

## Accélérateurs

## Plan

Le but

Rappel sur les techniques d' accélérations

Linéaire, pourquoi?

Les défis en énergie et en luminosité  
incidences fâcheuses

Les éléments du collisionneur

La polarisation

L'option  $e^-e^-$

L'option  $\gamma\gamma$

L'option  $e\gamma$

## Le but

Construire un accélérateur d'énergie suffisante, telle que la physique possible soit glanée en un temps raisonnable, disons 15 ans, ceci suppose une luminosité en accord.  $\Delta E \times L \sim \text{cste}$

Je dois beaucoup, pour cette leçon, à Olivier Napoly, ainsi qu' à Nick Walker et Peter Tenenbaum cours fait à Santa Barbara en juin 2003 (USPAS)

## Rappel sur les techniques d' accélérations

électrostatique

cavités RF, modes, pertes, dépendance en  $\omega$

supra / chaud fonctionnement

# Accélérateurs

Etude des techniques permettant d'accélérer des particules

Appliquons à une particule de charge  $e$  un champ  $E$

Elle subit la force  $F = eE = ma$  et a donc une accélération

$$a = \frac{eE}{m}$$

Au bout d'une longueur  $L$  l'énergie acquise est le travail de la force soit  $\mathcal{E} = eEL$  or  $EL$  est la différence de potentiel  $V$

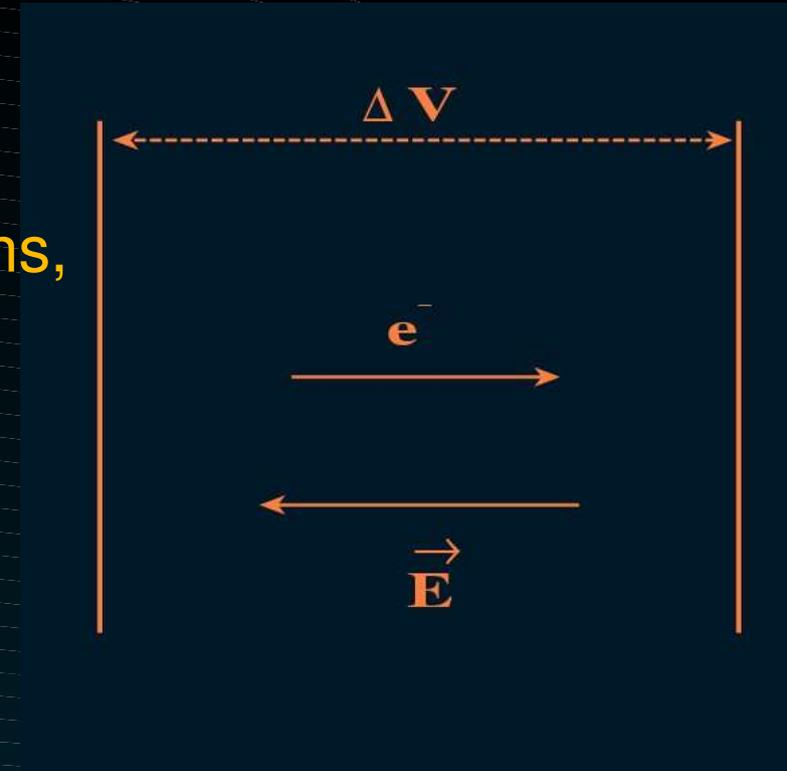
$$\mathcal{E} = eV$$

## Méthode I.

Appliquons aux particules, ici des électrons, une différence de potentiel statique.

C' est un accélérateur électrostatique.

Limitations dues aux claquages



Application aux sources polarisées.

Savez-vous ce qu'est une triode?  
une source classique d' électrons c' est pareil

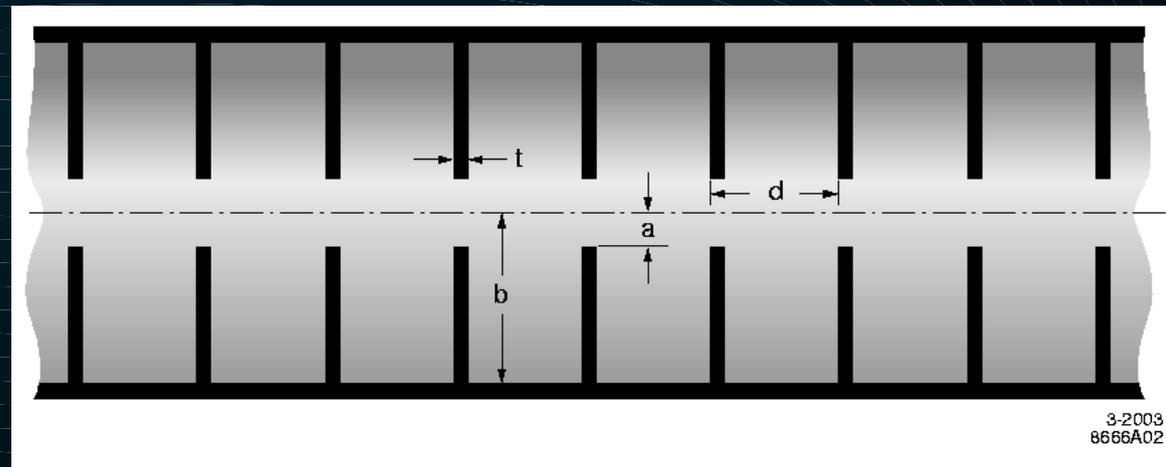
## Méthode II.

Appliquons un champ dynamique, une onde électromagnétique.

La solution des équations de Maxwell en l'absence de conditions aux limites est une onde plane où  $E$  et  $B$  sont orthogonaux à la direction de propagation de l'onde. Peu favorable.

Est-il possible d'imposer des conditions aux limites telles que le champ électrique soit aligné avec la direction de propagation?

Dans un guide d'onde cylindrique oui  
mais la vitesse de phase  $> c$  !!  
OK en introduisant  
des conditions aux limites  
selon  $z$

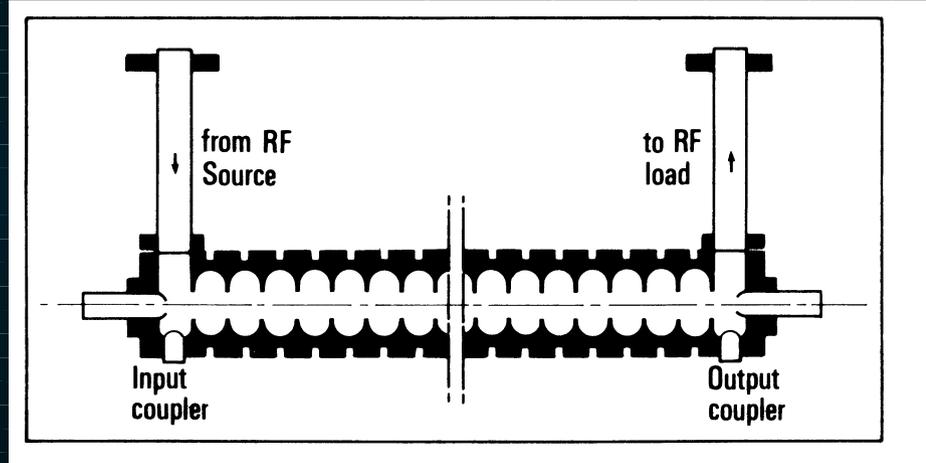
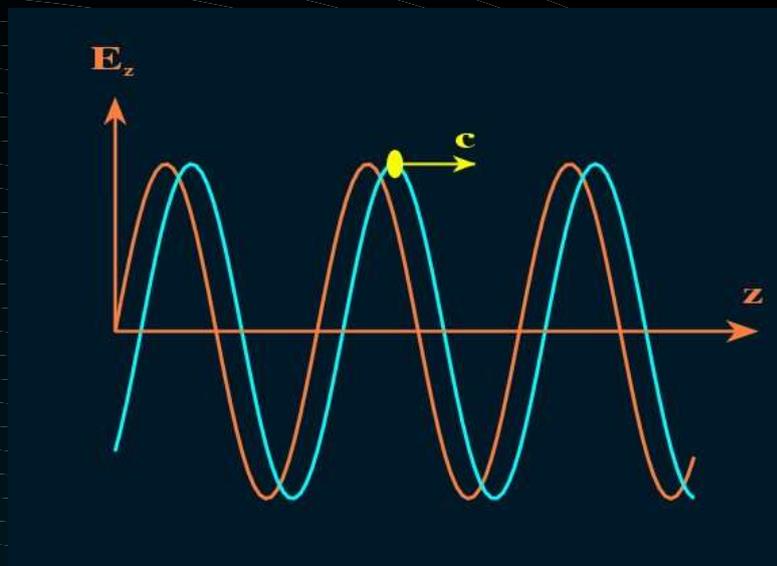


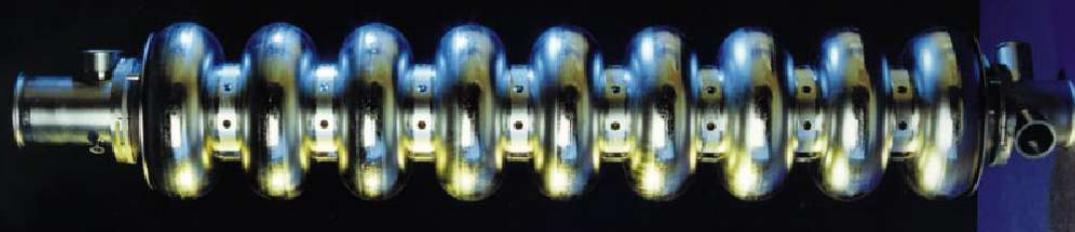
3-2003  
8666A02

Onde progressive  
vitesse de phase  $c$   
les paquets voient un champ constant

$$E_z = E_0 \cos(\phi)$$

si ce n'est pour l'énergie  
prise par le faisceau  
(beam loading)





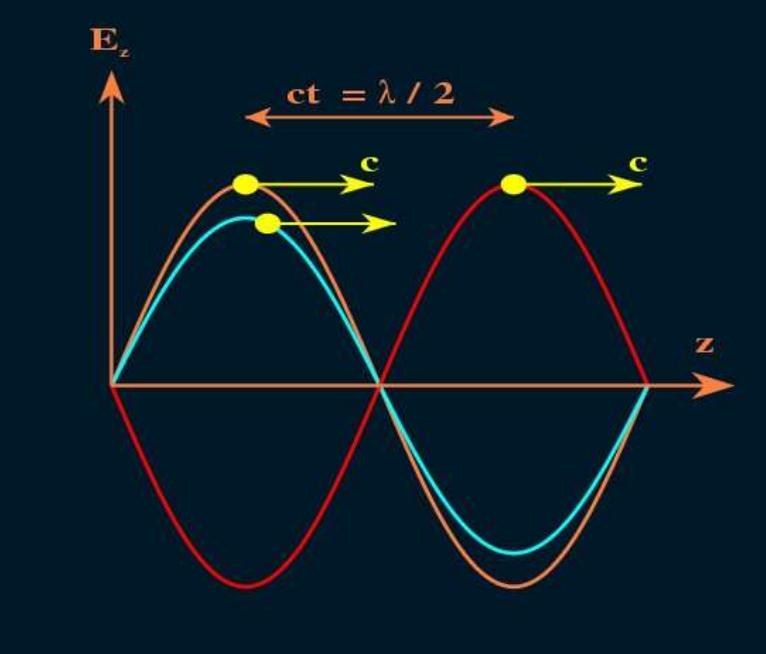
radiofréquence

### Onde stationnaire

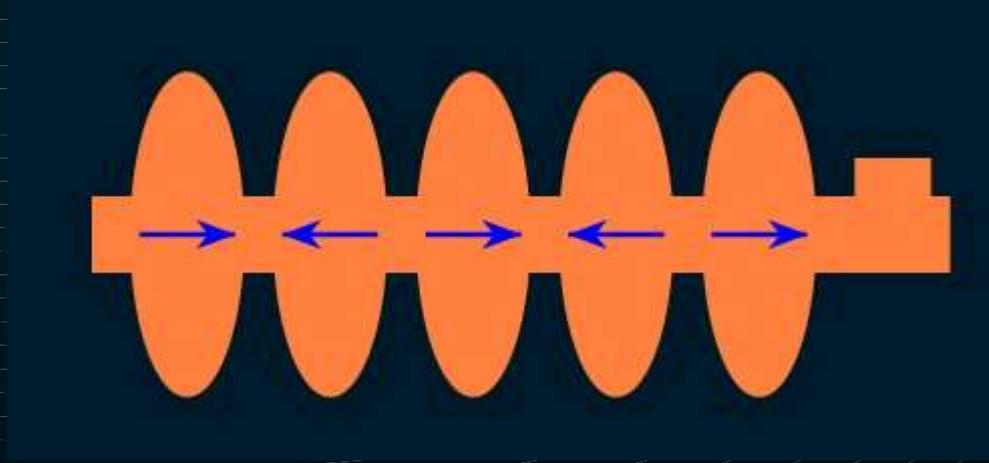
Cavité résonnante:  
les paquets voient le champ

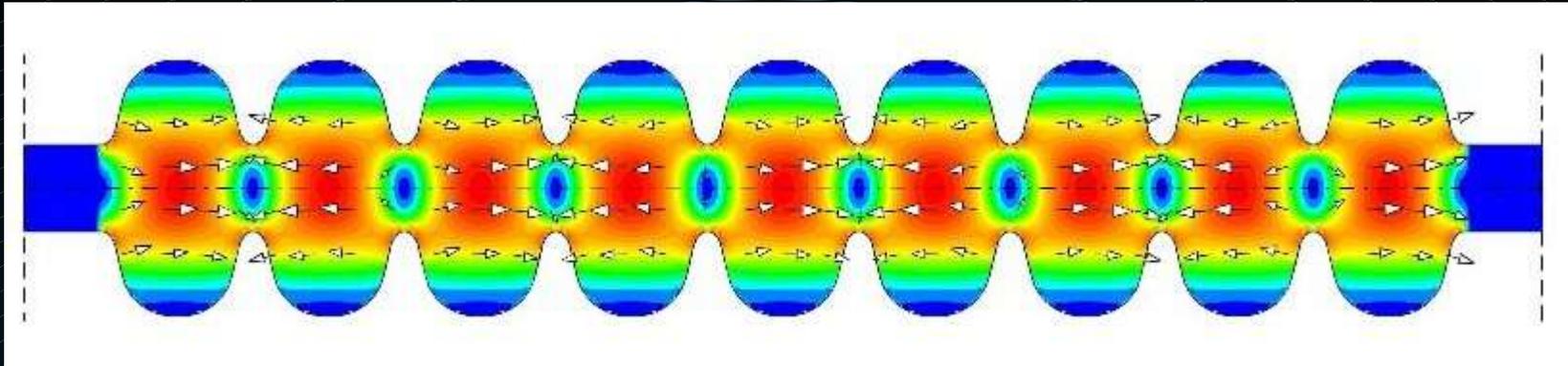
$$E_z = E_0 \sin(\omega t + \phi) \sin(kz)$$

$$= E_0 \sin(kz + \phi) \sin(kz)$$



La polarité s'inverse  
tous les T/2





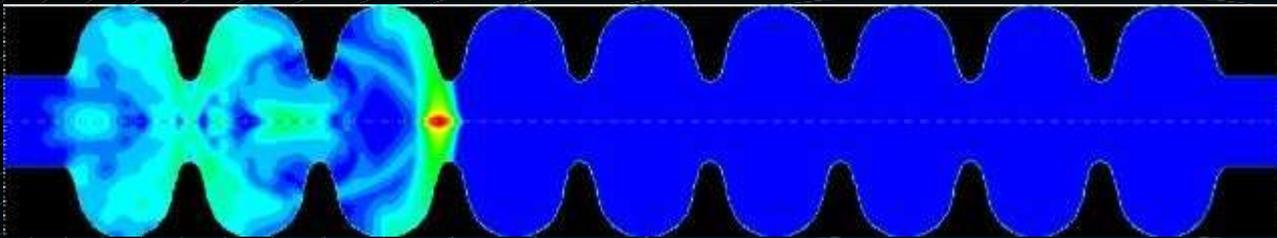
Champ électrique pour une cavité  
TESLA dans le mode  $\pi$  fondamental  
à 1,3 GHz

Le passage du faisceau induit dans la cavité un champ décélérant

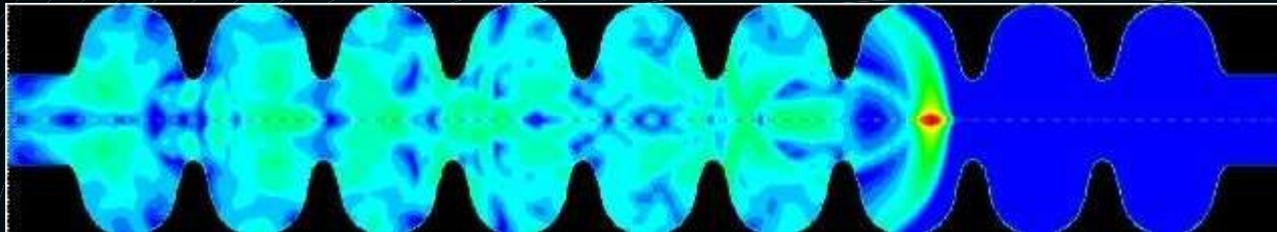
## Champs de sillage dans les structures RF



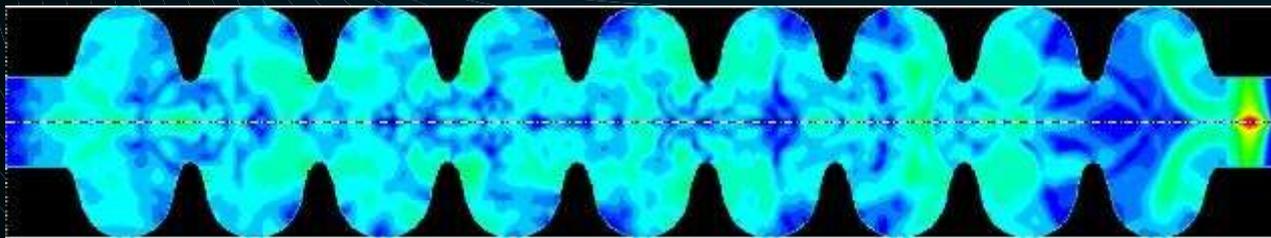
Champs induits par le passage du faisceau



Les champs de sillage ont de grandes durées de vie  $\tau = 2Q/\omega_{RF} \sim 1\text{s}$



Les paquets hors axe engendrent des champs dipolaires qui déflechissent les paquets suivants.  $\Rightarrow$  atténuation  $\tau < 100\ \mu\text{s}$



## Quantités importantes / mode RF ondes stationnaires

valeurs pour TESLA

Gain en tension le long de l'axe

$$U = \int dz E_z(z, t=z/c) \quad 25 \text{ MV}$$

Energie emmagasinée:  $W$ 

$$\text{facteur géométrique: } R/Q = U^2 / \omega_{\text{RF}} W \quad 1 \text{ k}\Omega$$

Puissance dissipée:

$$P = dW/dt = P_{\Omega} + P_{\text{beam}}$$

$$\text{Facteur qualité} \quad Q_0 = \omega_{\text{RF}} W / P_{\Omega} \quad 10^{10}$$

$$\text{Impédance shunt} \quad R = U^2 / P$$

La taille des cavités est  $\sim$  longueur d'onde

La puissance transférée au faisceau est en  $\omega^2$ ,  
il est plus efficace de monter en fréquence:

supra 1,3 GHz, chaud 11,4 GHz, CLIC 30 GHz.

## Puissance RF en mode accélération

La puissance RF est fournie par des klystrons:  $Q_{\text{ext}} = \omega_{\text{RF}} W/P_{\text{RF}}$

La puissance RF est dissipée dans le faisceau

et dans les pertes résistives

$$P_{\text{RF}} = P_{\text{beam}} + P_{\Omega}$$

valeurs TESLA

$$P_{\text{beam}} = U I_{\text{beam}}$$

$$230 \text{ kw} = 25 \text{ MV} \cdot 9 \text{ mA}$$

avec

$$P_{\Omega} = \omega_{\text{RF}} W/Q_0 = U^2/R$$

$$2,5 \text{ mW}$$

NB  $P_{\Omega} \propto R_S$  résistance de surface

$$R_S (\text{Nb @ 2 K}) \simeq R_S (\text{Cu @ 300 K}) 10^{-6}$$

$$P_{\Omega} \ll P_{\text{beam}} \text{ pour Nb, } P \simeq P_{\text{beam}} \text{ pour Cu}$$

## La différence chaud / supraconducteur

Perte d'énergie: 
$$P_{in} = P_{beam} + P_R + P_{out}$$

Dans le supra  $P_R \sim \text{nul}$ .

En mode stationnaire  $P_{out}$  nul.

En chaud comme  $P_{out}$  dominé par  $P_R$  (2/3 de  $P_{in}$ ),

ondes progressives à gradient constant,

en supra il est préférable d'avoir des ondes stationnaires

Si  $P_R$  nul, l'onde dure bien plus longtemps, impulsion longue, 1 ms  
sinon  $\mu\text{s}$ .

La qualité d'une cavité se mesure par sa valeur  $Q$   
fraction de l'énergie emmagasinée perdue dans les parois  
en  $2\pi$  fois la période RF.

## Coût de fonctionnement: consommation électrique

$$P_{\text{total}} = (P_{\text{beam}} + P_{\omega}) / \eta_{\text{RF}} + P_{\omega} / \eta_{\text{refroidissement}}(T)$$

$$\text{Puissance faisceau: } P_{\text{beam}} = E_{\text{CM}} \times N_{\text{part}} = E_{\text{CM}} / e I_{\text{beam}} = N_{\text{cavité}} U I_{\text{beam}}$$

$$\text{Pertes ohmiques: } P_{\omega} = N_{\text{cavité}} U^2 / R = E_{\text{CM}} / e N_{\text{cavité}} R$$

Un refroidissement est nécessaire

pour maintenir le Linac à température T

Dans les machines cryogéniques les pertes ohmiques sont dissipées dans un réfrigérateur à T:

Efficacité (Carnot)

$$\eta_{\text{refroid}}(T) \sim (T/300) / 4 =$$

$$1/300 \text{ @ LEP (4K)}$$

$$1/600 \text{ @ TESLA (2K)}$$

Pour un supraconducteur avec  $Q \sim 10^{10}$

l'impulsion RF est longue, on doit en profiter,  
à puissance consommée donnée, on mettra donc peu  
d'impulsions par seconde et de nombreux paquets  
aisément espacés.

Pour un accélérateur chaud

l'impulsion est brève, peu de paquets bien serrés dans de  
nombreux trains.

bonne efficacité de transfert, champs plus élevés.

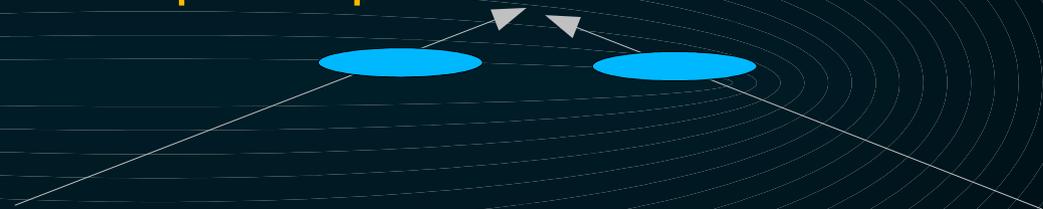
Remarque: on ne peut consommer toute l'énergie stockée  
car les derniers paquets verraient un champ très réduit.

Structure en temps:

TESLA 5 impulsions de 1 ms par seconde, toutes les 200 ms (5H)  
dans chaque impulsion un train de 3000 paquets séparés de 300 ns

Chaud, 100 impulsions par seconde, contenant 150 paquets séparés  
de 1,4 ns

Ceci implique que les deux faisceaux doivent faire un angle  
pour ne se rencontrer qu' enun point: perte de luminosité  
croisement en crabe.



Le supra permet des collision bille en tête mais ceci implique  
des séparateurs délicats et encombrants.

## Cavités supra

Celles de LEP faisaient de 6 à 7 MV/m, très insuffisant pour un linéaire. TESLA 800 GeV nécessite 35 MV/m.

Très gros progrès dans leur technologie.

Les cavités atteignent 42 MV/m sans faisceau, non loin de la limite théorique, voisine de 50 MV/m, liée au champ qui induit un retour à l'état normal du niobium.

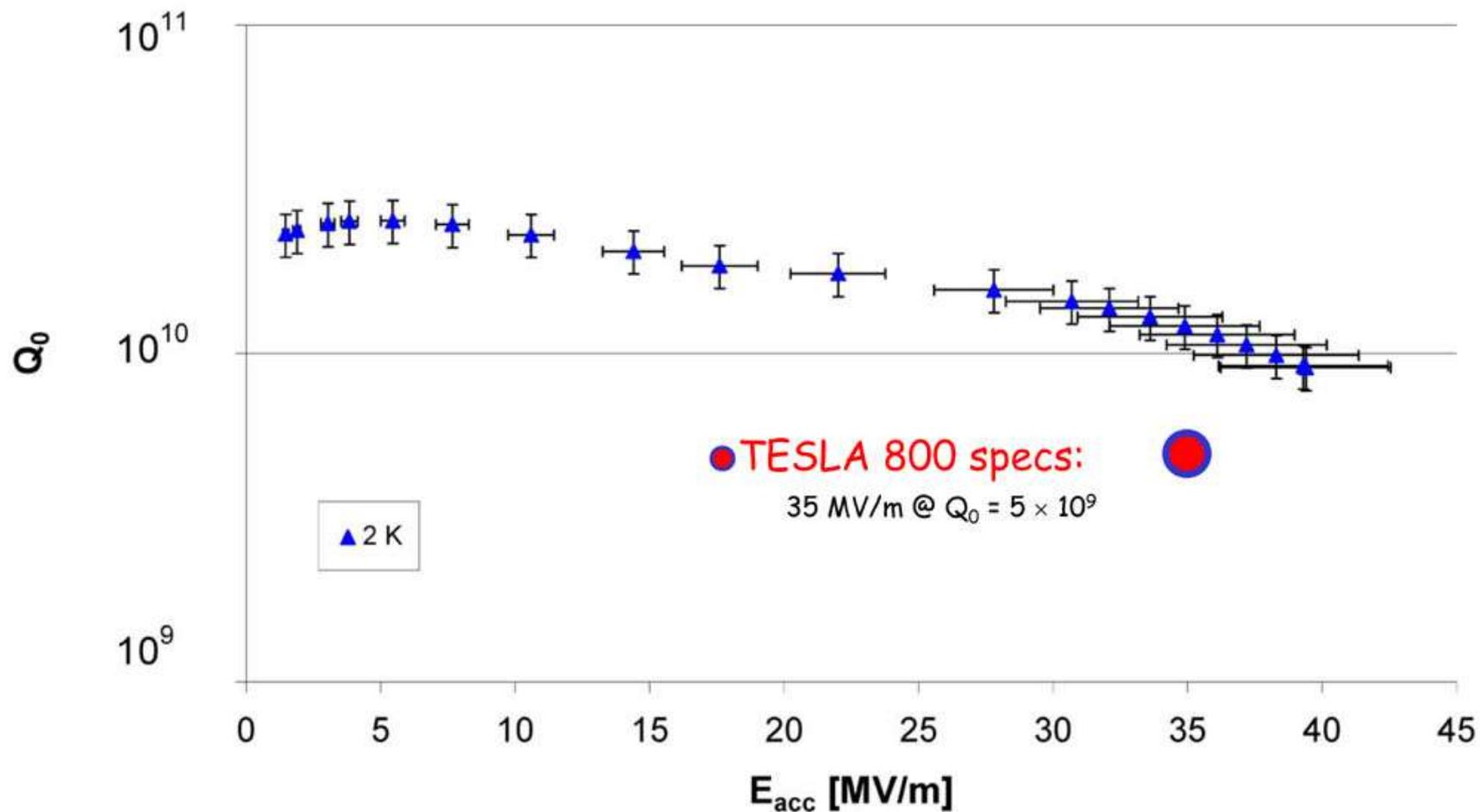
de  $H_0 < H_c = 200\text{mT}$  pour le Niobium massif

C'est essentiellement un problème d'état de surface qui est amélioré par la RF mais surtout par un électropolissage.

EP at the new DESY plan

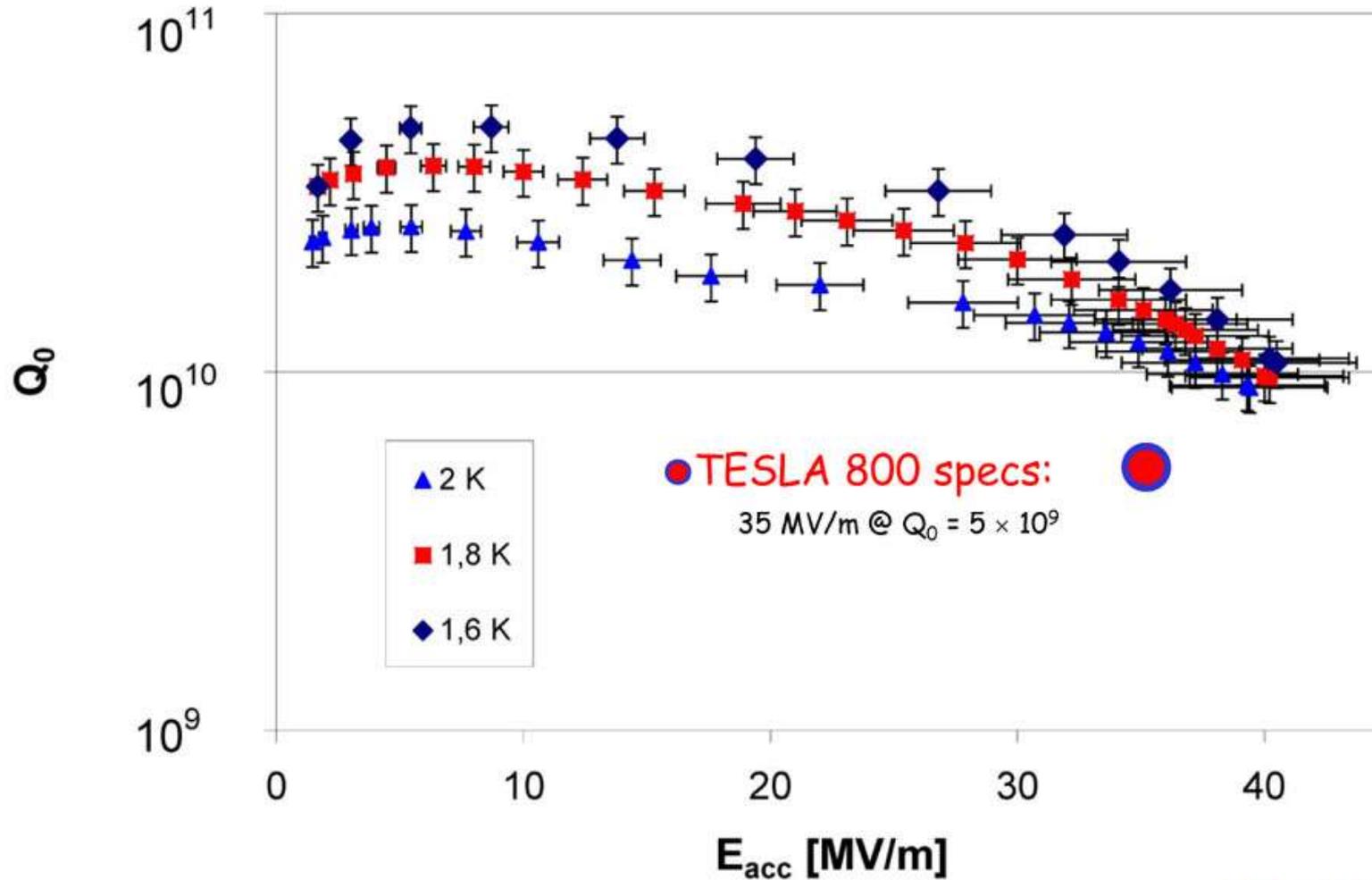
800°C annealing

120°C Backing

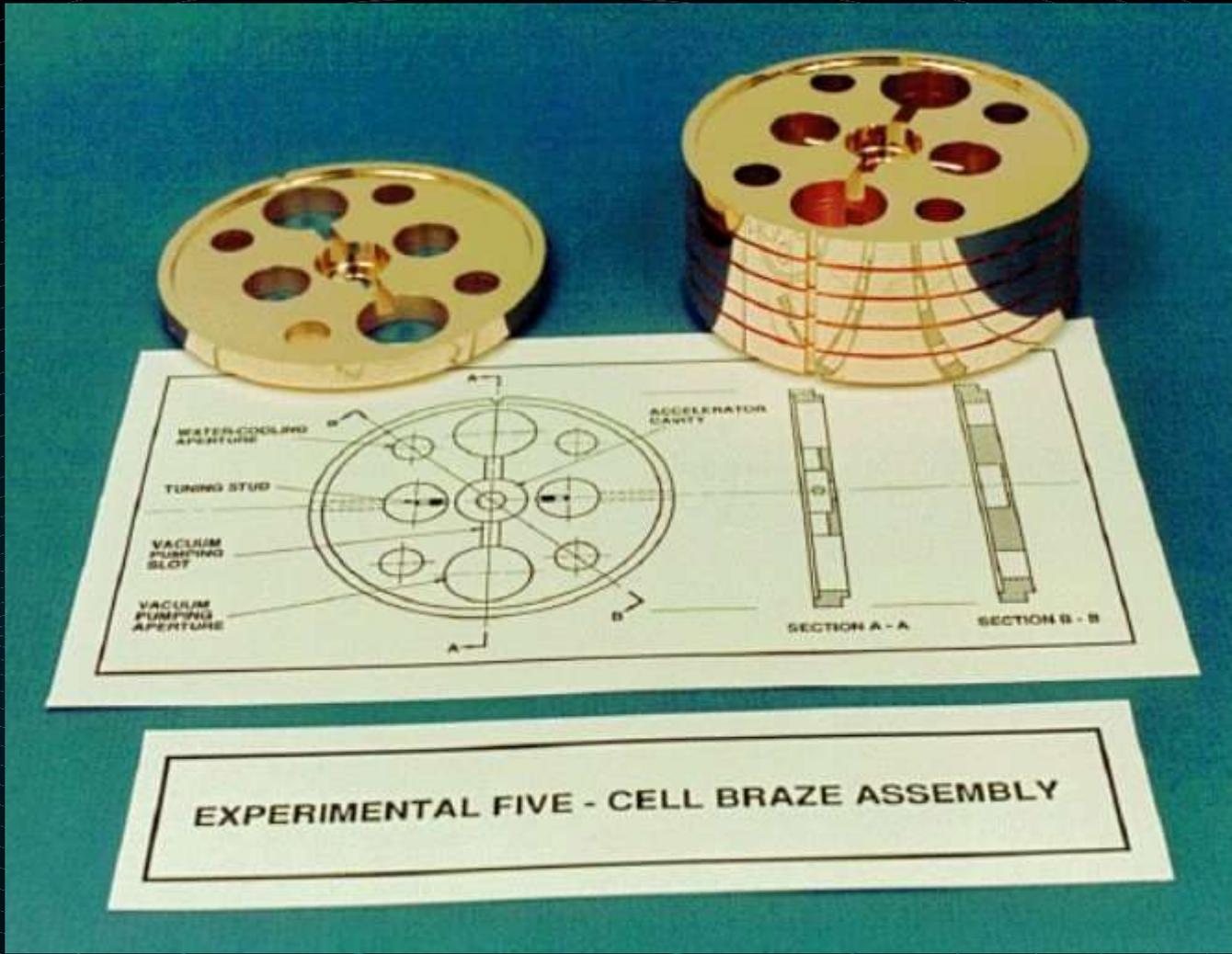


Very low residual resistance

Negligible Field Emission

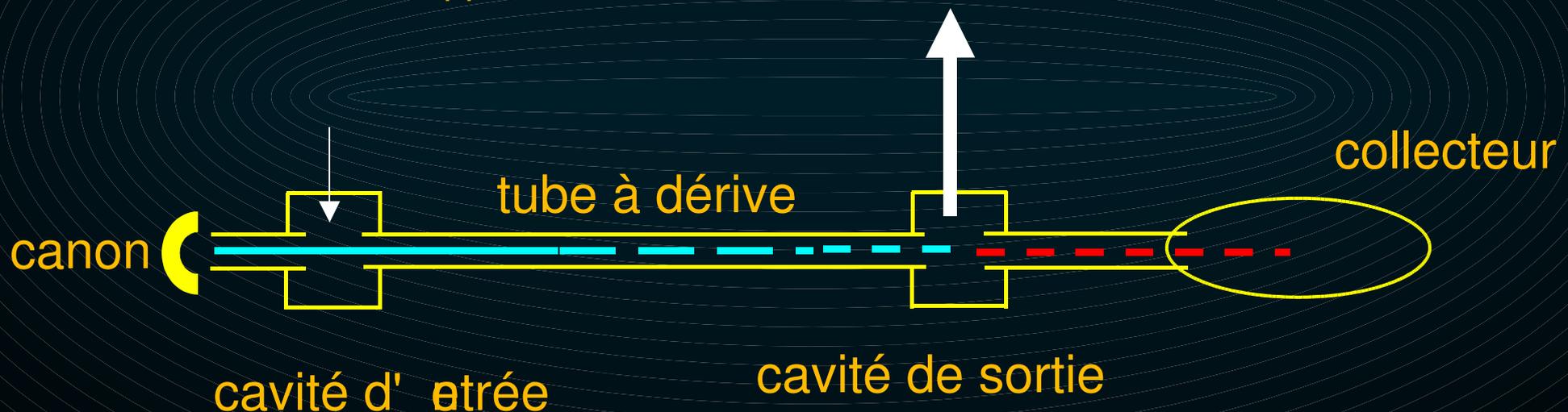


# Cavités accélératrices NLC

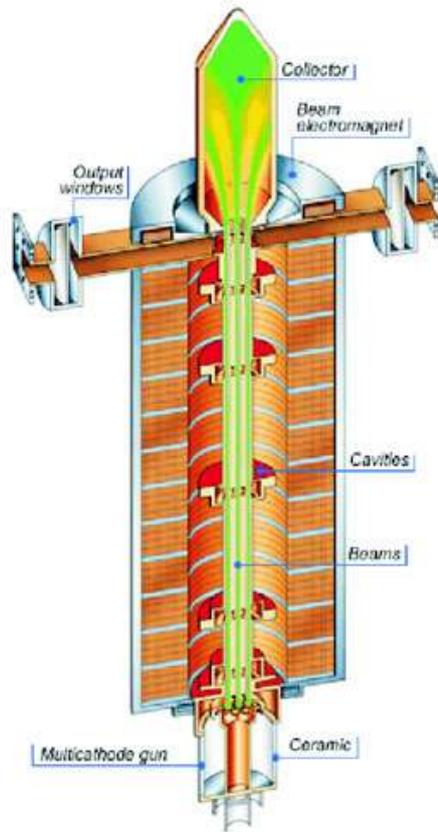


## Comment générer la RF: les klystrons

- Un faisceau continu ( $< 500$  kV,  $< 500$  A) est émis par un canon à électrons
- Un signal de faible puissance, à la fréquence choisie, excite la cavité d'entrée
- Les particules sont accélérées ou freinées selon la phase à leur arrivée dans la cavité d'entrée
- La modulation en vitesse se transforme en modulation en temps dans le tube de dérive (le faisceau est pulsé à la fréquence pilote)
- Le faisceau pulsé excite la cavité de sortie à la fréquence choisie (beam loading)
- Le faisceau est stoppé dans le collecteur.



Three Thales TH1801 Multi Beam Klystrons have been produced and tested



MBKs reduce HV and improve the efficiency: lower space charge.

Seven beams, 18.6 A, 110 kV, produce 10 MW with 70% eff.

Cathodes are still the weak point

### Operational experience

Achieved efficiency	65%
RF pulse width	1.5 ms
Repetition rate	5 Hz
Operation experience	> 5000 h
10% of operation time at full spec's	

A new design proposed by Toshiba looks more robust and should reach 75% efficiency

Le prochain accélérateur à électrons doit être linéaire!

## Pertes radiatives:

une particule chargée d'énergie  $E$   
 décrivant une orbite de rayon  $R$  perd l'énergie:

$$\delta E = 6 \cdot 10^{-15} R^{-1} \gamma^4$$

où  $R$  est en mètres et  $E$  en MeV

Exemple: un électron de 100 GeV et un rayon de 1 km

$$m_e = 0,5 \text{ MeV}, \gamma = 2 \cdot 10^5$$

$$\delta E = 6 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^{20} \approx 10 \text{ GeV}$$

Rayon fictif tel que  $\delta E = E$        $E^3 \approx 10^7 R$   
 avec  $E$  en GeV et  $R$  en km

soit 100 m pour 100 GeV, 100 km pour 1 TeV  
 le rayon de la terre à 4 TeV !!

$R$  croît comme  $E^3$  alors que dans un linéaire  $L$  croît comme  $E$

Le proton, 2000 fois plus lourd, radie beaucoup beaucoup moins,  
 le mu également

## Mouvement d'une particule dans un champ magnétique

$$P^\mu = m U^\mu = m \gamma (c, \mathbf{v})$$

$$\frac{dP^\mu}{d\tau} = q F^{\mu\nu} U_\nu$$

pour un champ électrique nul la partie spatiale s'écrit

$$m \gamma \frac{d\mathbf{v}}{d\tau} = m \gamma^2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q \gamma (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})$$

Décrivons en complexes le mouvement dans le plan orthogonal à B

$$\frac{dv}{dt} = -i \frac{qB}{m\gamma} v \quad \text{posons} \quad \omega = \frac{qB}{m\gamma}$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{v} &= -i \omega dt \\ v &= v_0 e^{-i\omega t} \\ x &= x_0 + i \frac{v_0}{\omega} e^{-i\omega t} \end{aligned}$$

La trajectoire est un cercle de rayon

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{m\gamma v}{qB} = \frac{p}{qB}$$

$$p = q R B$$

en SI, p est en VC/c, qRB en CmT

si la charge est en électrons: p (eV) = c R(m) B(T)

$$p(\text{GeV}) = 0,3 B(\text{T}) R(\text{m})$$

# Rayonnement synchrotron

puissance rayonnée  
par une charge  $q$   
dont  $A$  est le quadrivecteur accélération.

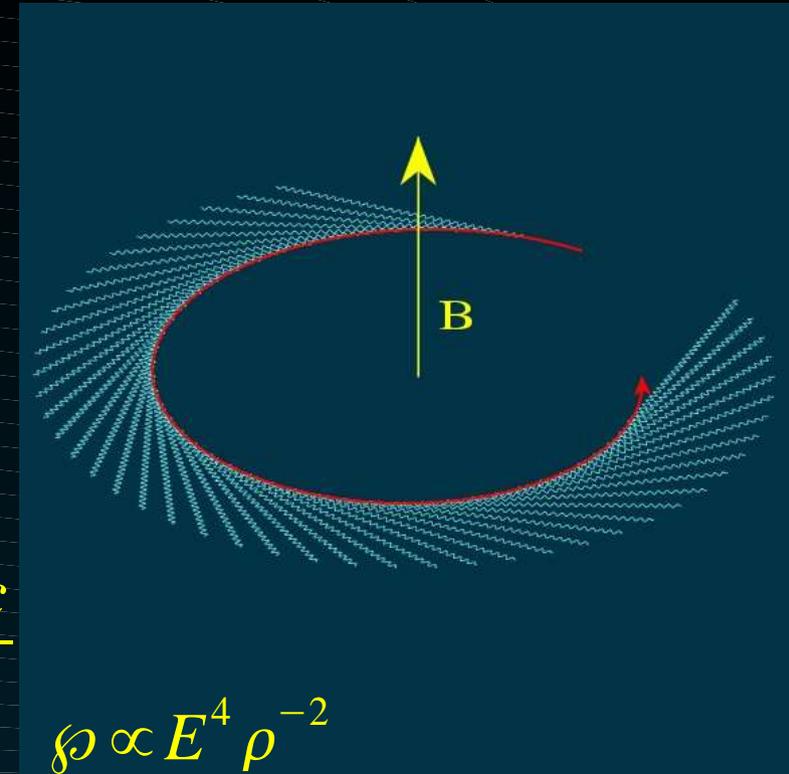
$$\mathcal{P} = \frac{q^2 A^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

Dans une rotation uniforme  $A = (0, \gamma^2 \mathbf{a})$

$$\mathbf{a} = \frac{v}{\rho} \mathbf{v} \wedge \mathbf{n}$$

$$A^2 = \frac{\gamma^4 \beta^4 c^4}{\rho^2}$$

$$\mathcal{P} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0} \frac{\gamma^4 \beta^4 c}{\rho^2}$$



perte d'énergie sur un tour

temps de faire un tour:  $\frac{2\pi\rho}{\beta c}$

$$\mathcal{P}_r = -\frac{q^2 \beta^3}{3\epsilon_0} \gamma^4 \rho^{-1}$$

facteur pour passer en MeV:

$$\frac{1.6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 8.8 \cdot 10^{-12}} \cdot 10^{-6} = 6 \cdot 10^{-15}$$

## Rayonnement synchrotron

Exprimons en fonction de E (énergie) et B pour un électron

$$\rho^{-1} = \frac{eB}{p} = \frac{ecB}{\beta E}$$

$$\wp = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0} \gamma^4 \beta^4 c \frac{e^2 c^2 B^2}{\beta^2 E^2}$$

puissance rayonnée dans un champ B, en régime relativiste ( $\beta=1$ ),

$$\wp \propto E^2 B^2$$

pour une révolution ( $T = 2\pi\rho/\beta c$ ),

$$\wp_r \propto E^3 B$$

Référence: Introduction à la relativité,  
André Rougé, Editions de l'Ecole polytechnique

Le prochain accélérateur à électrons doit être linéaire!

Et le coût!

Il croît comme  $L$  donc  $E$

Le facteur de proportionnalité dépend  
des gradients d'accélération de 35 à 100 MV/m

supra CLIC

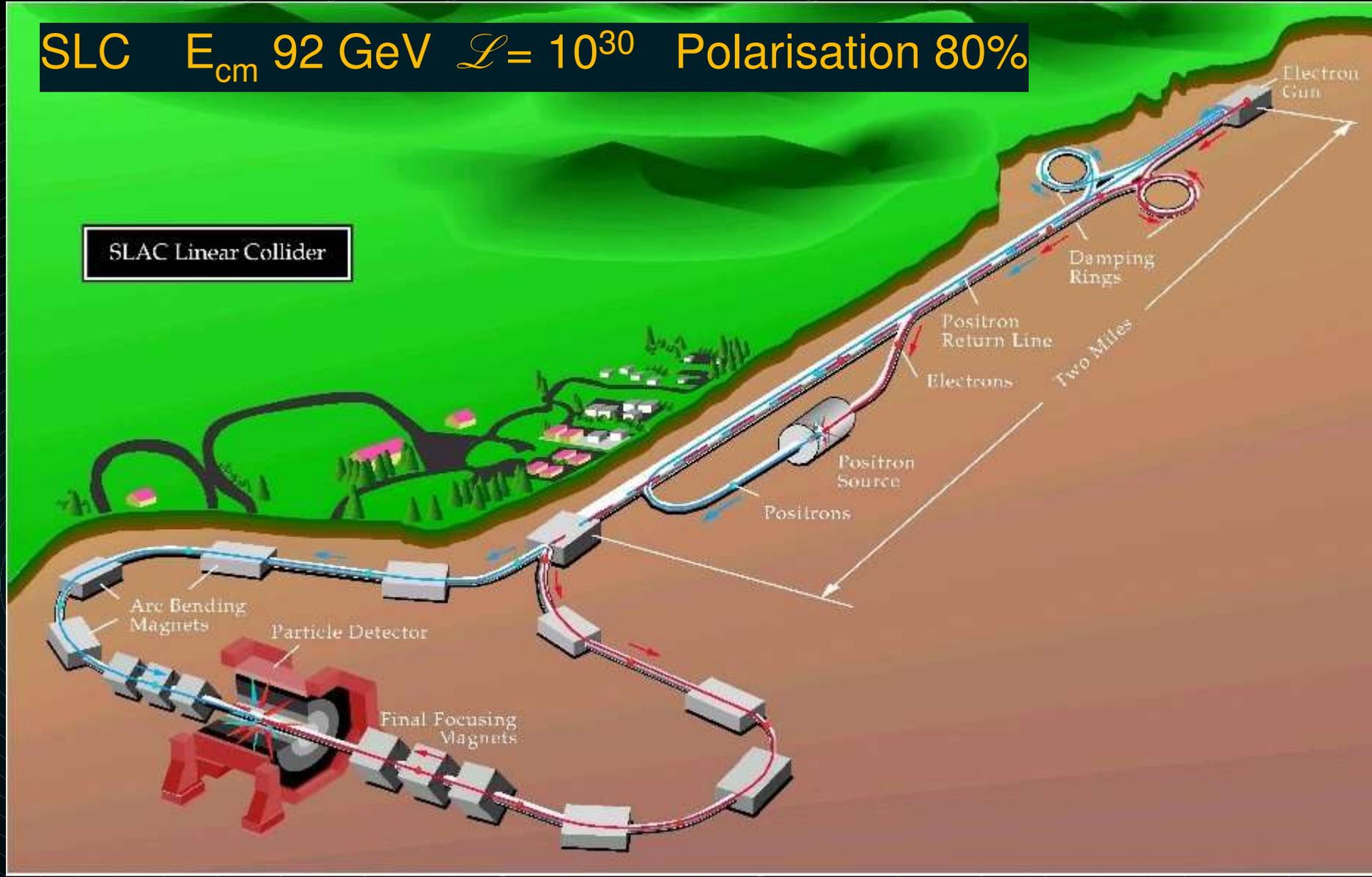
Coût de construction / coût de fonctionnement

Puissance faisceau: 15000 paquets de  $10^{10}$  électrons  
quelques dizaines de MW.

L'ancêtre, preuve de faisabilité

SLAC

SLC  $E_{cm}$  92 GeV  $\mathcal{L} = 10^{30}$  Polarisation 80%



Les progrès à faire

	SLC	LC	
$E_{cm}$	100	500-1000	GeV
$P_{beam}$	0.04	5-20	MW
$\sigma_y^*$	500	1-5	nm
$dE/E_{bs}$	0.03	3-10	%
$L$	0.0003	3	$10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

Parameter	X	L	X	L
C. M. Energy/Energy Reach [TeV]	0.5/0.625	0.5/0.625	1/1.3	1/1
Loaded rf gradient [MV/m]	52	28	52	35
2-linac total length [km]	13.4	27.0	26.8	42.5
$\gamma\epsilon_x(\text{IP})$ [ $\mu\text{m-rad}$ ]	3.6	9.6	3.6	9.6
$\gamma\epsilon_y(\text{IP})$ [ $\mu\text{m-rad}$ ]	0.04	0.04	0.04	0.04
$\mathcal{L}_g$ [ $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	14.2	14.5	22.2	22.7
$D_y$	12.9	22.0	10.1	17.3
$H_D$	1.46	1.77	1.41	1.68
$\mathcal{L}$ [ $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	20.8	25.6	31.3	38.1
Number of main linac klystrons	4520	603	8984	1211
Number of main linac RF structures	18080	18096	35936	29064
Peak RF power per structure [MW]	56	0.28	56	0.35
Average power per beam [MW]	6.9	11.3	13.8	22.6
Linac AC to beam efficiency [%]	6.6	17.0	7.1	15.3
Site Operating AC power [MW]	260	179	454	356

## Luminosité

$\mathcal{L}$  est le nombre caractéristique du collisionneur qui, multiplié par la section efficace  $\sigma$  donne le nombre d'événements par seconde:  $N = \mathcal{L} \sigma$   
dimension  $[T^{-1} L^{-2}]$ , unités habituelles  $cm^{-2} s^{-1}$

$$\mathcal{L} = \frac{I_1 I_2}{A} H_D$$

où  $I_i$  est le courant dans le faisceau  $i$ ,  
 $A$  est la section du faisceau au point d'interaction  
 $H_D$  un facteur d'amélioration (effet de pincement).

Dans le cas d'un faisceau pulsé  
et de profil gaussien

$$\mathcal{L} = \frac{n_b N^2 f_{rep}}{4\pi \sigma_x \sigma_y} H_D$$

où  $n_b$  est le nombre de paquets,  
 $N$  le nombre d'électrons par paquet  
 $f_{rep}$  la fréquence de répétition  
 $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  les tailles latérale et verticale du faisceau.

au moins une dimension très petite afin de limiter la disruption lors de la collision  
quelques nm au LC

La luminosité par croisement est un invariant de Lorentz:

$$\int dt \mathcal{L} = 1/c^2 \int d^4x [(\underline{\mathbf{J}}_1 \bullet \underline{\mathbf{J}}_2)^2 - \underline{\mathbf{J}}_1^2 \underline{\mathbf{J}}_2^2]^{1/2}$$

Pour des faisceaux relativistes

$\int dt \mathcal{L}$  est le recouvrement des distributions spatiales des deux faisceaux :  $\int dt \mathcal{L} \simeq 2 \int d^4x \rho_1(x) \rho_2(x)$

Pour deux faisceaux identiques et gaussiens

$$\int dt \mathcal{L} \simeq N^2 / (4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*) \quad \mathcal{L} \simeq n_b N^2 / (4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*)$$

avec  $n_b = \# \text{ paquets / impulsion}$  ,  $f = \# \text{ impulsion / s}$

## Luminosité intégrée.

se mesure en  $\text{cm}^{-2}$

nous sommes encore au temps de CGS

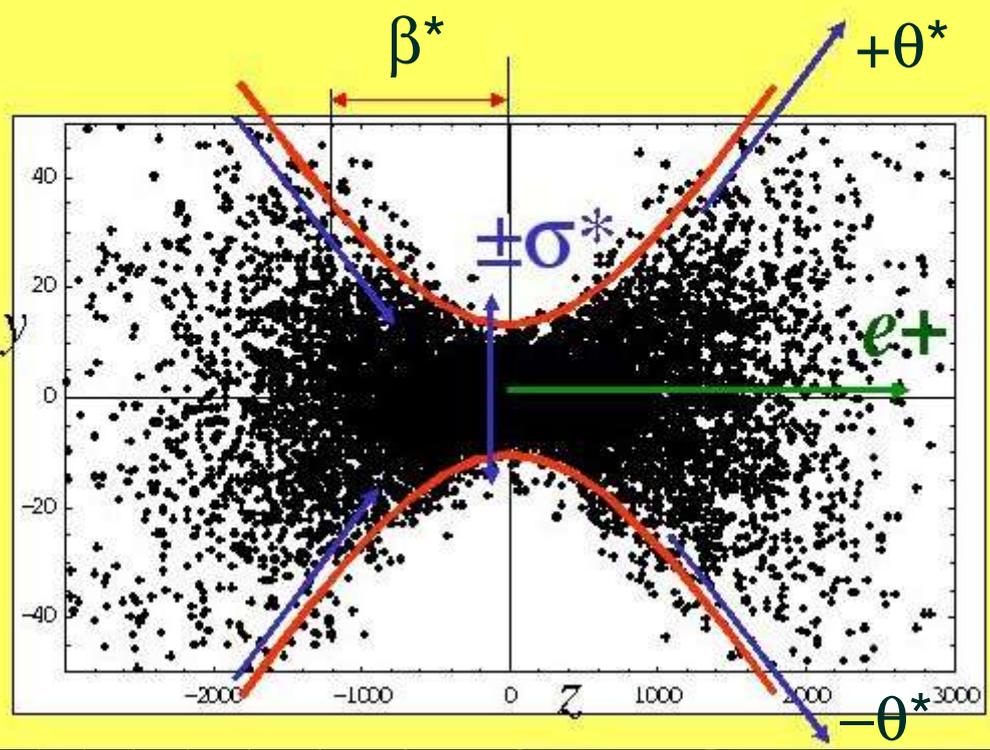
ou plus couramment en  $\text{fb}^{-1}$

$$1 \text{ fb} = 10^{-15} \text{ } 10^{-24} \text{ cm}^2$$

L'effet sablier

Au foyer, ou point d'interaction ,  
 l'émittance est  $\epsilon = \sigma^* \times \theta^* = \text{invariant faisceau}$   
 la 'profondeur du foyer' est  $\beta^* = \sigma^* / \theta^* = \sigma^{*2} / \epsilon$

Collision point



L' effet sablier requiert  
 $\sigma_z \leq \beta^* .$

Réduire  $\sigma^*$  n'améliore  
 pas sauf si  
 $\epsilon$  ou  $\sigma_z$  sont bien plus  
 faibles!

## Beamstrahlung

Dans les collisions les particules voient le champ de celles d'en face et peuvent émettre des photons par bremsstrahlung collisions  $\gamma\gamma$ .

Au linéaire les paquets sont si denses que les particules rayonnent dans le champ macroscopique des paquets opposés.



perte d' énergie moyenne:  $\langle \Delta E/E \rangle \propto 1/\sigma_z (\sigma_x^* + \sigma_y^*)^2$

$$\langle B \rangle = B_S \times 5r_e^2 N / 6\alpha_e \sigma_z (\sigma_x^* + \sigma_y^*)$$

où  $B_S = m_e^2 c^2 / e = 4.4 \checkmark 10^9 \text{ T}$  (champ de Schwinger)

$\langle B \rangle = 0.32 \text{ T @ LEP, } 60 \text{ T @ SLC, } 360 \text{ T @ TESLA}$

## Beamstrahlung

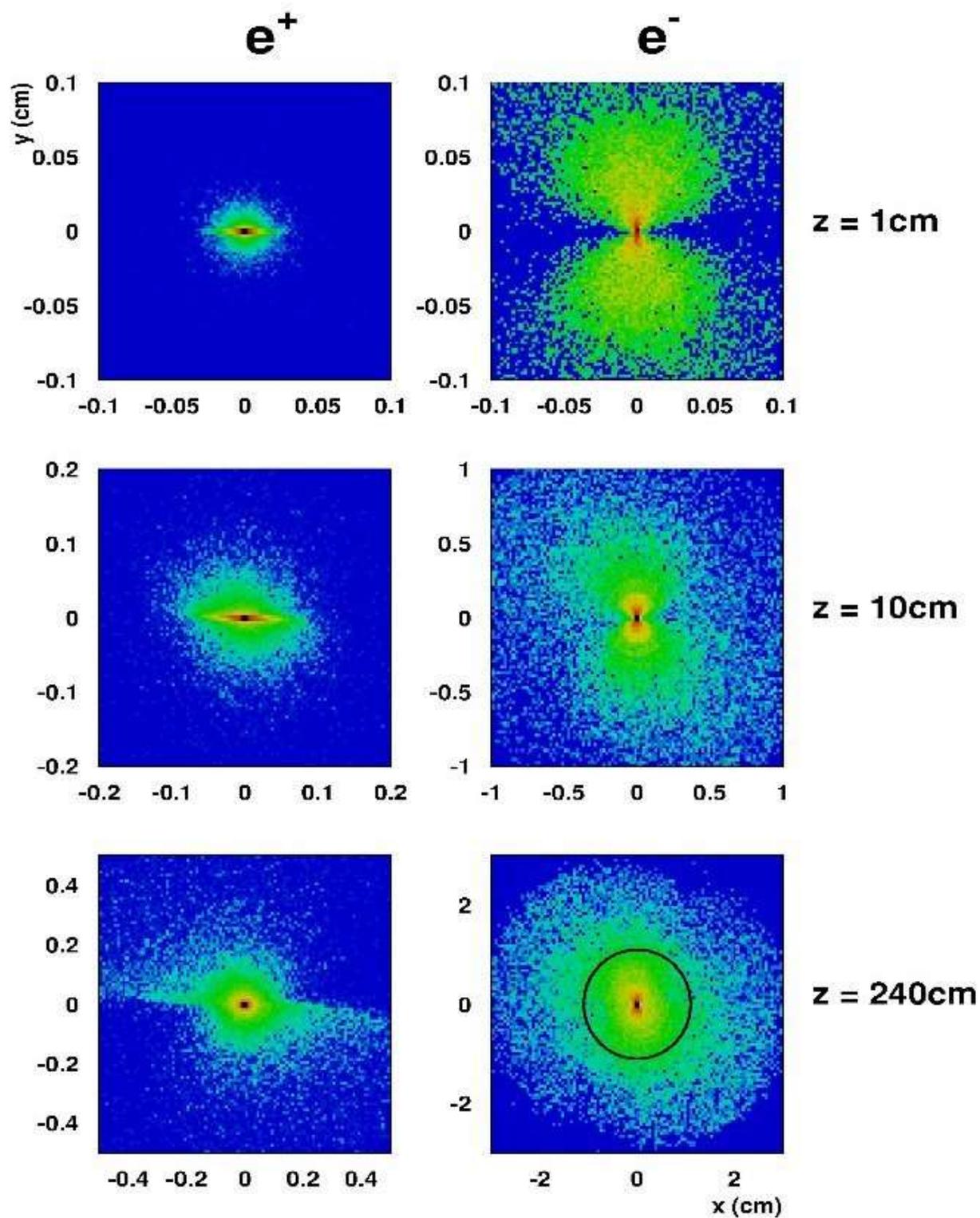
## Effets

Cette radiation entraîne une diminution de l'énergie dans le CM des collisions donnant un spectre en énergie étalé. Voir ZH.

Les photons de beamstrahlung induisent un fond d'interactions: création d'un nuage de paires  $e^+e^-$  et de minijets.

Problème de la détection des particules d'un événement très à l'avant.

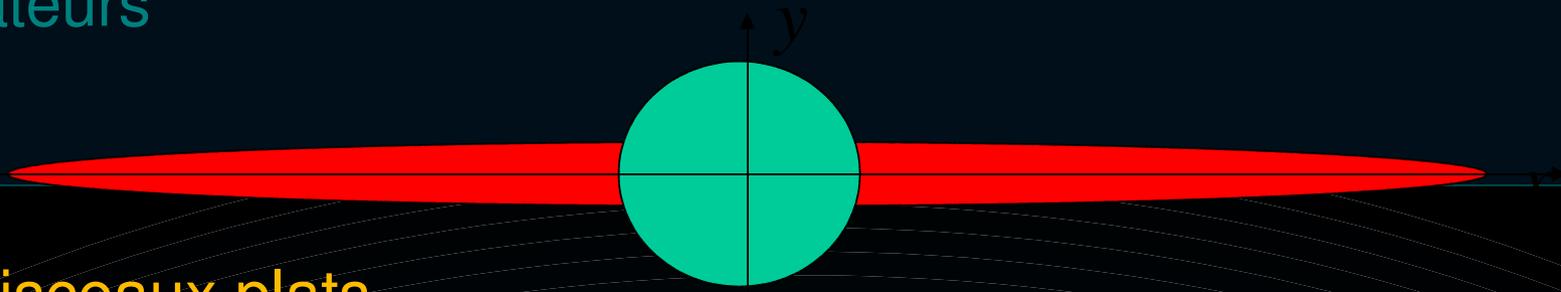
## Halo de paires



Le challenge de la luminosité au linéaire,  
pour une puissance consommée raisonnable

Dans un linéaire comme le LEP on a recirculation  
des paquets avec une fréquence de 44 kHz.

Ici fréquence de répétition = puissance consommée.  
on préfère jouer sur la taille de la zone d'interaction



## Faisceaux plats

En faisant  $\sigma_y^* \ll \sigma_x^*$  la force du beamstrahlung  
i.e.  $\langle \Delta E/E \rangle$ , est rendue indépendante de  $\sigma_y^*$ .

La luminosité est accrue en faisant  $\sigma_y^*$  petit.

Autre point de vue :

maximiser  $(\sigma_x^* + \sigma_y^*)$  à constant  $(\sigma_x^* \times \sigma_y^*)$

mène à des faisceaux plats avec:

$$\sigma_x^* \ll \sigma_y^* \text{ or } \sigma_y^* \ll \sigma_x^*$$

→ ‘lames de rasoir’ avec  $R = (\sigma_x^* / \sigma_y^*) \approx 100$

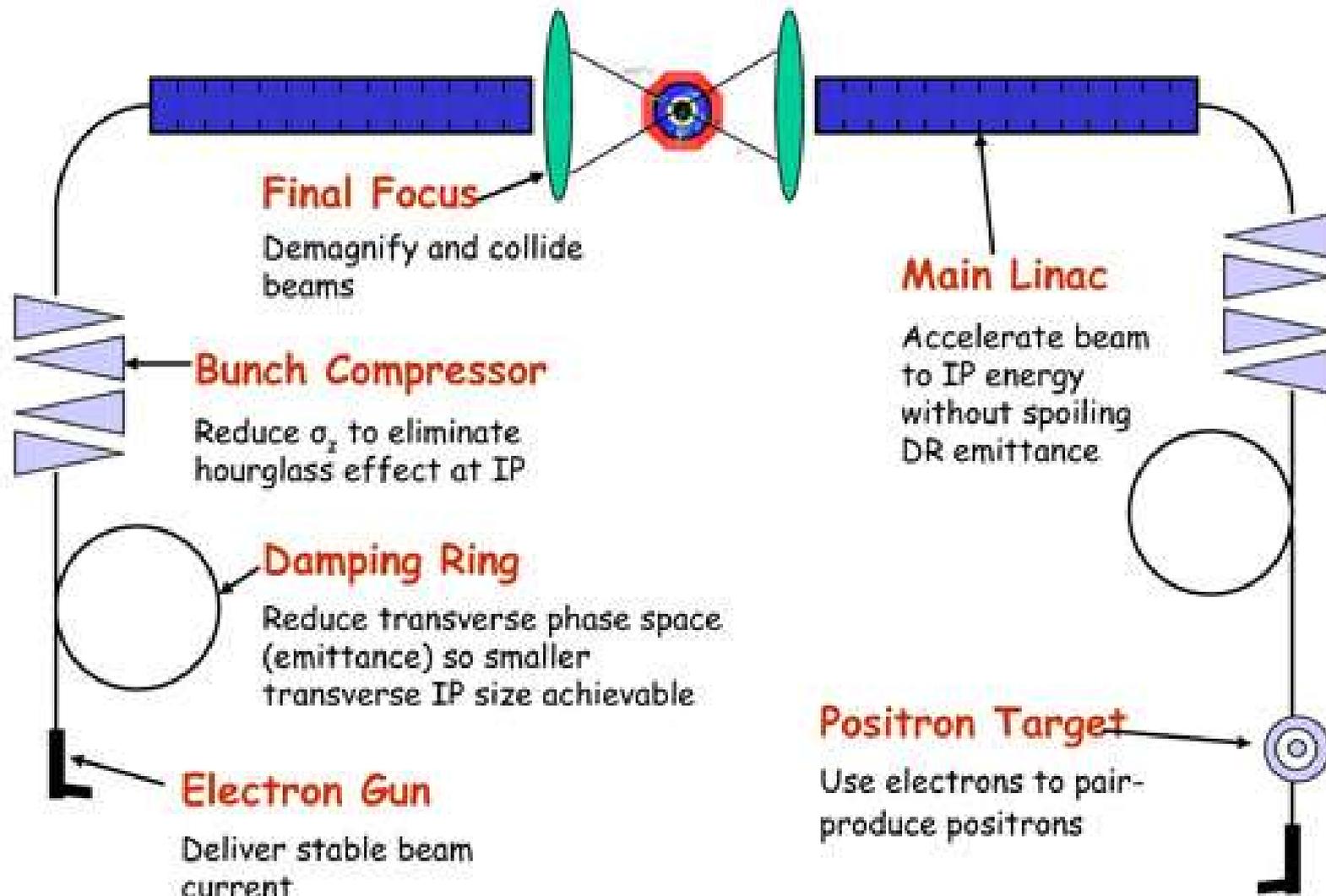
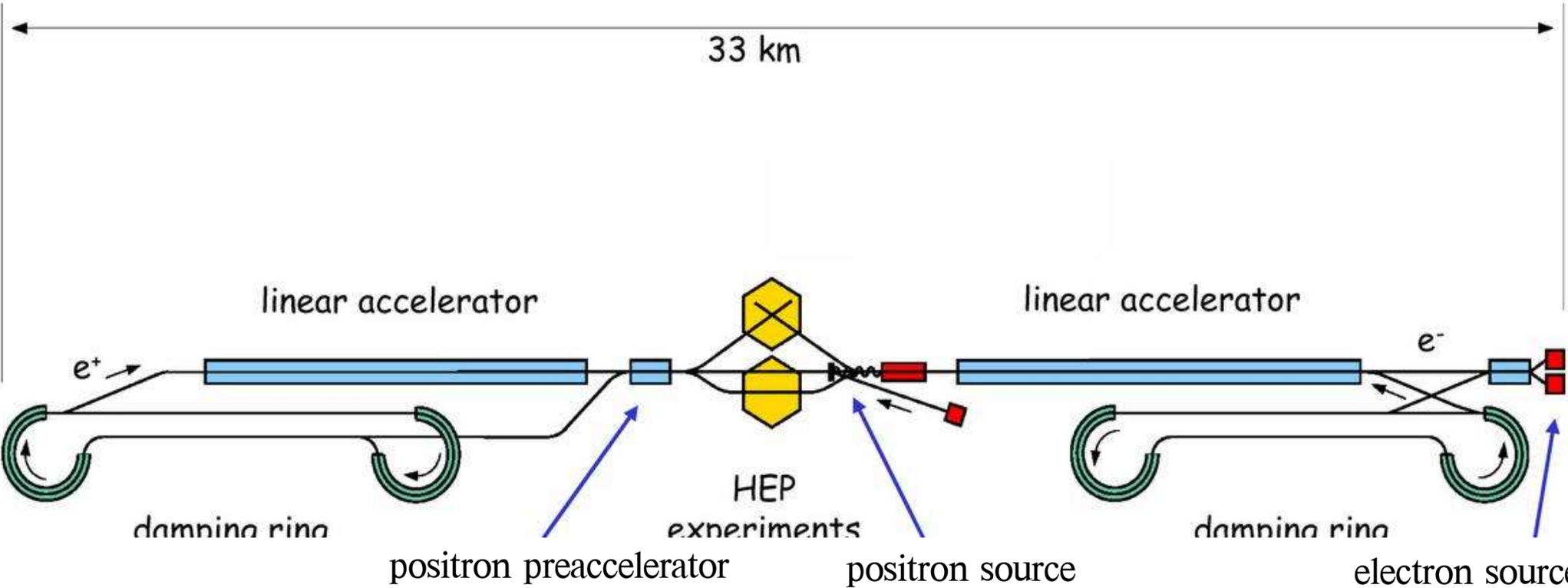


schéma de TESLA



## Structure en temps

## Supra

impulsion RF longue: 1 ms                      300 km

5 par seconde pour des raisons de puissance consommée  
des paquets toutes les 380 ns soit 3000 paquets par train

## Chaud

impulsion RF brève

100 Hz

des paquets toutes les 1,4 ns soit 200 paquets par train

## Examinons les autres éléments du collisionneur

Il faut:

produire les électrons

produire les positrons

réduire l'émittance

focaliser les faisceaux au point d'interaction

source d'électrons

source de positrons

anneaux de refroidissement

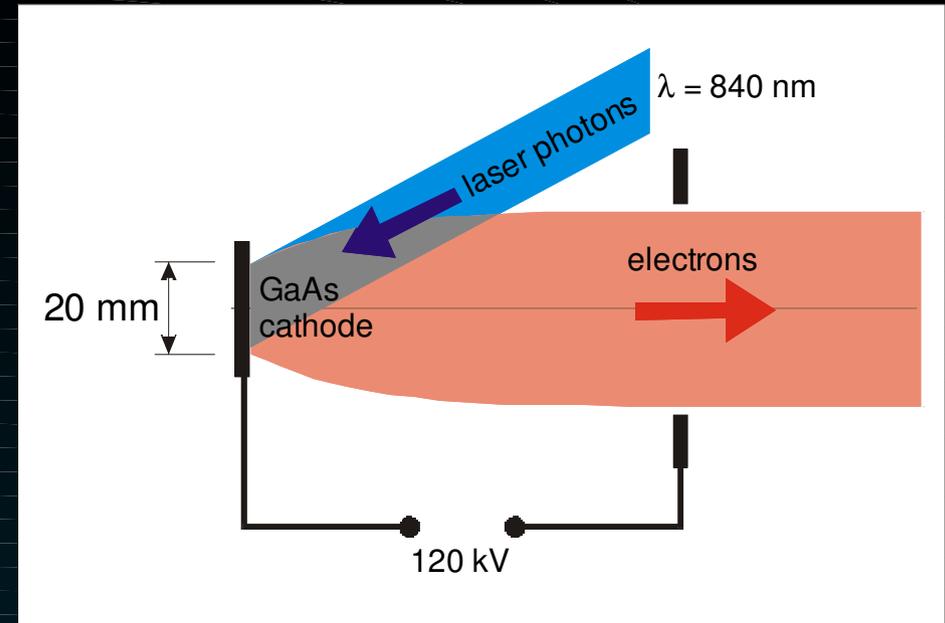
focalisation finale

## Sources;

produire de longs trains de paquets 100-1000 s @ 5-100 Hz  
de charge élevée quelques nC ou  $10^{10}$  particules  
avec une excellente émittance  $\varepsilon_{nx,y} \sim 10^{-6}, 10^{-8}$  m  
et polarisés (électrons et positrons)

## Source d' électrons

- photo-injecteur laser
- photons polarisés  
circulairement sur une  
cathode de GaAs  
→  $e^-$  polarisé  
longitudinalement
- impulsion laser modulée  
pour fournir la structure  
en temps requise
- vide très poussé requis  
pour GaAs ( $< 10^{-11}$  mbar)
- qualité du faisceau  
dominée par la charge  
d' espace (note  $v \sim 0.2c$ )



$$\epsilon_n \approx 10^{-5} m$$

gagner un

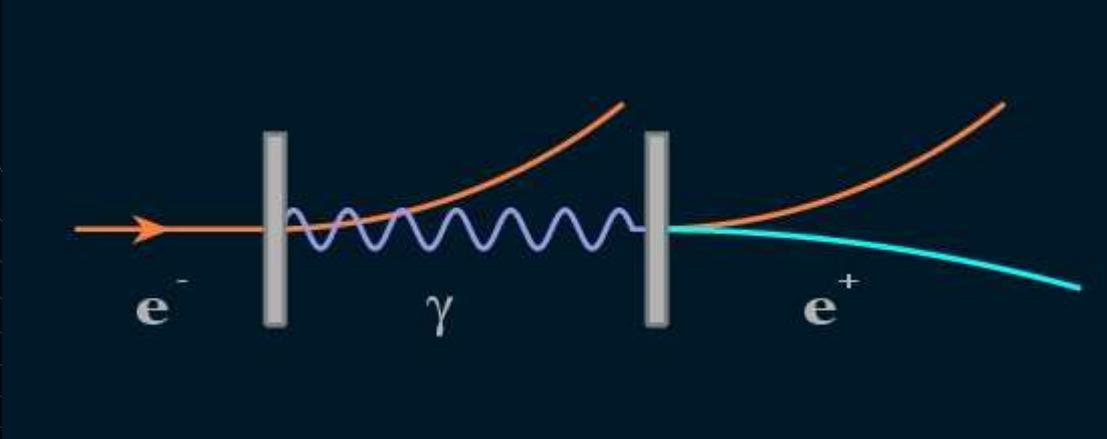
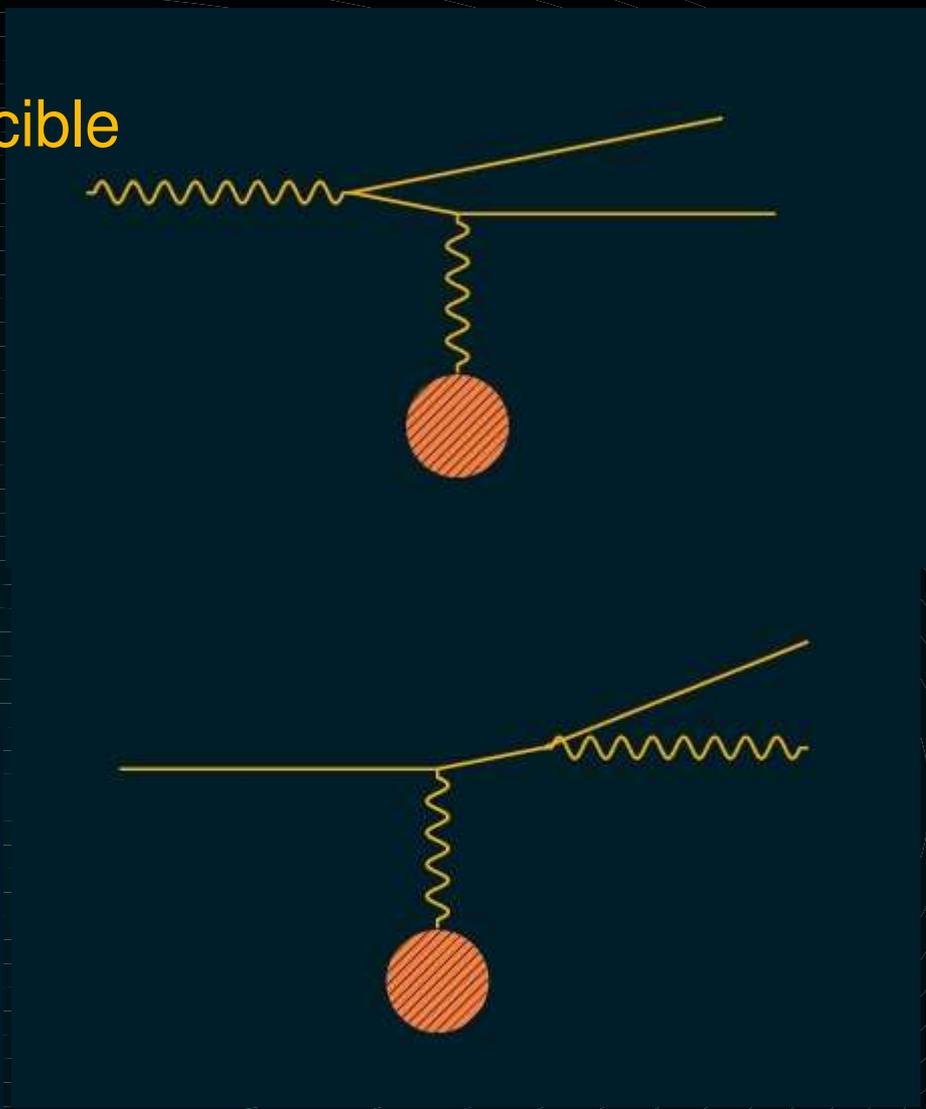
facteur 10 dans le plan x

facteur  $\sim 500$  dans le plan y

# Source de positron

Production de paires  $e^+e^-$   
par conversion de photons sur une cible

après que les photons ont été  
produits par Bremsstrahlung  
d'électrons sur une cible  
ou par un onduleur.



## De l' odueur

## Source de positron

Structure statique formant un champ électrique (ou magnétique) périodique:

$k$  est la fréquence spatiale,  
la longueur d'onde est  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  un électron arrive avec la vitesse  $\beta = \frac{p_e}{E_e}$

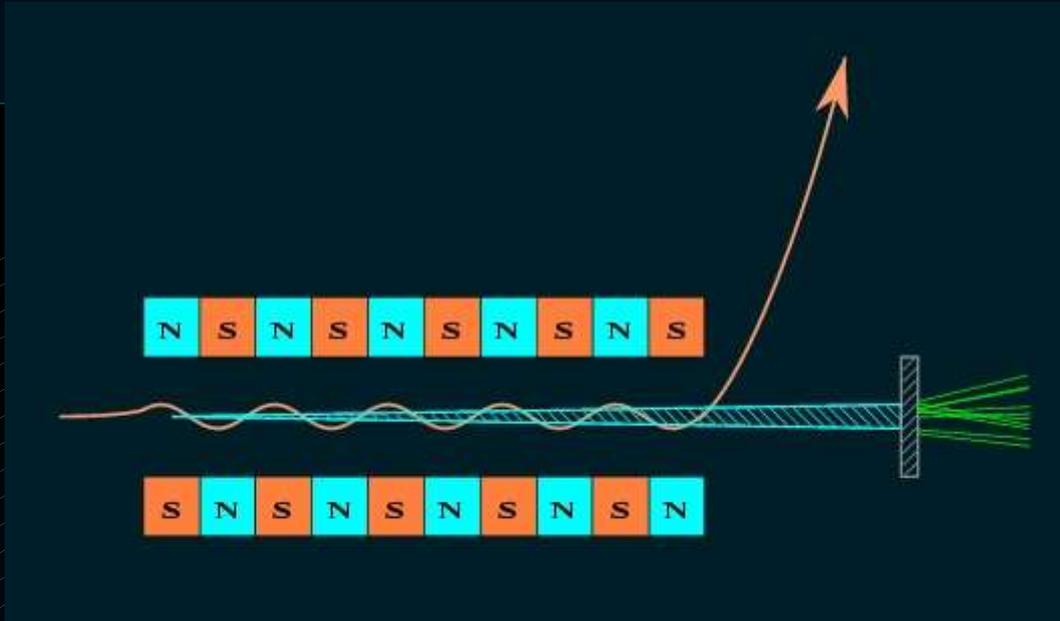
$$E_x = 0, \quad E_y = E_0 \cos kz, \quad E_z = 0$$

- Dans le système de l'électron:  $B_x' \sim E_y' = \gamma E_0 \cos k(\gamma z' + \beta \gamma t')$   
à haute énergie ( $\beta=1$ ) c'est une onde plane de fréquence  $k\gamma$   
ou un ensemble de photons d'énergie  $k\gamma$  polarisés linéairement
- Rétrodiffusion Si l'énergie des photons est  $\ll m_e$ ,  
les photons rétrodiffusés repartent avec une énergie  $hk\gamma$  ou  $\gamma\lambda^{-1}$
- Dans le laboratoire,  
les photons prennent un boost  $\gamma$  et leur énergie est  $\gamma^2\lambda^{-1}$

Exemple: structure de 1mm, électrons de 150 GeV,  $\gamma = 3 \cdot 10^5$

1mm  $\Rightarrow 10^{-3}$  eV donc  $E_\gamma = 90$  MeV

## De l' onduleur



- La radiation synchrotron de l'onduleur produit des photons de 30 MeV
- une cible de  $0.4X^0$  produit les paires  $e^+ e^-$
- une cible mince réduit la diffusion d'où une meilleure émittance, qui reste bien trop grande.  $10^{-2}$  m
- moins de puissance déposée dans la cible 5 kW
- mais une énergie des électrons  $> 150$  GeV!

Et la polarisation

## Anneaux de refroidissement

Anneaux dans lesquels le train de paquets est stocké pendant un temps  $T$  ( $\sim 20-200$  ms)

L'émittance diminue alors par le jeu de l'émission synchrotron associé à l'accélération par la RF.

$$\epsilon_f = \epsilon_{eq} + (\epsilon_i - \epsilon_{eq}) e^{-2T/\tau_D}$$

émittance finale

émittance d'équilibre

émittance initiale  
( $\sim 0.01$  m pour  $e^+$ )

temps de refroidissement

- Espace de phase longitudinal

Les particules subissent des oscillations synchrotron dans le potentiel focalisant de la RF

Les particules les plus énergétiquesradient l'énergie plus vite dans les courbes

A l'énergie d'équilibre la période de révolution est un multiple de la période RF (le principe du synchrotron?)

- Espace de phase transverse

- Les particules subissent des oscillations autour de l'orbite fermée

- La radiation est émise dans un cône étroit centré sur la direction du mouvement instantané

- L'énergie est rétablie par les cavités RF longitudinalement

- L'effet combiné de la radiation et de la RF est une perte d'impulsion transverse.

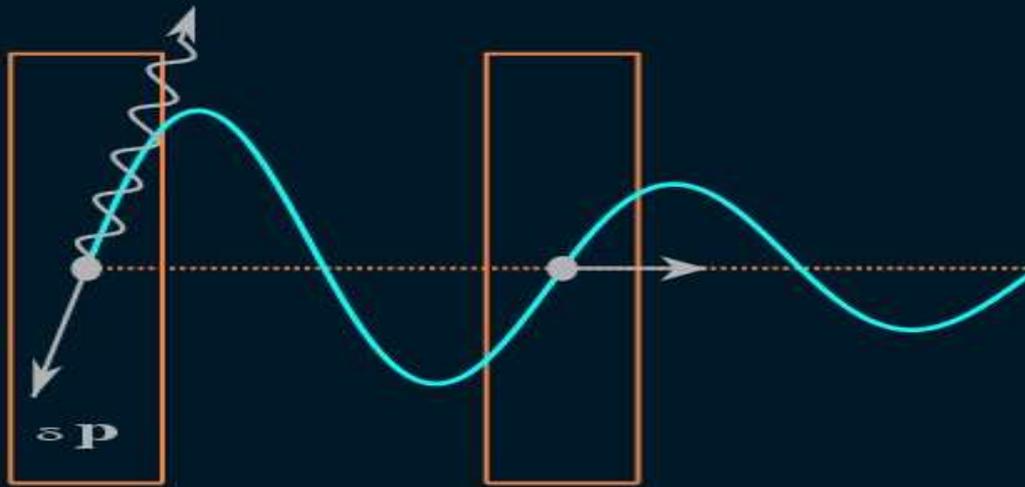
$$\mathcal{K} = 2 \frac{E_0}{U_0} T_0$$

Le temps de refroidissement dans tous les plans est donné par:

⇒ Les anneaux **de refroidissement** produisent naturellement des faisceaux plats !

Horizontal emittance  $\varepsilon_x^{eq}$   
set by the dispersion of trajectories with random energies around the ring.  
**Vertical emittance  $\varepsilon_y^{eq}$**   
set by the random angle of  $\gamma$  emission, and  
by  $x$ - $y$  coupling defects.

la pente  $y'$  n'est pas modifiée  
par l'émission de photon



$p$  remplacé par la RF en sorte que

$$p_z = p.$$

en raison du refroidissement  
adiabatique  $y' = dy/ds = p_y/p_z$ ,  
et l'amplitude est réduite par:

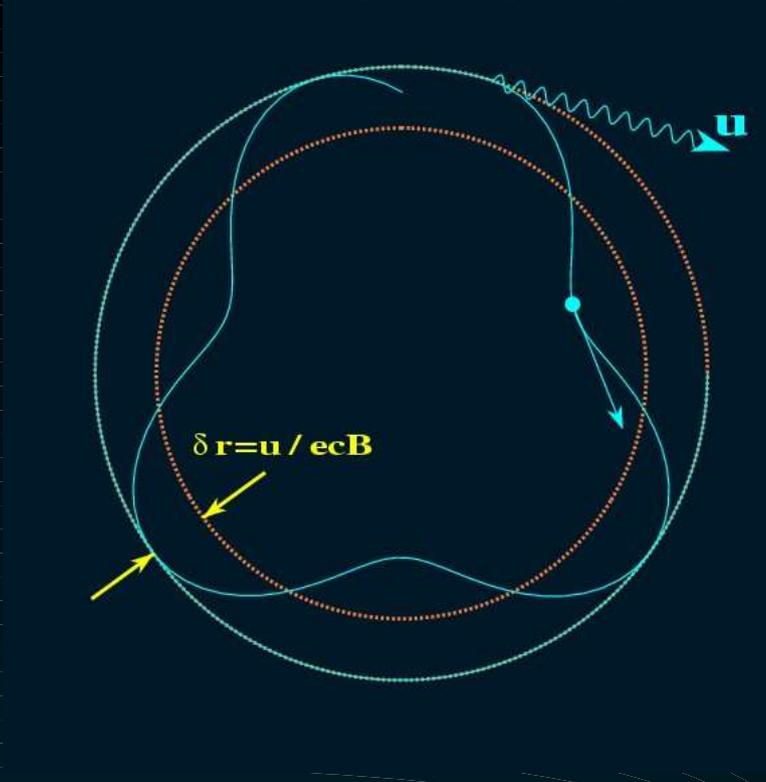
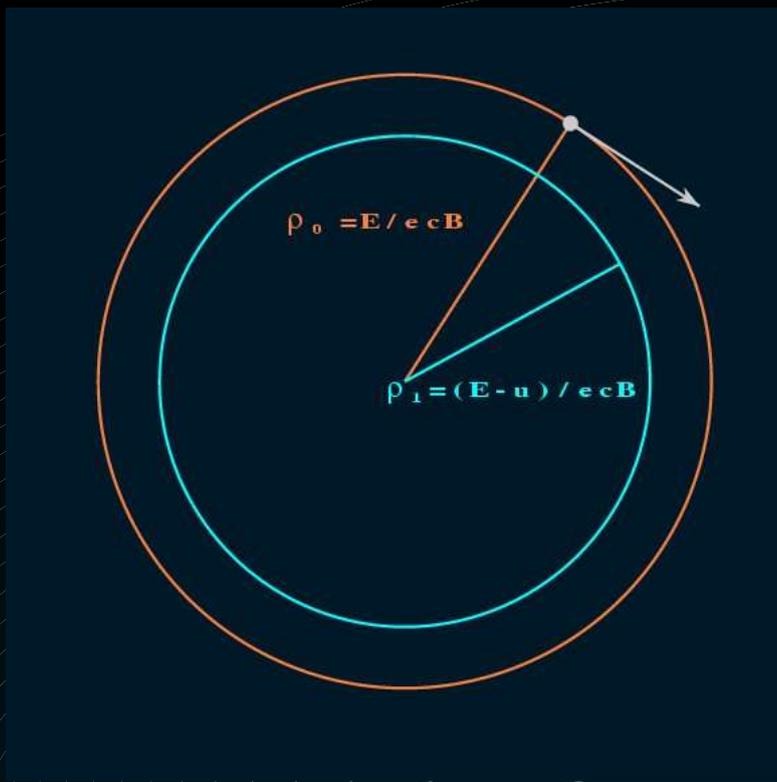
$$y' = p y'$$

On doit moyennner sur toutes les phases :

$$\tau_D \approx \frac{2E}{\langle \vartheta_y \rangle} \quad \text{avec} \quad \vartheta_y \propto E^4 \rho^{-2} \quad \text{d'où} \quad \tau_D \propto E^{-3} \rho^2$$

LEP:  $E \sim 90 \text{ GeV}$ ,  $P \sim 15000 \text{ GeV/s}$ ,  $\tau_D \sim 12 \text{ ms}$

Anneaux de refroidissement



particle now performs  $\beta$ -oscillation about  
 new closed orbit  $\rho_1$  increase in  
 emittance

Equilibrium achieved when

$$\frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = Q$$

$$\frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = 0 = Q - \frac{2}{d} \langle x^2 \rangle$$

## Anneaux de refroidissement

$D \propto \frac{1}{E^2}$  suggests high-energy and small ring. But

required RF power:  $P_{RF} \propto \frac{E^4}{2} n_b N$

equilibrium emittance:  $n_{,x} \propto \frac{E^2}{2}$

an example:

- Take  $E = 2 \text{ GeV}$
- $B_{bend} = 0.13 \text{ T}$        $50 \text{ m}$
- $\langle P \rangle = 27 \text{ GeV/s}$  [28 kV/turn]
- hence  $D = 148 \text{ ms}$  - Few ms required!!!  
Increase  $\langle P \rangle$  by ?30 using *wiggler magnets*

Remember: 8?  $D$   
needed to reduce  $e^+$   
vertical emittance.

Store time set by  $f_{rep}$ :

$$t_s = n_{train} / f_{rep}$$

radius:

$$= \frac{n_{train} n_b t_b c}{2}$$

## ... et les excitations quantiques

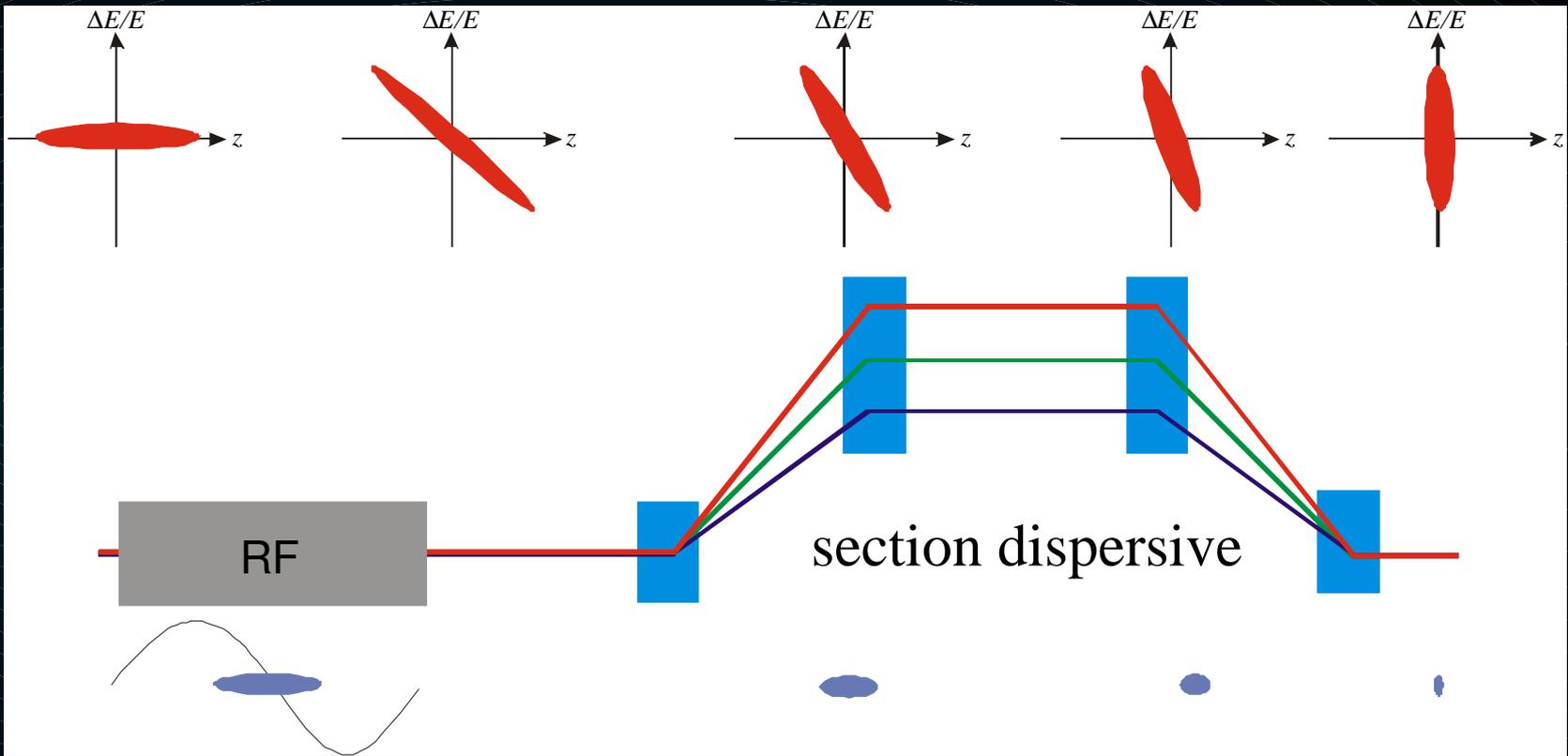
En fait

L' émission de photons n'est pas un phénomène continu,  
la radiation est émise en quanta discrets  
dont le nombre et le spectre en énergie suivent des lois statistiques  
Le processus d' émission peut-être modelé comme une série de "kicks"  
qui excitent des oscillations longitudinales et transverses

# Compression des paquets

La longueur des paquets issus de l'anneau de refroidissement  
~ qq mm  
au point d'interaction elle doit être 100-300  $\mu\text{m}$

espace de phase longitudinal



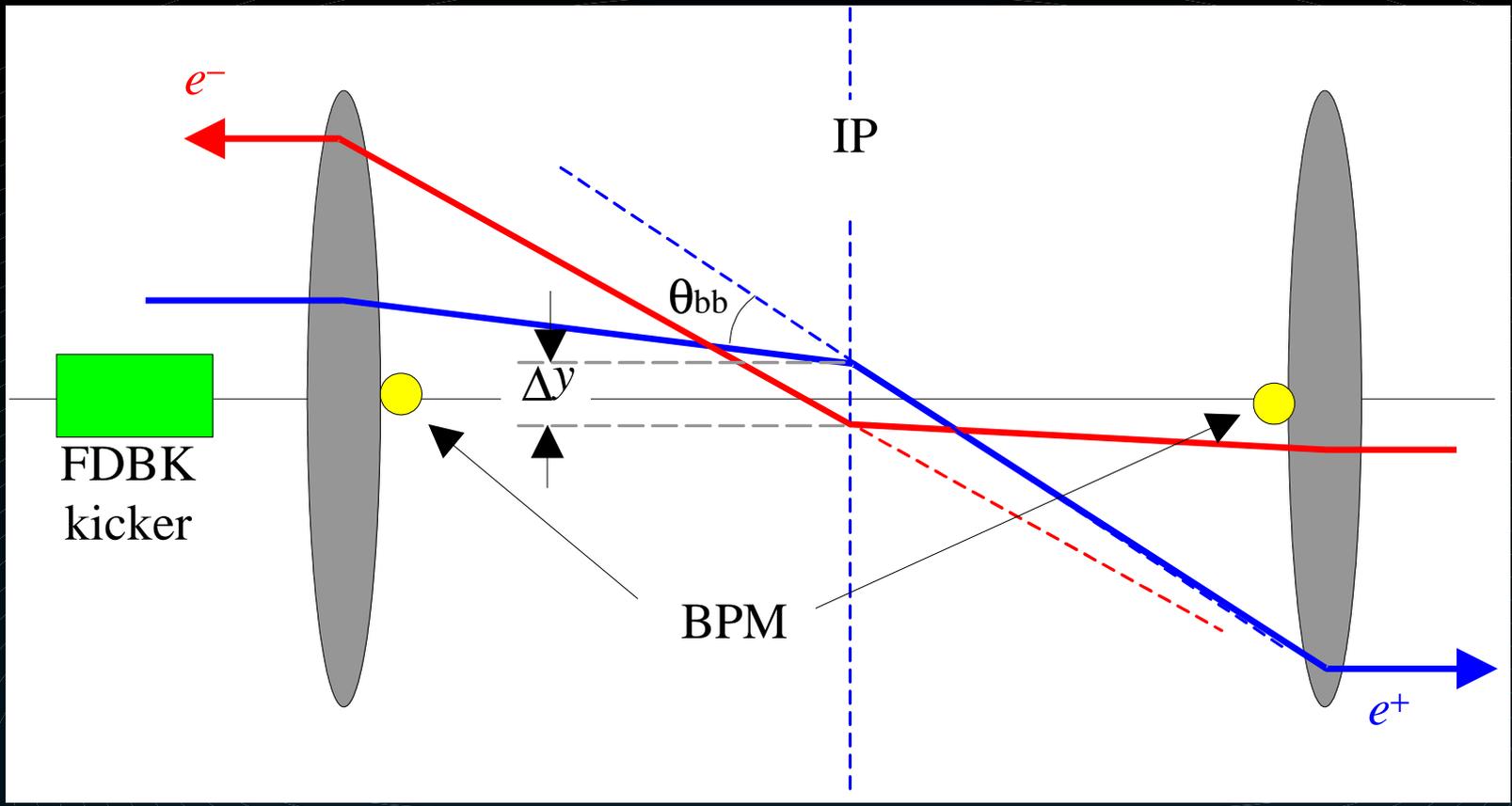
## Focalisation finale

Corrections chromatiques

# Stabilité

- Faisceaux d'émittance très faible
- Tolérances très serrées sur les composants
  - Qualité des champs
  - Alignement
- Question des vibrations et des mouvements du sol
- Stabilisation active
- Systèmes de contre-réaction

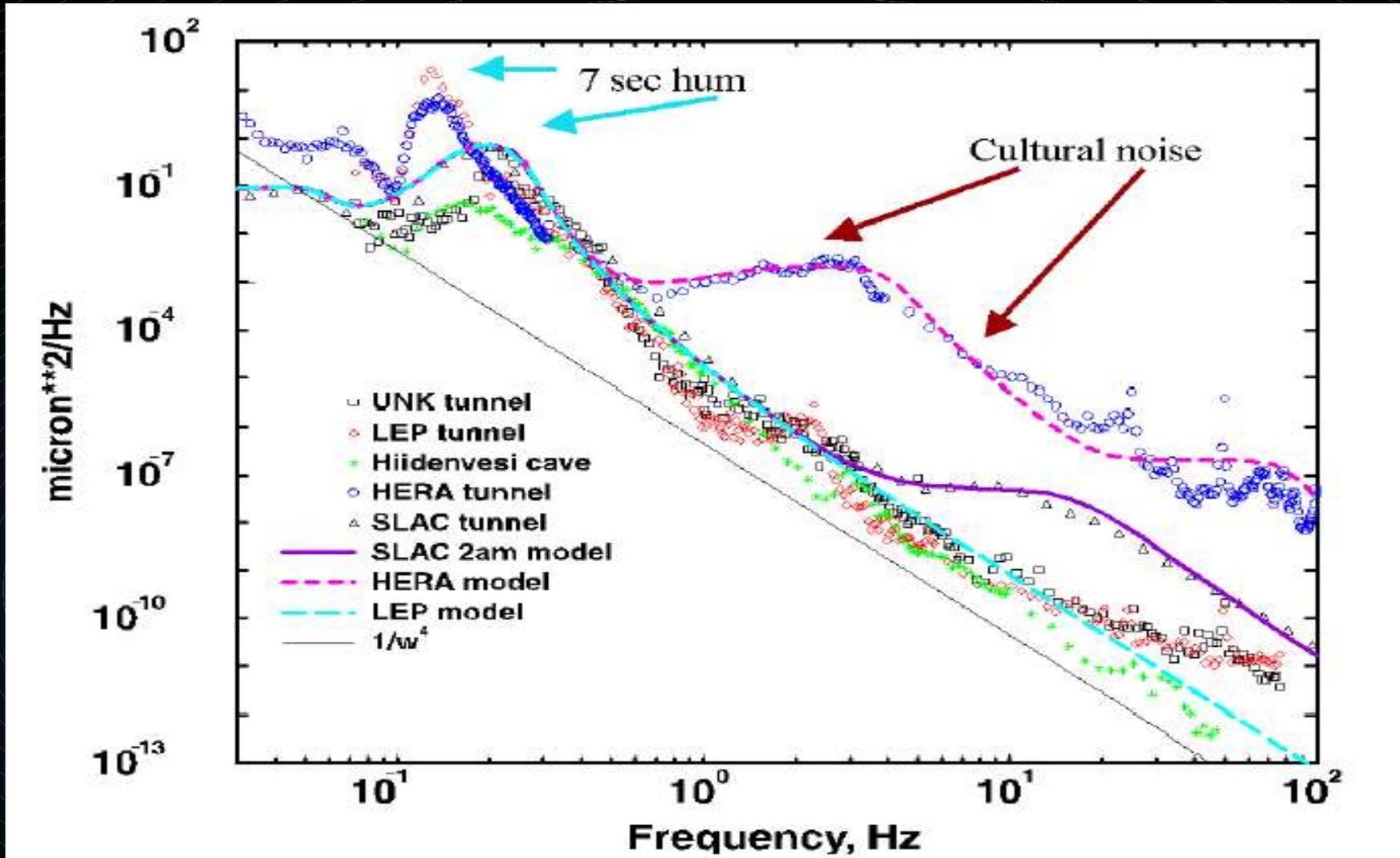
# Beam-Beam orbit feedback



use strong beam-beam kick to keep beams colliding

Generally, orbit control (feedback) will be used extensively in LC

# Ground motion spectra



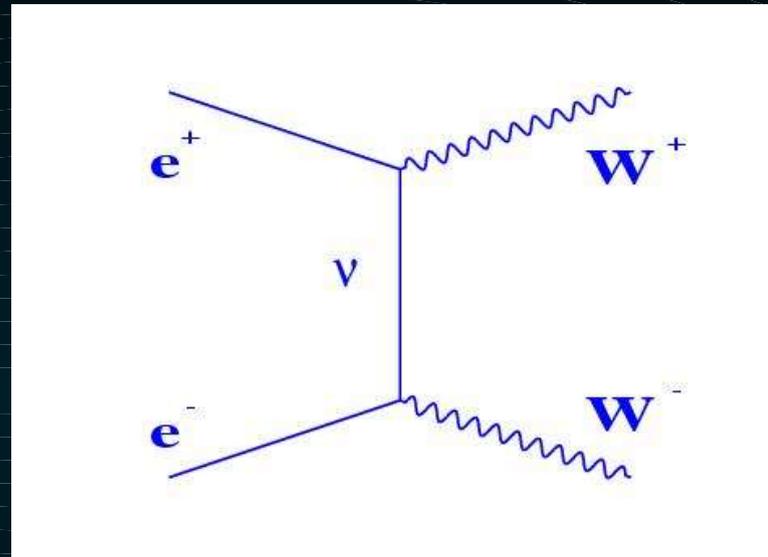
## Mesure de la luminosité

Par l'utilisation de réactions de référence bien connues théoriquement

Usuellement la diffusion Bhabha

mais très grande sensibilité à la mesure de l'angle  $\theta^4$ .

Utilisation de WW



# Polarisation

Ingrédient essentiel de nombreux sujets de physique  
particulièrement au GigaZ pour la mesure de  $A_{LR}$

Les électrons peuvent être polarisés à 80% ou mieux

canon à électrons avec cathode en GaAs illuminée par laser  
dans un champ électrique raisonnable (pas RF)

Les positrons le pourraient à 60%

onduleur plus anneau de refroidissement

Il est essentiel de la connaître avec une bonne précision

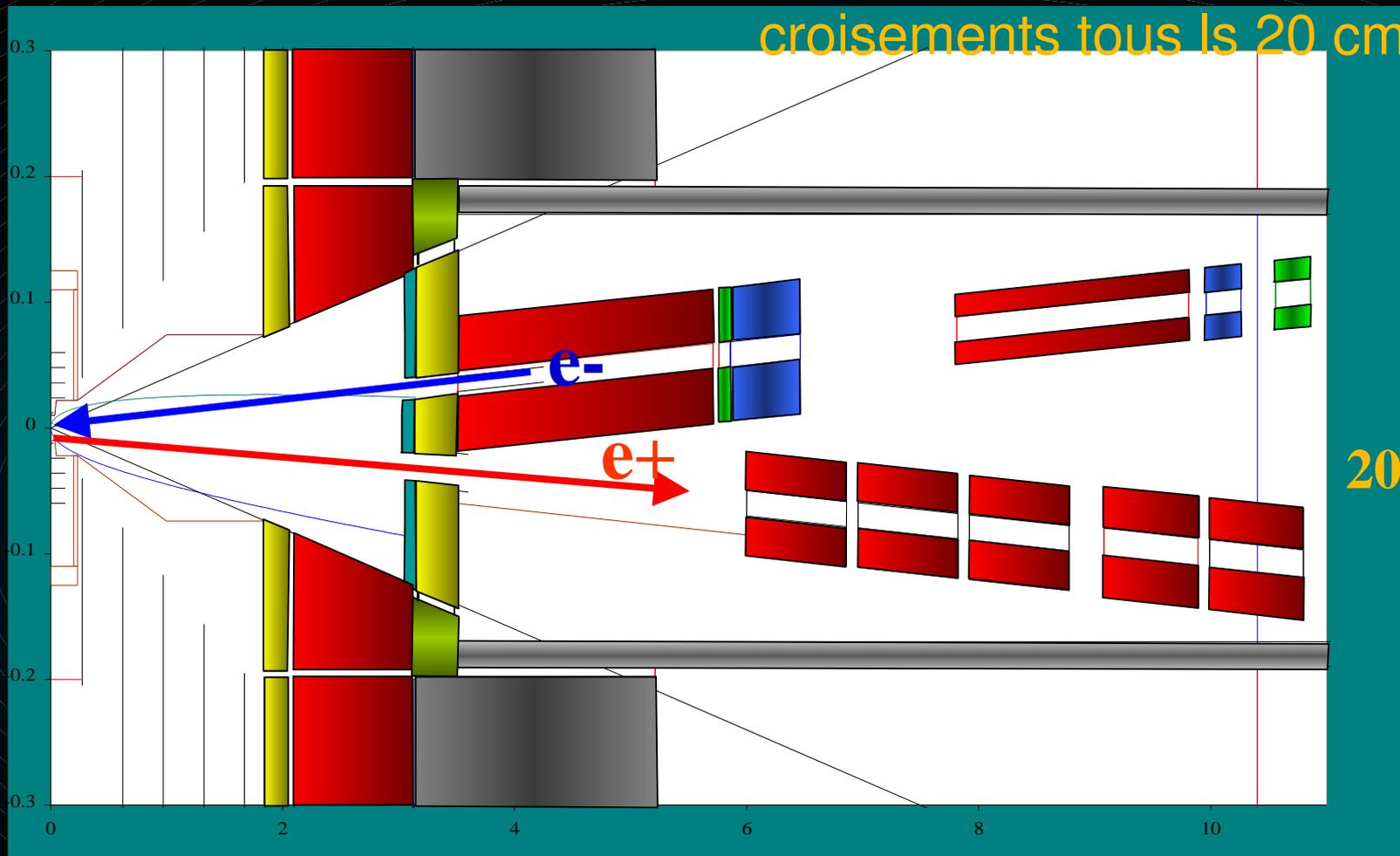
Polarimètre / mesure à partir des données  
utilise WW à l'avant

Référence: Klaus Mönig LC-PHSM-2004-012

## Dessin de la zone d'interaction

## Croisement à angle des faisceaux

Une nécessité dans la solution chaude,  
paquets distants de 40 cm (1,4 ns)  
croisements tous les 20 cm



20 mrad NLC IR

from T.Markiewicz

Option  $e^- e^-$

Luminosité réduite d'un facteur 3

Pas de problème technique

double beta inverse

Avec polarisation gauche étude de  
LNV violation du nombre leptonique  
LFV violation des saveurs leptoniques

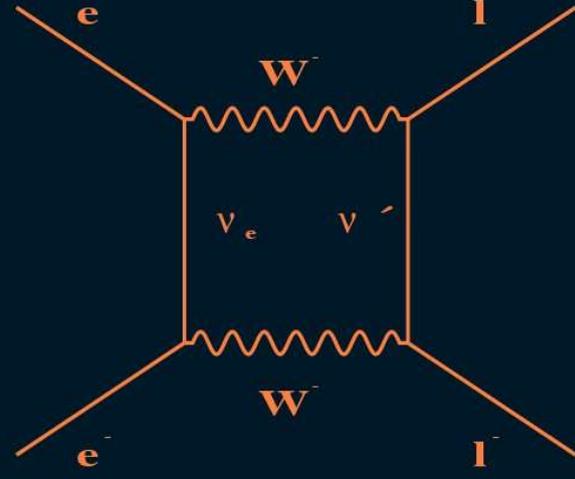
Diffusion  $W^- W^-$  isospin 2

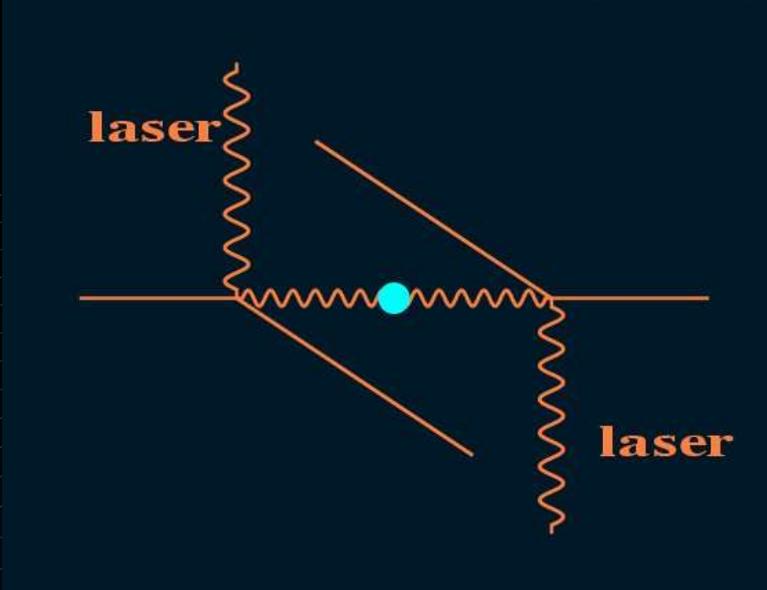
Higgs doublement chargé

Diffusion Møller pour voir des  $Z'$

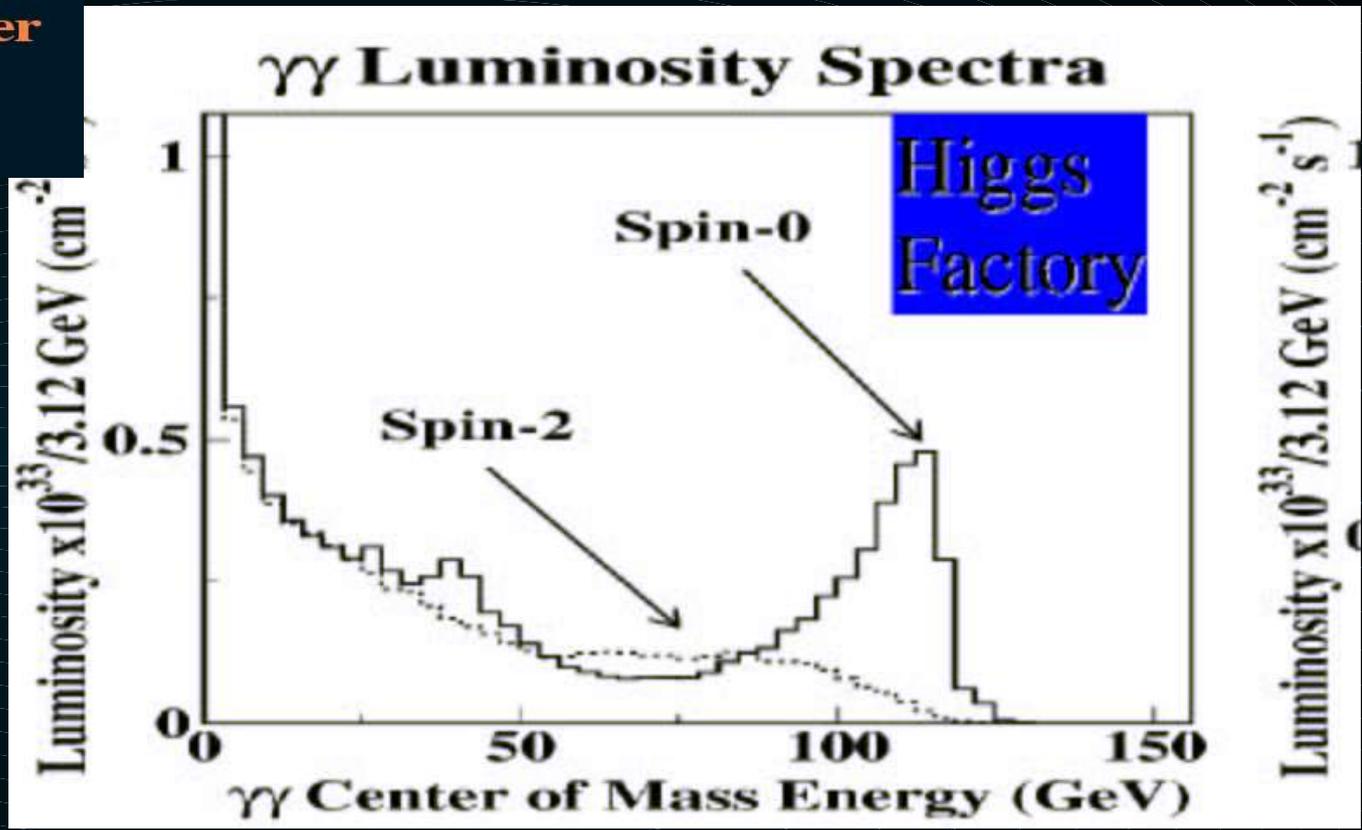


probabilité en  $M_\nu^2$

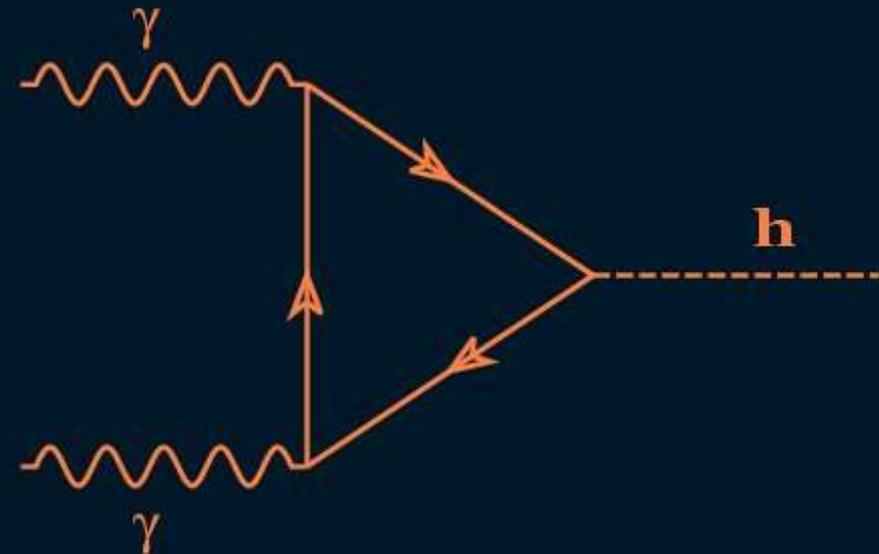




Problème de la puissance laser:  
recyclage



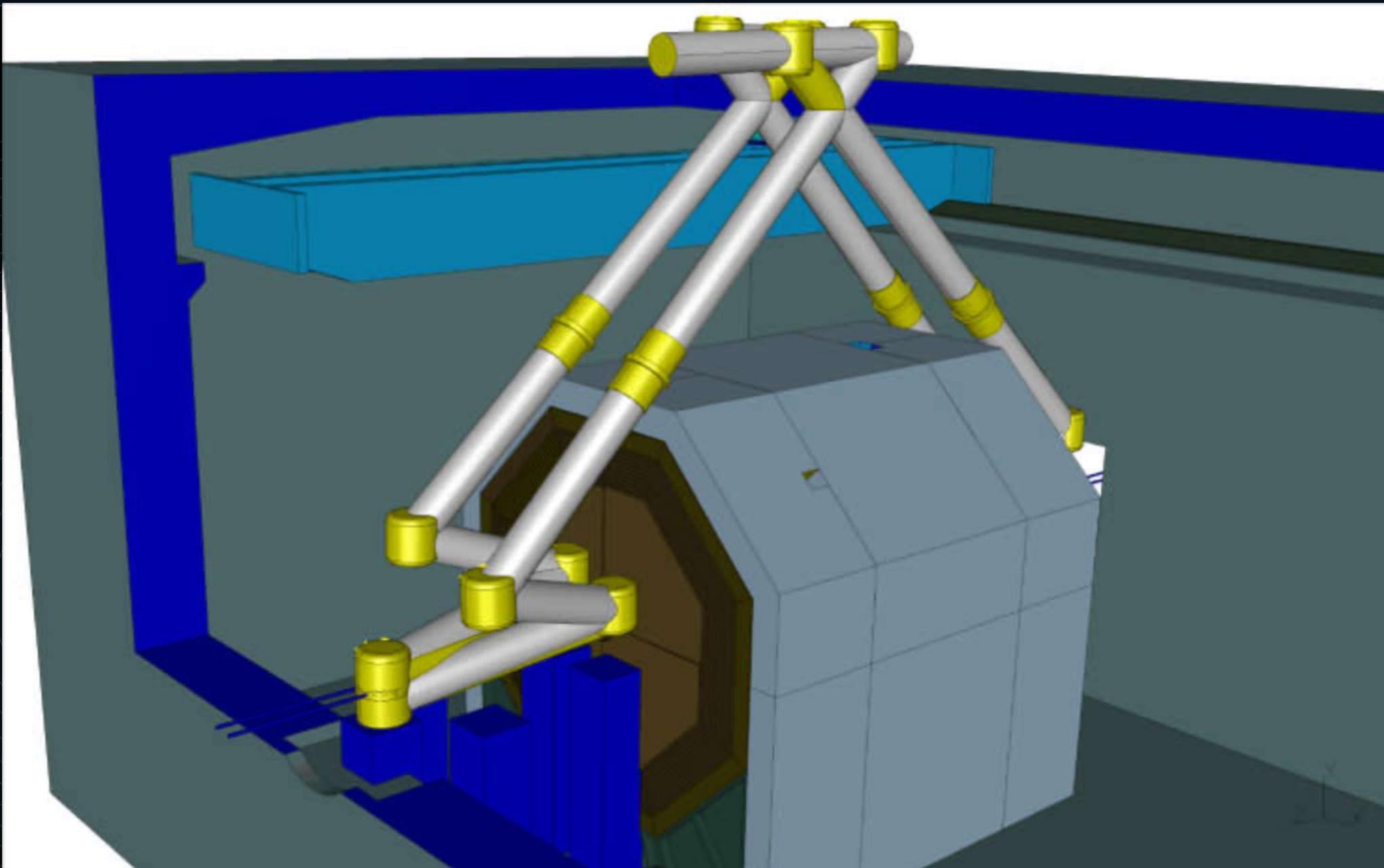
## Usine à Higgs

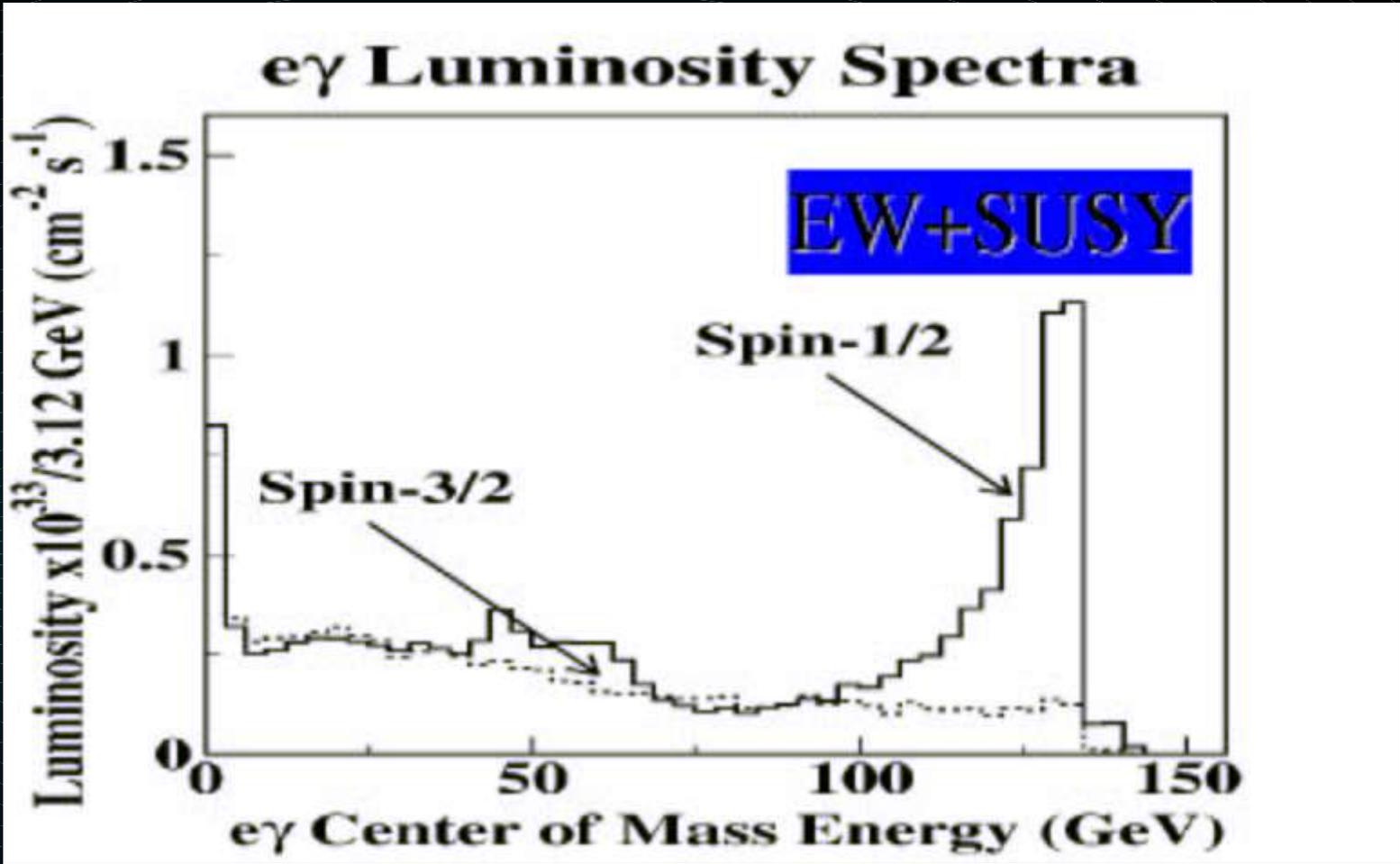


21000 H (120) par an  
pour TESLA à 160 GeV

$\Gamma_\gamma$  mesuré à 2% par an  
donne 4% sur le couplage  $Htt$ .

Option  $\gamma\gamma$





Fin des accélérateurs