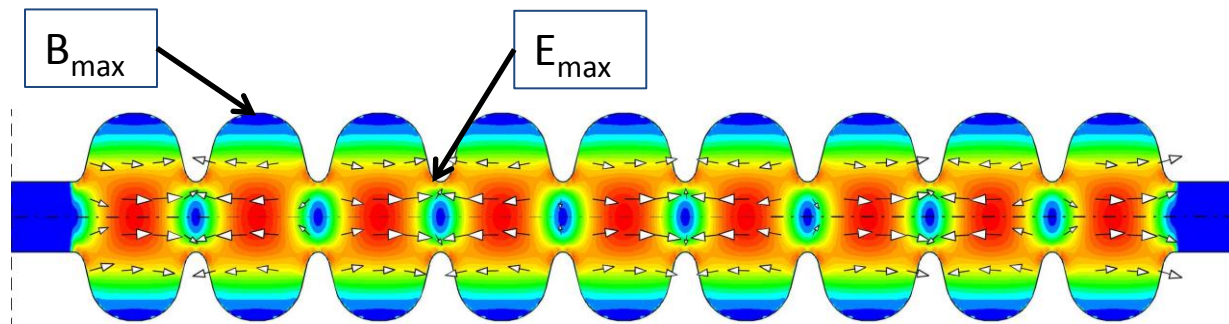
\varnothing iris = 7cm $\propto \omega_{RF}^{-1}$



Mode fondamental

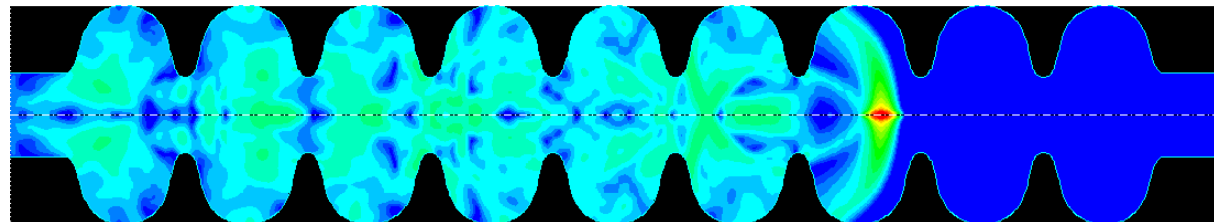
TM010, mode π

118 kW @ 23,6 MV/m



Champs de sillage

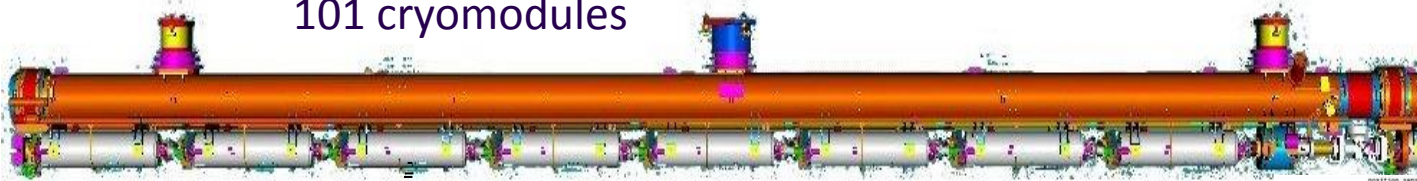
transverse $\propto \omega_{RF}^{-3}$



\Rightarrow Tolérances d'alignement $\sim 300 \mu\text{m}$

Accélérateur XFEL Supraconducteur

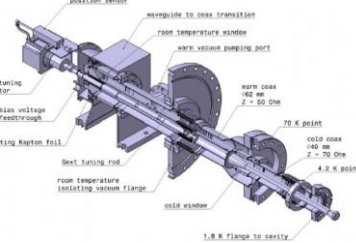
101 cryomodules



808 cavités
1.3 GHz / 23,6 MV/m



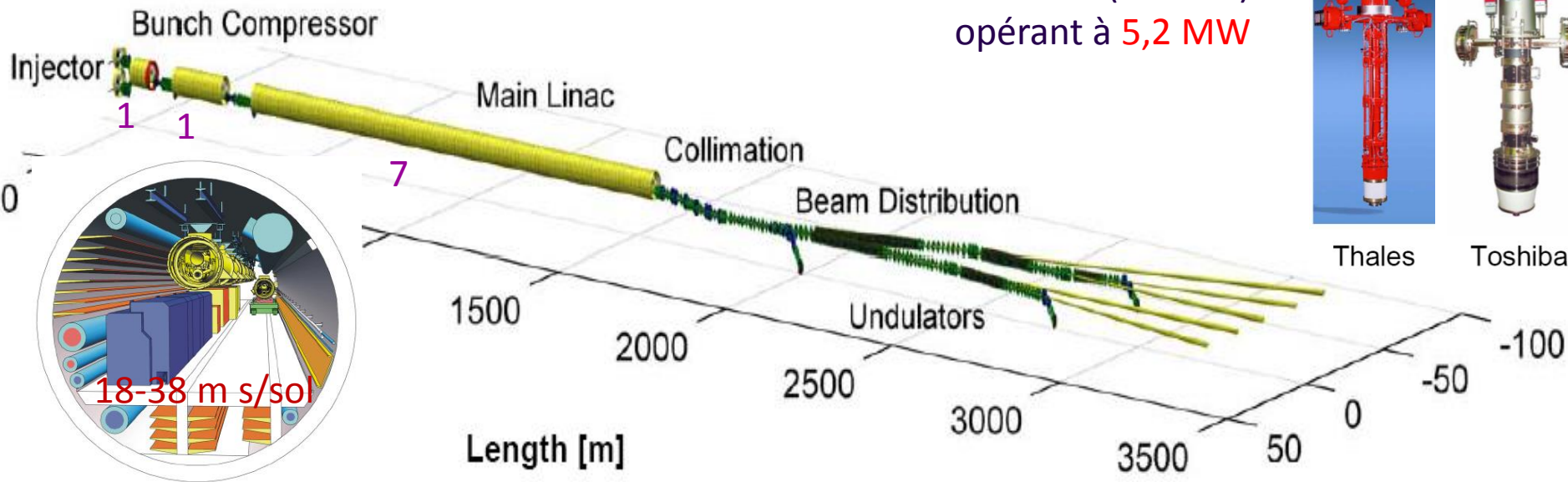
808 coupleurs RF
120 kW @ 5 mA



26 stations RF (10 MW)
opérant à 5,2 MW



Thales Toshiba



1 secteur cryogénique (12 modules) : 120 W @2K, 204 W @5-8K, 1,4 kW @40-80K

Salle blanche CEA-Saclay



Réception cavités et coupleurs



Laveur-sécheur



Premier train de cavités assemblé en salle blanche ISO4 (classe 10)

Infrastructures de montage des cryostats



Roulage du train de cavités hors salle blanche



Arrimage du train de cavités au cryostat



Alignement des cavités par LaserTacker



Transfert du cryomodule vers le hall enfourneur

Infrastructures de montage des cryostats



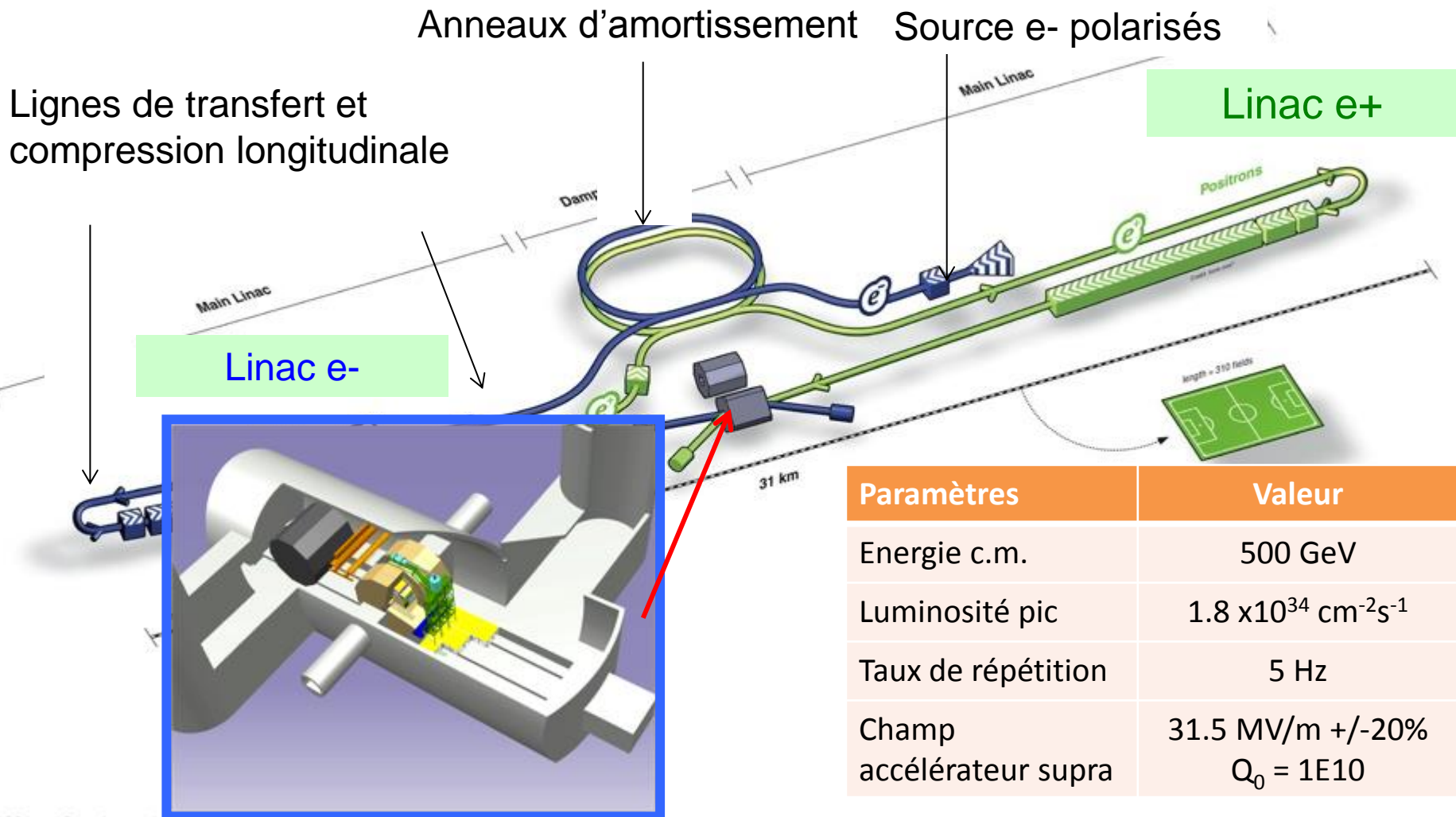
Positionnement sur l'enfourneur



Montage des coupleurs sous flux laminaire ISO5



Cryomodule enfourné avant montage des huit coupleurs



ILC Scheme | © www.form-one.de

ILC : Paramètres de base

Cahier des charges :

Luminosité : $\int L dt = 500 \text{ fb}^{-1}$ en 4 ans ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Energie de centre de masse : variable de 200 – 500 GeV

Résolution et stabilité en énergie: $< 0.1\%$

Polarisation des électrons: $> 80\%$

Paramètres de base, indépendants de l'énergie dans le centre-of-masse

Taux de collision	Hz	5	
Nombre de paquets		1312	2625
Population des paquets	$\times 10^{10}$	2	
Séparation des paquets	ns	554	366
Intensité dans le train	mA	5.8	8.8
Longueur de l'impulsion	μs	730	960
RMS bunch length	mm	0.3	
Emittance horizontale	mm	10	
Emittance verticale	nm	35	
Polarisation e-	%	80	
Polarisation e+	%	30	

Luminosity
Upgrade

Optimisés pour 500 GeV

Centre-of-mass energy	GeV	200	230	250	350	500
Electron RMS energy spread	%	0.21	0.19	0.19	0.16	0.12
Positron RMS energy spread	%	0.19	0.16	0.15	0.10	0.07
IP horizontal beta function	mm	16	16	12	15	11
IP vertical beta function	mm	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
IP RMS horizontal beam size	nm	904	843	700	662	474
IP RMS vertical beam size	nm	9.3	8.6	8.3	7.0	5.9
Vertical disruption parameter		20.4	20.4	23.5	21.1	24.6
Enhancement factor		1.83	1.83	1.91	1.84	1.95
Geometric luminosity	$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.25	0.29	0.36	0.45	0.75
Luminosity	$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.50	0.59	0.75	0.93	1.8
% luminosity in top 1% DE/E		92%	90%	84%	79%	63%
Average energy loss		1%	1%	1%	2%	4%
Pairs / BX	$\times 10^3$	41	50	70	89	139
Total pair energy / BX	TeV	24	34	51	108	344

<http://ilc-edmsdirect.desy.de/ilc-edmsdirect/item.jsp?edmsid=D00000000925325>

cea Quest for Birth-Evolution of Universe

International Linear Collider (ILC)

Quest for Unifying Matter and Force



Lepton CP Asymmetry

**Scientific Activities
Technology Innovation
Encouraging Human Resources**

Beyond Standard Physics

Power-Upgrade

Super-KEKB



J-PARC



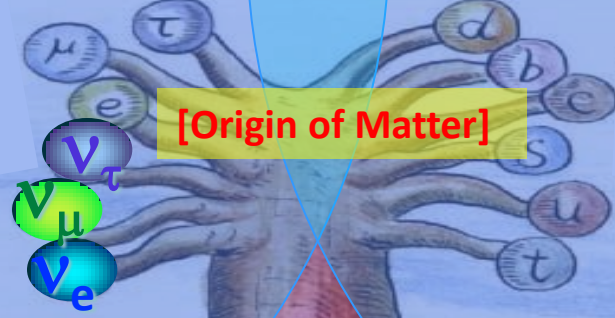
LHC



KEK-B

Quark CP Asymmetry

Lepton
Quest for Neutrinos



[Origin of Matter]



M. Kobayashi / T. Maskawa

Quest for 6 Quarks



M. Koshihara

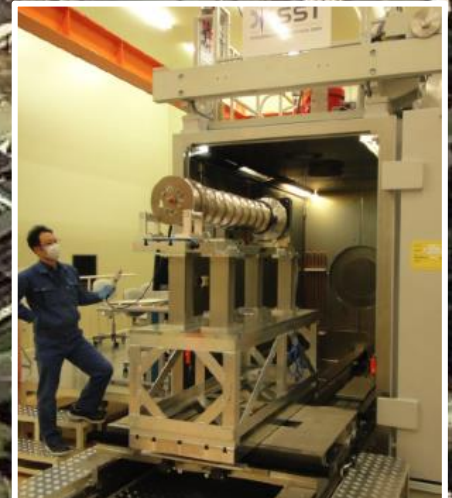
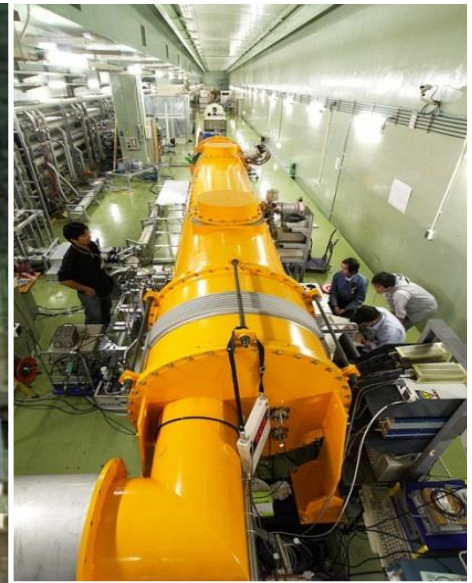
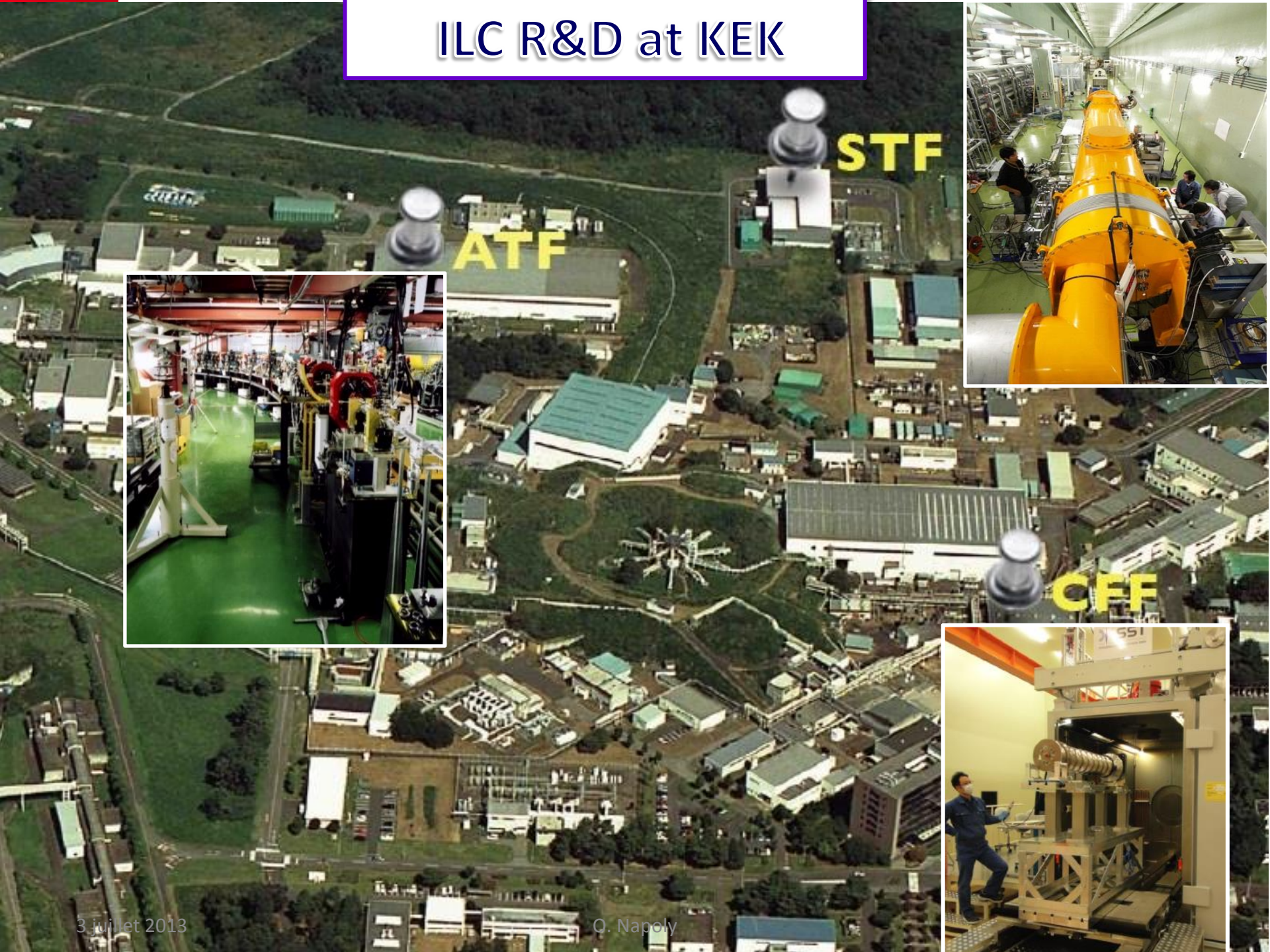
[Origin of Force]

Higgs Particle [Origin of Mass]

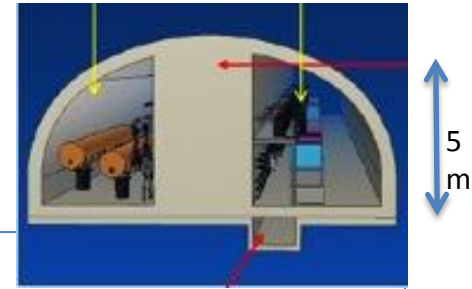


Y. Nambu

ILC R&D at KEK



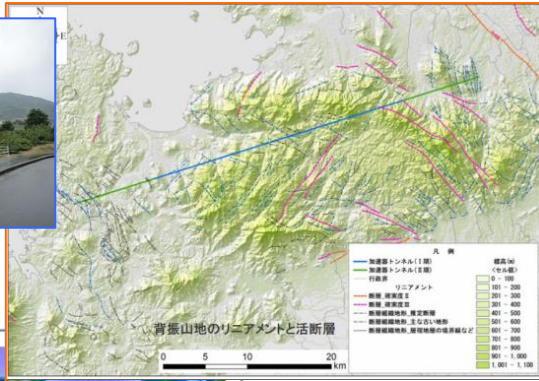
Deux sites candidats au Japon



- Japanese Mountainous Sites -



SEFURI

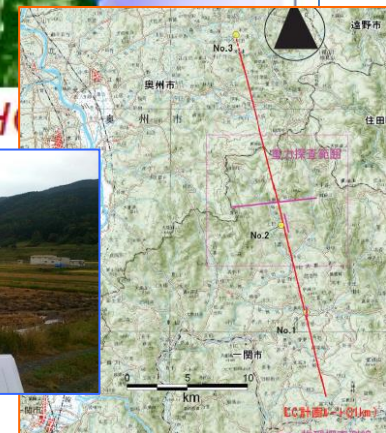


Site-A KITAKAMI



TOHOKU

Tokyo



ILC Plan in Japan

- Japanese HEP community proposes to host ILC based on the “staging scenario” to the Japanese Government.
 - ILC starts as a 250GeV Higgs factory, and will evolve to a 500GeV machine.
 - Technical extendability to 1TeV is to be preserved.
- It is assumed that one half of the cost of the 500GeV machine is to be covered by Japanese Government. However, the share has to be referred to inter-governmental negotiation.
- Data taking starts before 2030

Yamauchi-san,
Directeur de la Physique à KEK

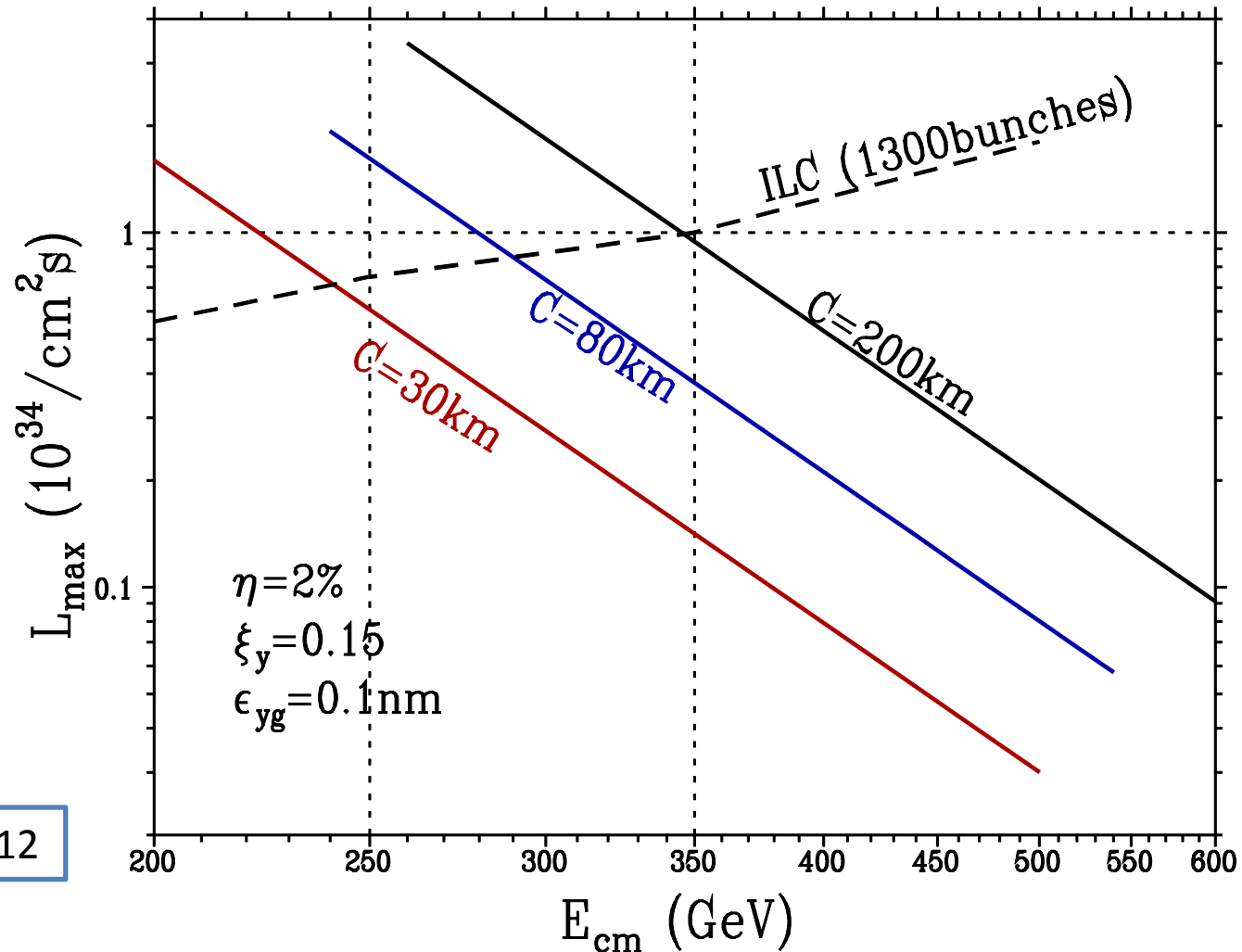
Empreinte de l'ILC au CERN



Collisionneurs e+e-: Luminosité vs. Energie

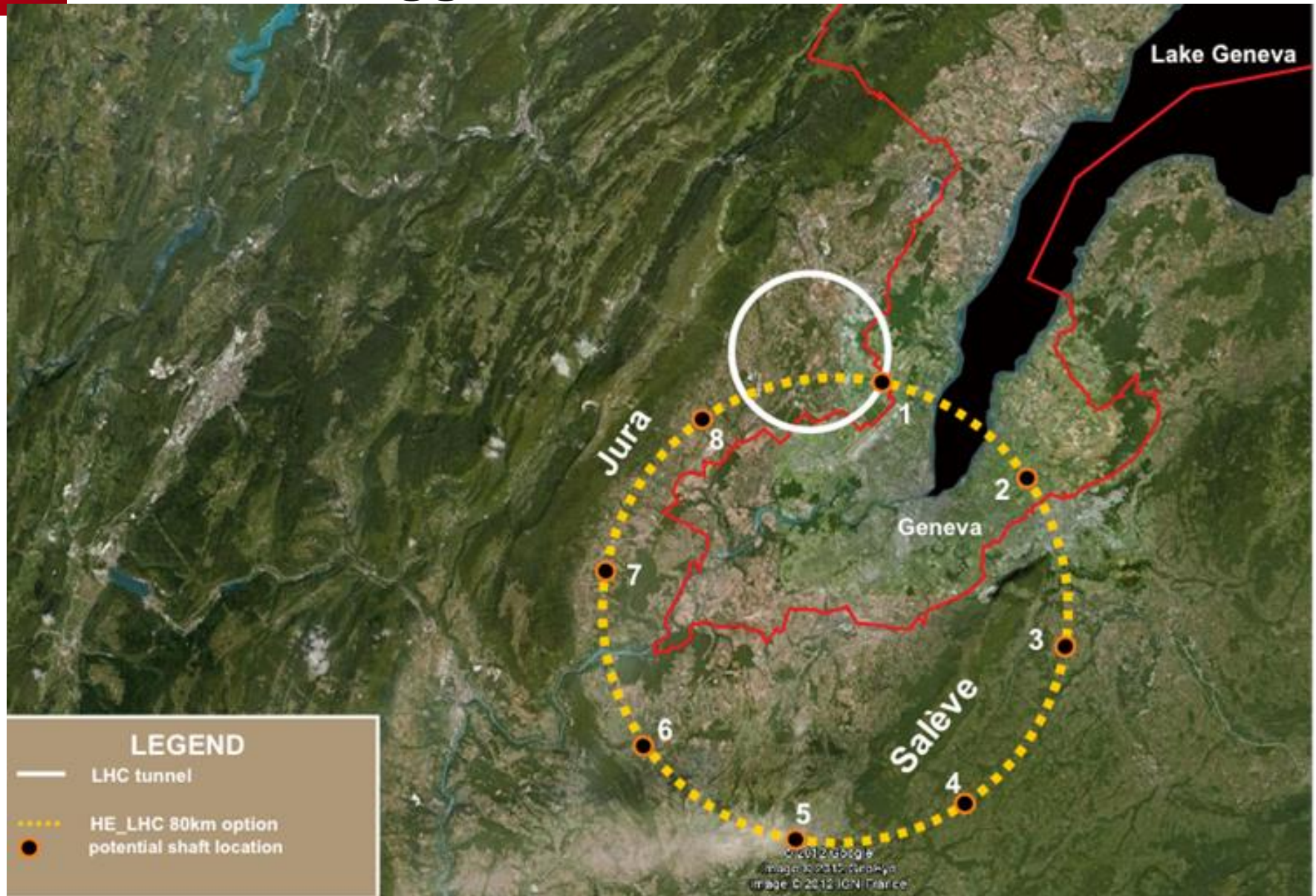
Exemple pour une puissance dissipée par rayonnement synchrotron de 100MW.

à 'basse' énergie
les circulaires
sont plus
lumineux.



Yokoya, Arlington, Oct.2012

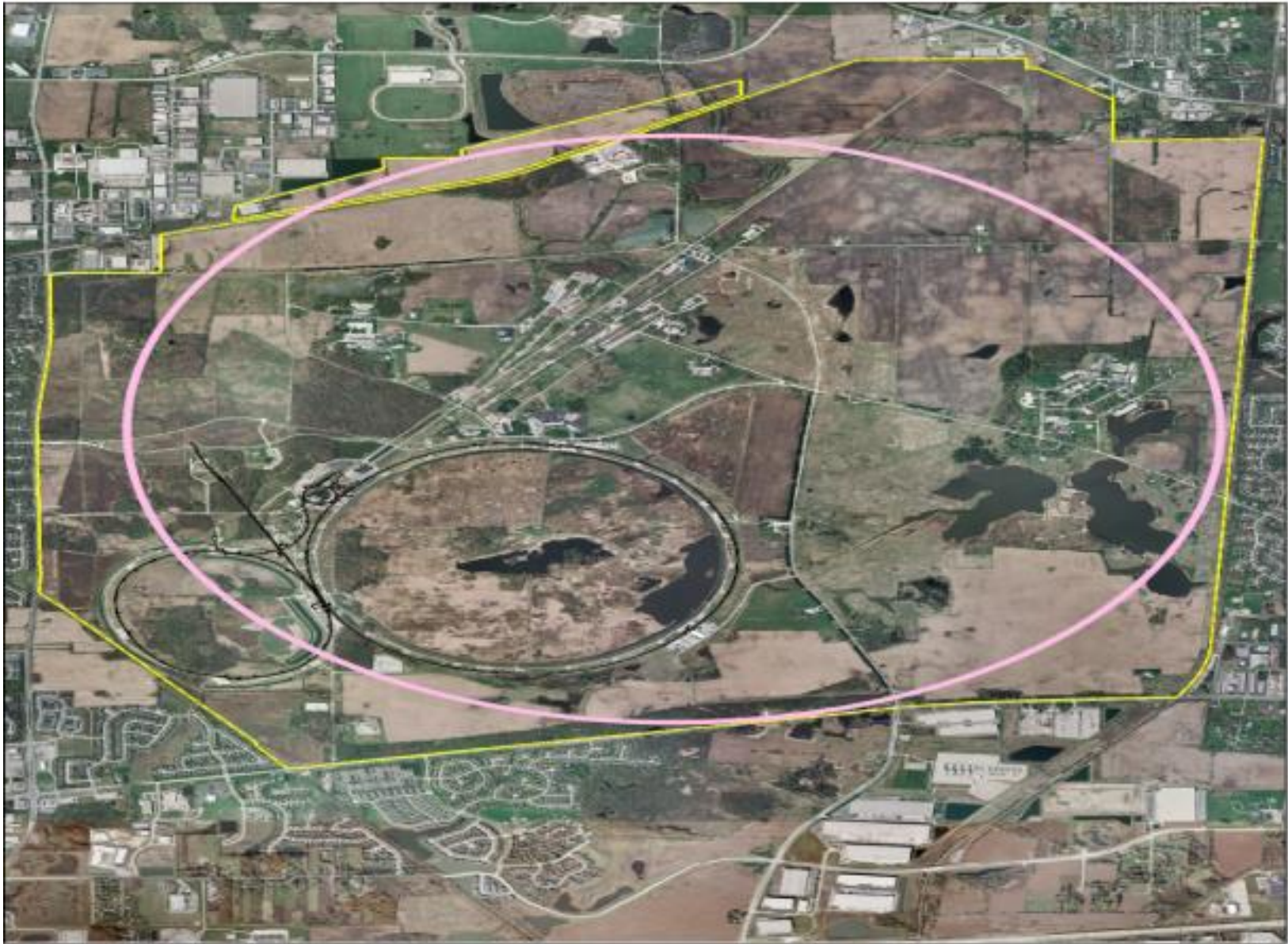
Usine à Higgs Circulaire au CERN: 80 km



Usine à Higgs Circulaire au Japon: 40 km



Usine à Higgs Circulaire à Fermilab



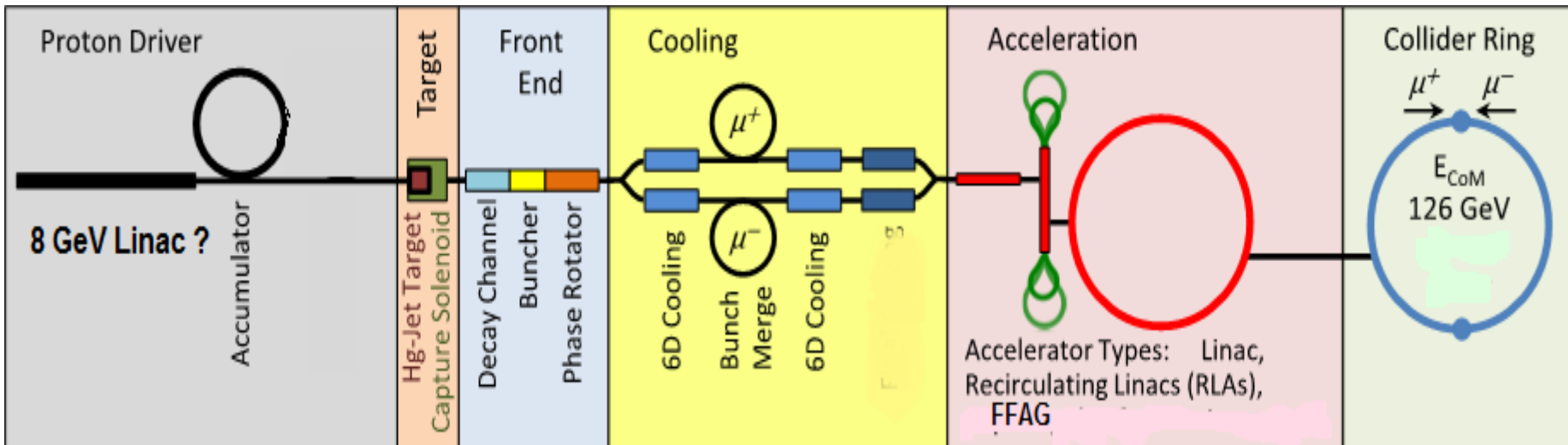
La plupart des thèmes découlent de la gestion du rayonnement synchrotron ~ 50 MW:

- Sections RF supraconductrices CW à fort gradient (22MV/m) et forte puissance (600 cavités 700 MHz)
- Optique de faisceau de faible émittance et large acceptance en énergie, avec une gestion des variations de l'énergie des faisceaux en dent de scie Radiation power
- Ecrantage des photons et de la puissance dissipée par Rayonnement Synchrotron à haute énergie critique (>1 MeV).
- Injection continue
- Estimation des coûts et de la puissance électrique délicate.

Collisionneur de muons

Utilise la plupart des systèmes des collisionneurs, sauf

- Linac à Protons multi-MW (cf. ESS)
- Cible W ou Hg multi-MW (cf. SNS, ESS)
- Refroidissement des faisceaux de muons par ionisation
 - $\sim 10^6$ dans l'émittance 6D, 10^3 dans $\varepsilon_L \sim 1\text{mm}\cdot\text{rad}$
- Gestions de la radioactivité induite dans les anneaux par la décroissance des muons stockées.



- Nécessite plusieurs décennies de R&D sur ces thèmes.

Usine à Higgs $\sqrt{s} = 240$ GeV : LEP3

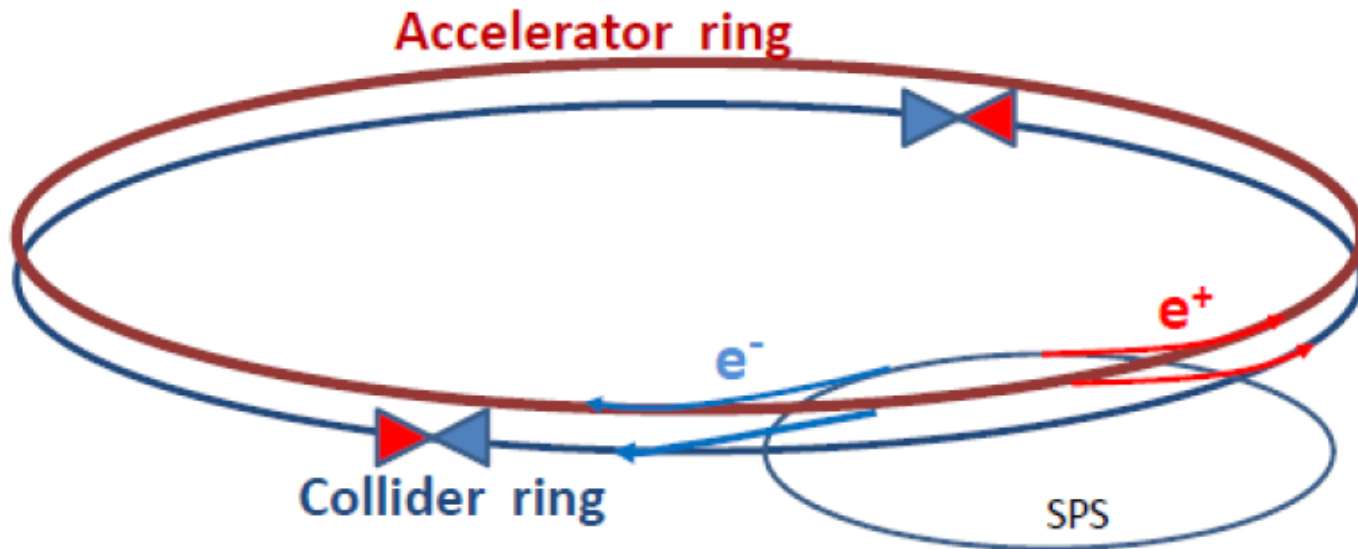


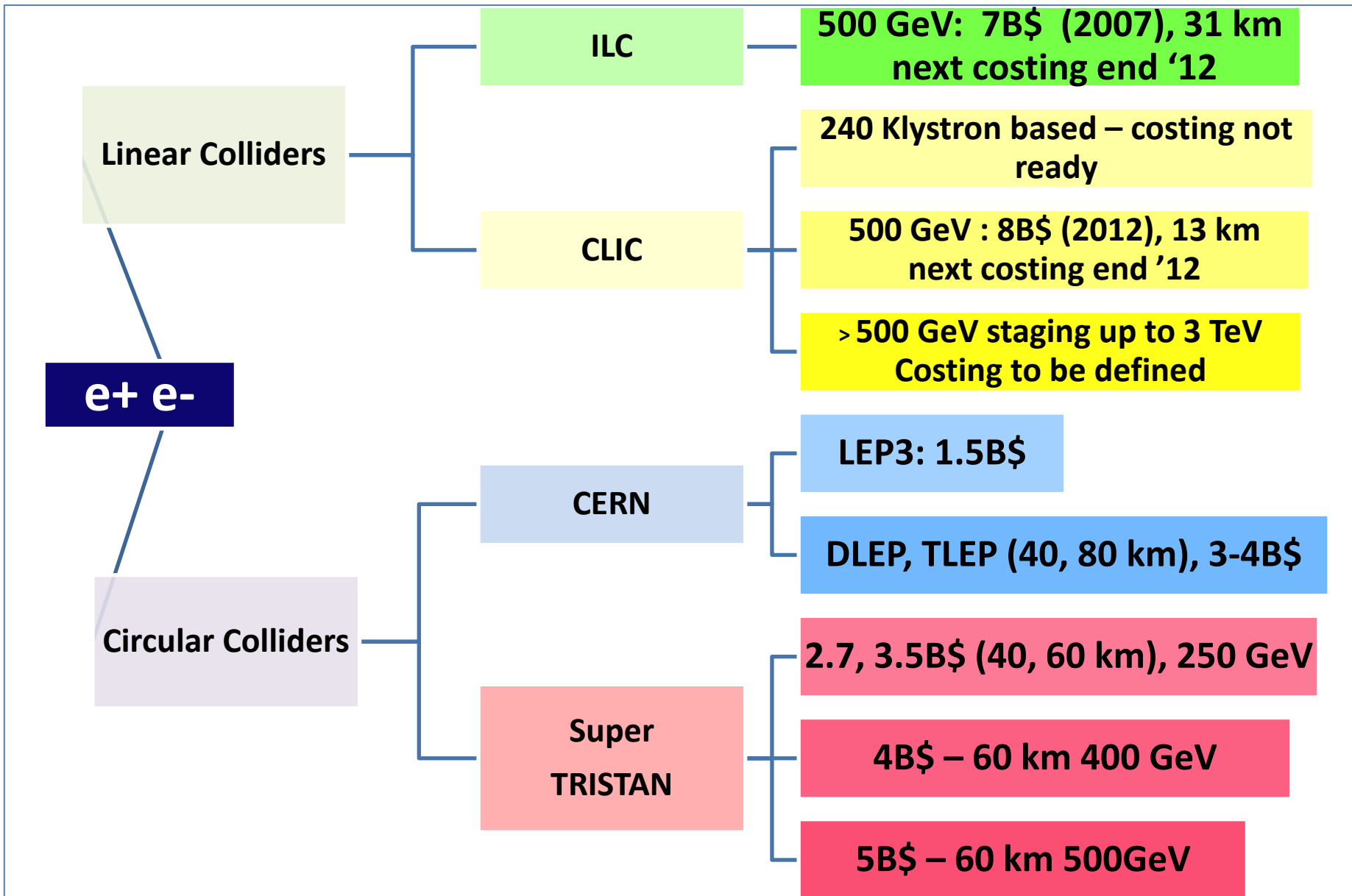
Figure 2 Possible two ring sketch for LEP3: a first ring (accelerator ring) accelerates electrons and positrons up to operating energy (120 GeV) and injects them at a few minutes interval into the low emittance collider ring in which the high luminosity $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ interaction points are situated.

A. Blondel, F. Zimmermann

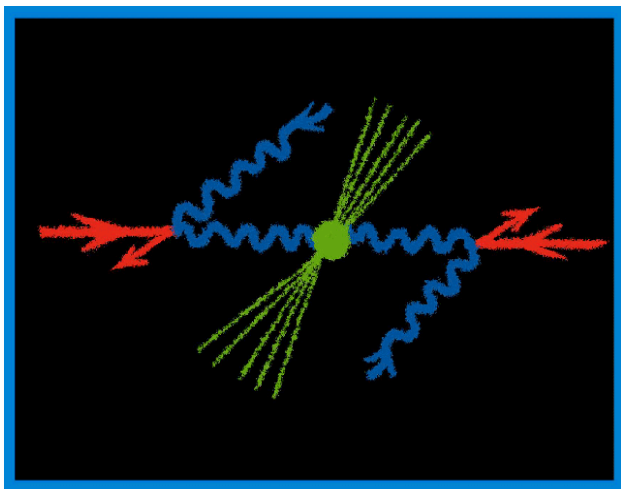
⇒ 9 GV + 6 GV de RF-supra CW dans les deux anneaux

⇒ Schéma de croisement à angle pour $10 \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}$ de luminosité

Usines à Higgs: options et estimation

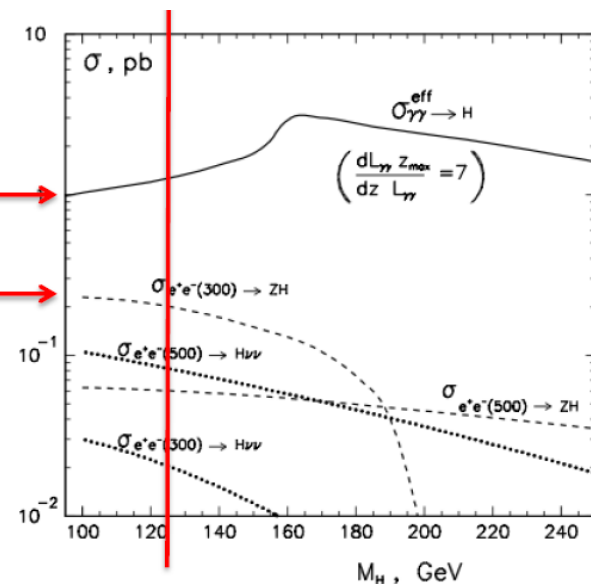
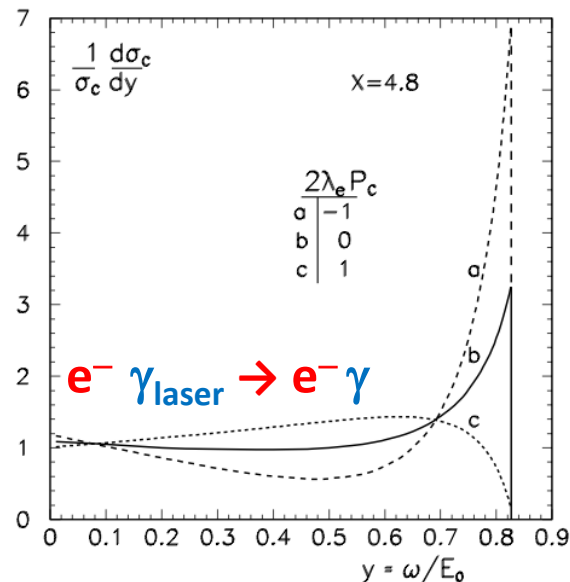
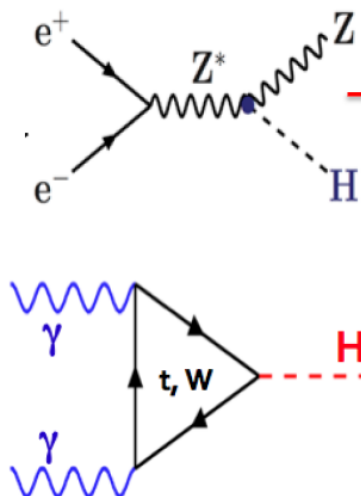


Usines à Higgs: collisionneur $\gamma\gamma$



Principe n°1: les photons
retrodiffusés à 180° emportent
jusqu'à 80% de l'énergie
des électrons incidents

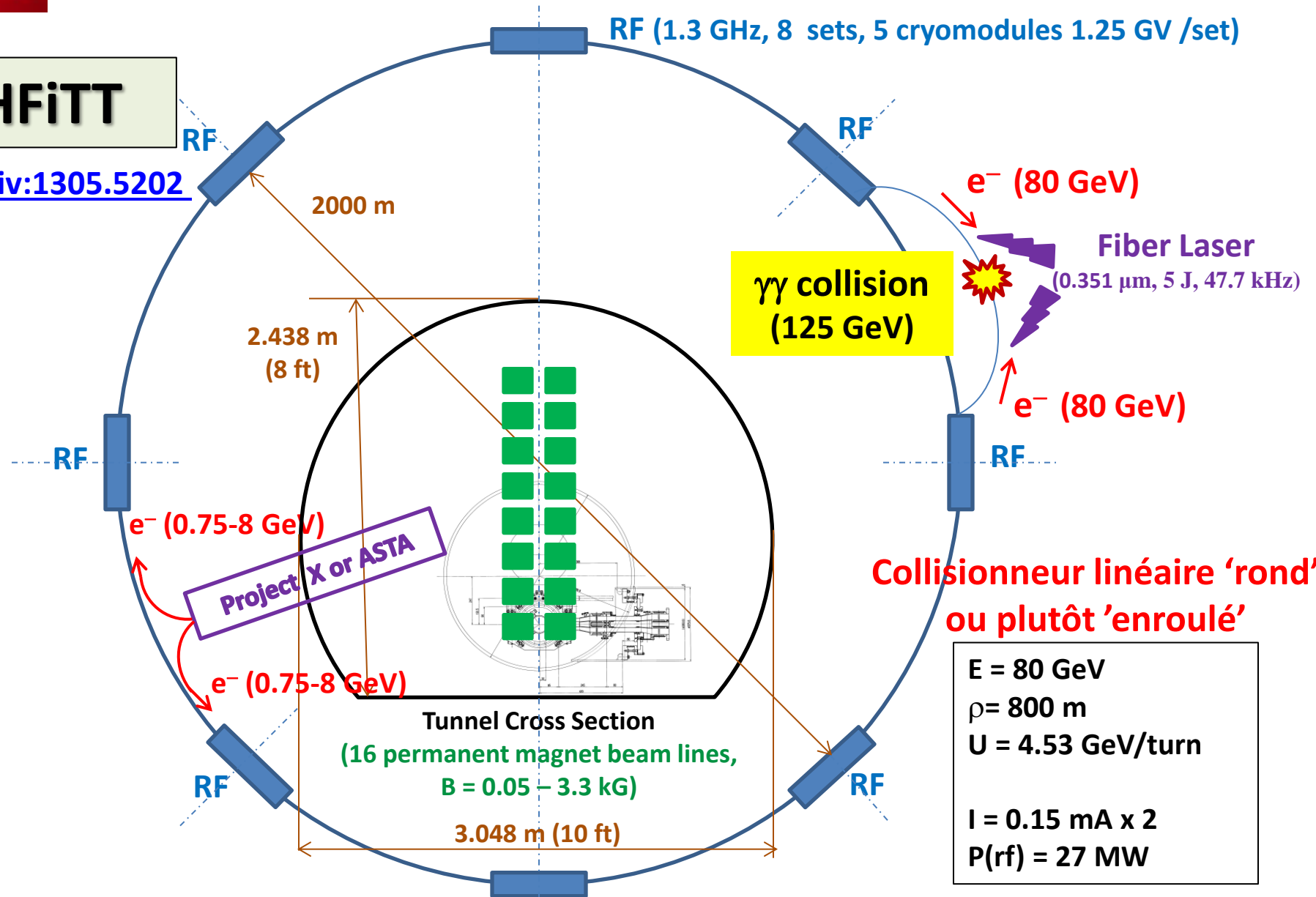
Principe n°2: la
production de Higgs est
directe et intense



Usines à Higgs: Tunnel du Tevatron (FNAL)

HFiTT

[arXiv:1305.5202](https://arxiv.org/abs/1305.5202)



HFiTT – Higgs Factory in Tevatron Tunnel (Rev. 1)Weiren Chou¹, Gerard Mourou², Nikolay Solyak¹, Toshiki Tajima³, Mayda Velasco⁴¹ Fermilab, USA² École Polytechnique, France³ University of California at Irvine, USA⁴ Northwestern University, USA

May 20, 2013

White Paper for the 2013 US HEP Community Summer Study (Snowmass2013)

Cost Consideration

This proposal is at an early stage and it is premature to discuss about its total cost. However, it will be useful to provide cost references for major systems based on the ILC study and Recycler experience.

- 40 cryomodules. Cost – \$2-3 million each according to the ILC cost estimate. (As a comparison, the ILC would need ~1,700 cryomodules.)
- 27 MW of RF power. Assuming 50% efficiency, one needs 54 MW of wall power for RF. Cost – \$5 million per MW according to the ILC cost estimate.
- 25 MW of wall power for cryogenics. Cost – about 2/3 of the ILC cryogenics.
- 16 permanent magnet beam lines. Cost reference – the Recycler permanent magnet total cost was \$3.2 million.
- 2x240 kW laser system. Assuming wall plug efficiency of 30%, compressor efficiency of 50%, diode price of €10/W and the rule of thumb that “3 times the diode cost equals the cost of the full system,” the laser system will cost ~€50M, or \$65 million.
- Civil – the Tevatron tunnel, CDF and DZero experimental halls, service buildings and utilities can be reused to minimize the civil cost.

**< 1Billion
USD****basé sur une
nouveau
concept de laser
à fibre à haute
puissance
moyenne**

Je vous remercie de votre attention.