

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2024-2025

Première partie - L. Favart

IV - Les accélérateurs

Contenu Chapitre IV

IV. Les accélérateurs de particules

1. L'accélération
2. Accélérateurs linéaires (LINAC)
3. Cavités accélératrices radio fréquences
4. La focalisation
5. Accélérateurs circulaires: Synchrotrons
6. L'émittance
7. Le rayonnement synchrotron
8. Les complexes d'accélérateurs (CERN, HERA,...)
9. Les faisceaux secondaires

Objectifs

1) pouvoir de résolution

$$\lambda(cm) = \frac{h}{p} = \frac{1.24 \cdot 10^{-10} \text{MeV s}}{p[\text{MeV}/c]}$$

Δx (cm)	énergie	domaine
10^{-5}	2 eV	microscope
10^{-8}	2 keV	rayons X
10^{-11}	$2 \text{ MeV} \simeq 40 m_e$	rayons γ
10^{-14}	$2 \text{ GeV} \simeq 2 m_p$	accélérateurs
10^{-16}	$200 \text{ GeV} \simeq 2 m_Z$	accélérateurs
10^{-18}	20 TeV	accélérateurs (limite actuelle)

2) création de nouvelles particules

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0 \quad \text{possible si} \quad s \geq (2m_p + m_{\pi^0})^2$$

La luminosité

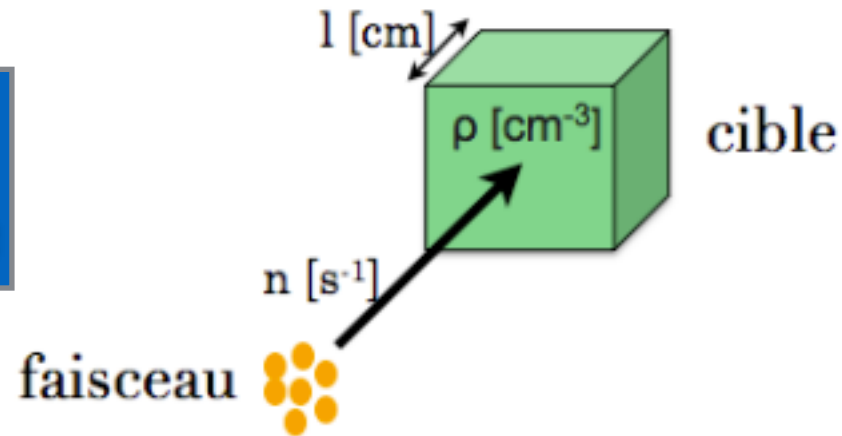
taux d'evt/s

$$n = \sigma \mathcal{L}$$

et la luminosité intégrée

$$N_{Tot} = \int dt \sigma \mathcal{L} = \sigma \mathcal{L}_{Tot}$$

Mode
cible fixe



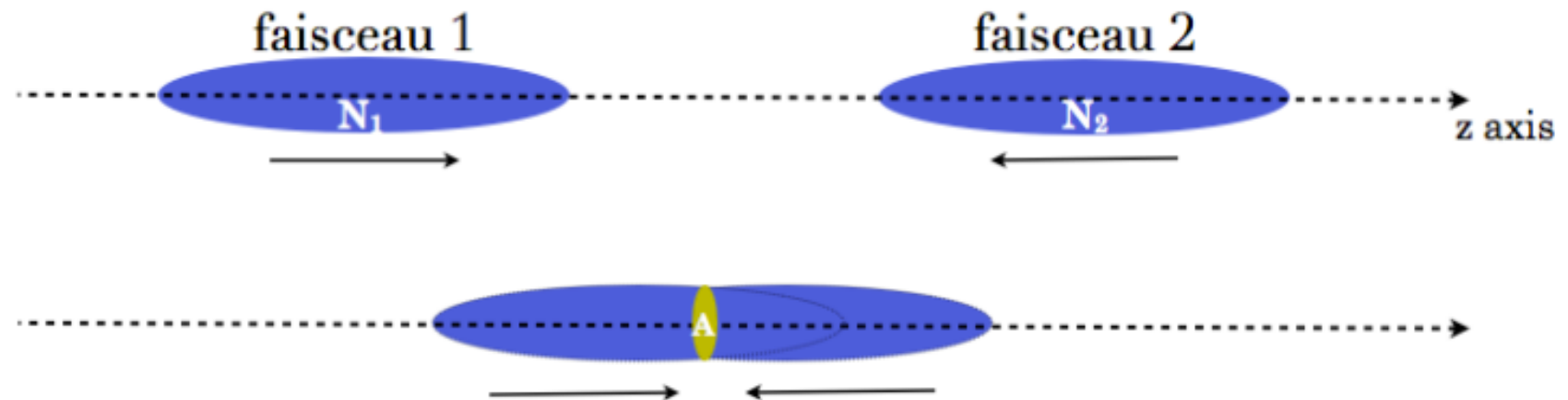
$$\mathcal{L}[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] = n \rho l$$

ρ : densité de particules dans la cible ($[\text{cm}^{-3}]$)

l : épaisseur de la cible ($[\text{cm}]$)

n : taux de particule du faisceau ($[\text{s}^{-1}]$)

Mode
collisionneur



$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{A} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

↓
profil gaussien

N_1 et N_2 : nombre de particules par paquet des faisceaux

N_b : nombre de paquets qui entrent en collision

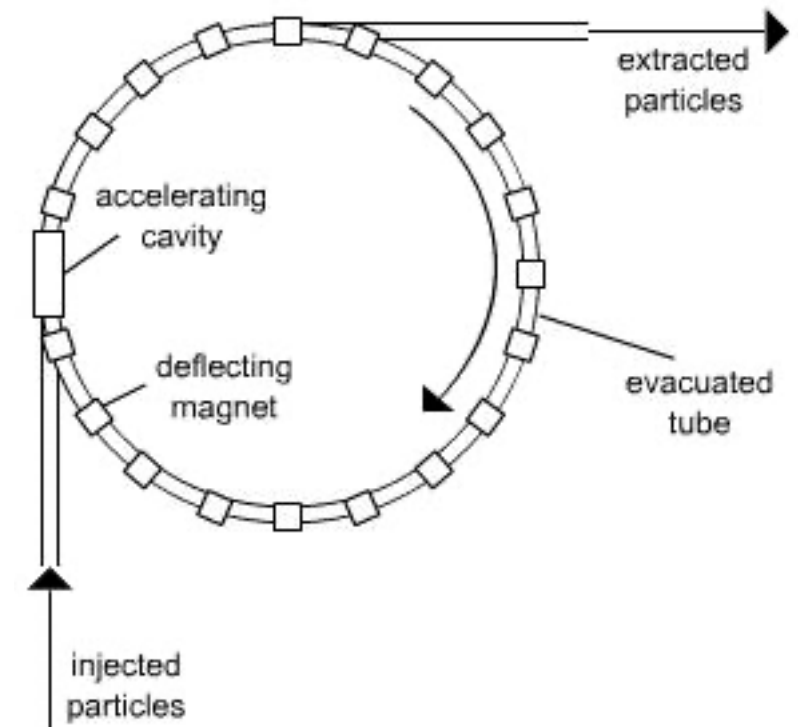
f : fréquence de révolution [s^{-1}]

A : aire de l'ellipse de recouvrement des faisceaux [cm^2]

Principes de base

Les éléments de base d'un accélérateur sont :

1. la source : des particules stables ou des ions
2. un chambre à vide
3. un dispositif de guidage et de focalisation
4. un dispositif d'accélération
5. un cible (qui peut être un autre faisceau)
6. un système de contrôle
7. le blindage, pour protéger le personnel et le matériel des radiations



guidage, focalisation et accélération :

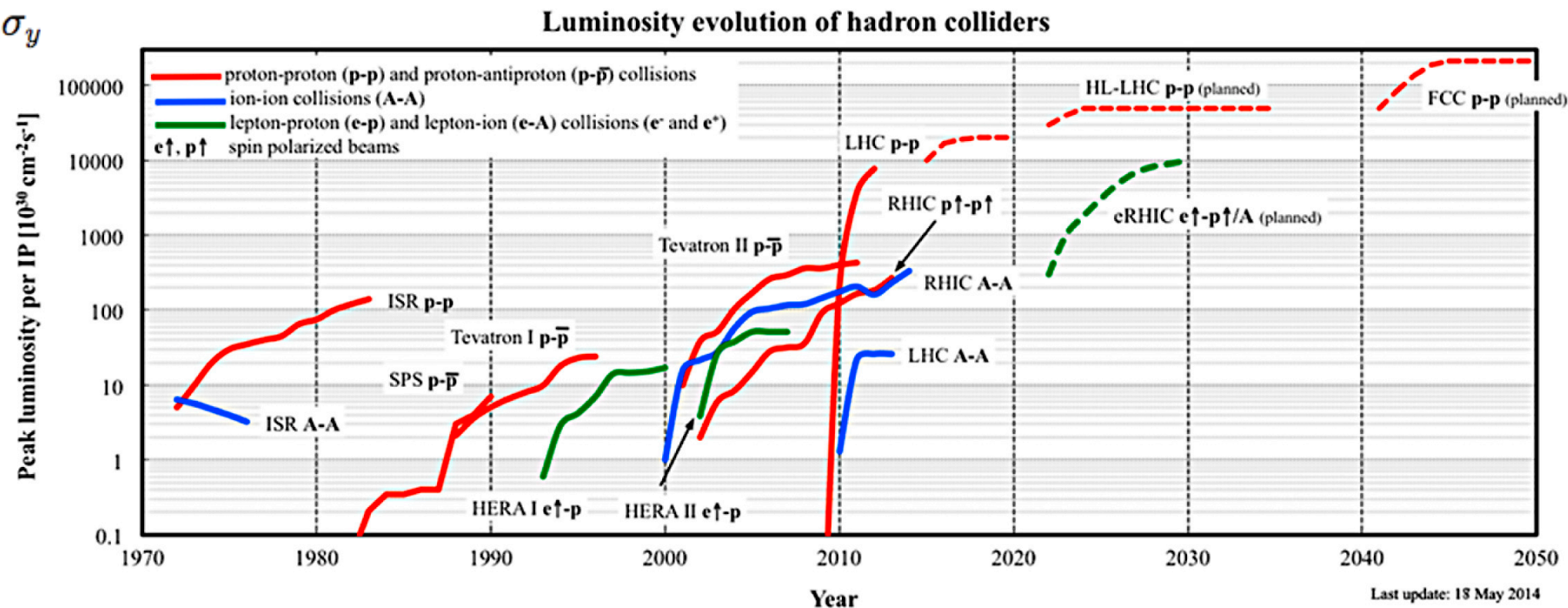
$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int \vec{F} \cdot \vec{v} dt = q \int (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dt \\ &= q \int \vec{E} \cdot \vec{v} dt \quad \text{seul E permet d'accélérer les particules} \end{aligned}$$

Principaux collisionneurs

accélérateur	énergies [GeVxGeV]	$\mathcal{L}$ [$10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	fréquence [s^{-1}]	σ_x/σ_y [$\mu\text{m}/\mu\text{m}$]	particules par paquet
SPS ($p\bar{p}$)	315x315	6	$4 \cdot 10^5$	60/30	10^{10}
TeVatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	100	$4 \cdot 10^6$	30/30	$30/8 \cdot 10^{10}$
HERA (ep)	30x920	50	$10 \cdot 10^9$	250/50	$3/7 \cdot 10^{10}$
LHC (pp)	7000x7000	15000	$40 \cdot 10^9$	17/17	$11 \cdot 10^{10}$
LEP (e^+e^-)	105x105	100	$1 \cdot 10^4$	200/3	$5 \cdot 10^{10}$
SLC (e^+e^-)	50x50	2	120	100/100	$4 \cdot 10^{10}$
PEP (e^+e^-)	9x3	3000	NA	150/5	$2/6 \cdot 10^{10}$
KEKB (e^+e^-)	8x3.5	10000	NA	77/2	$1.3/1.6 \cdot 10^{10}$

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{A} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$



Accélérateur à champ électrique statique

ACCELERATEUR électrostatique

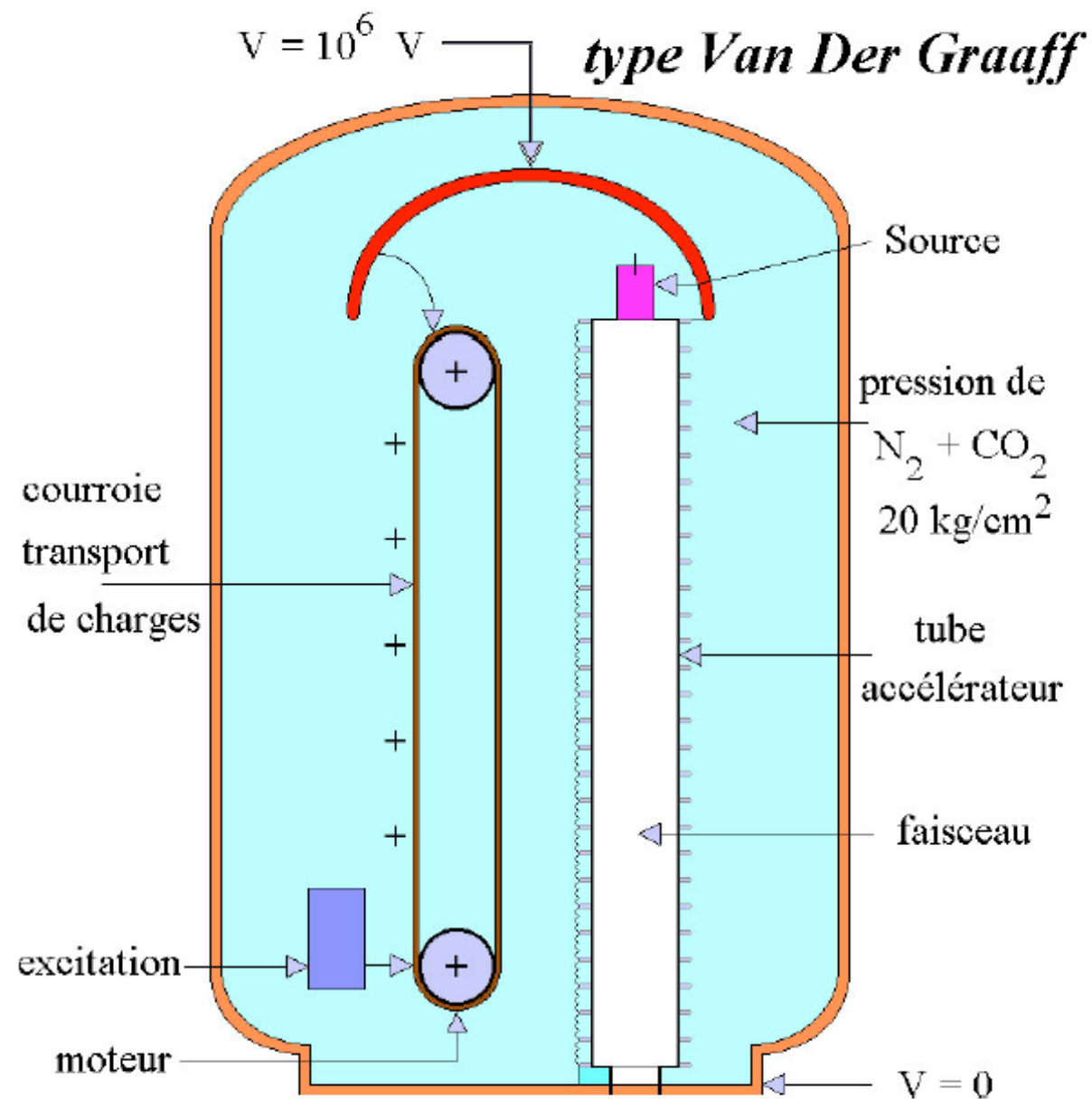


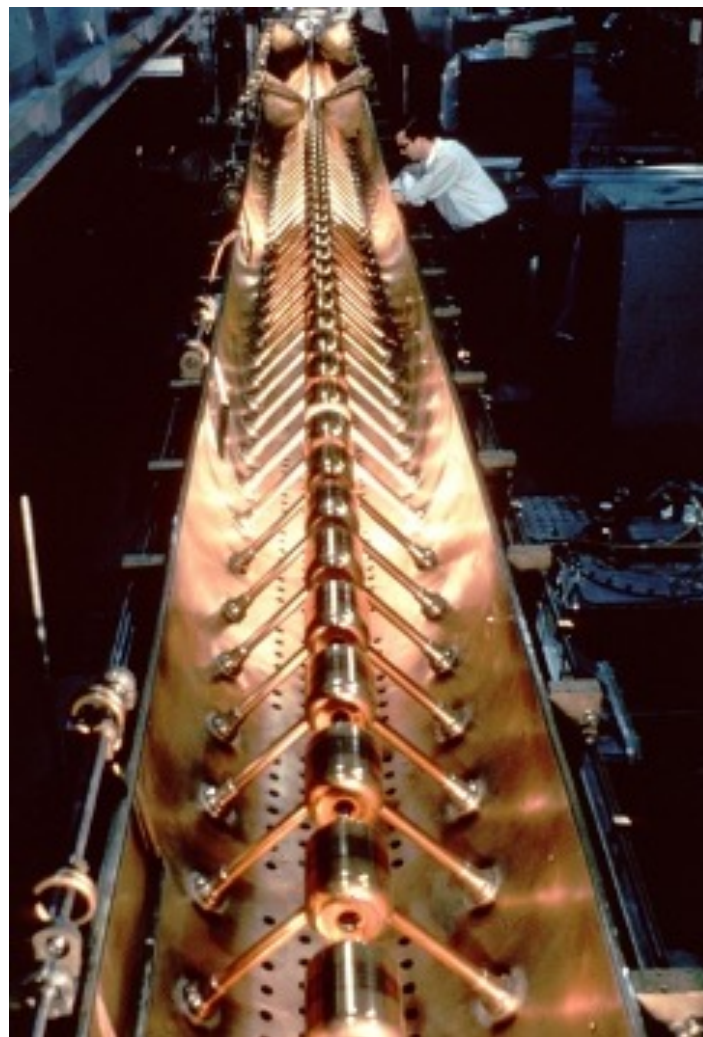
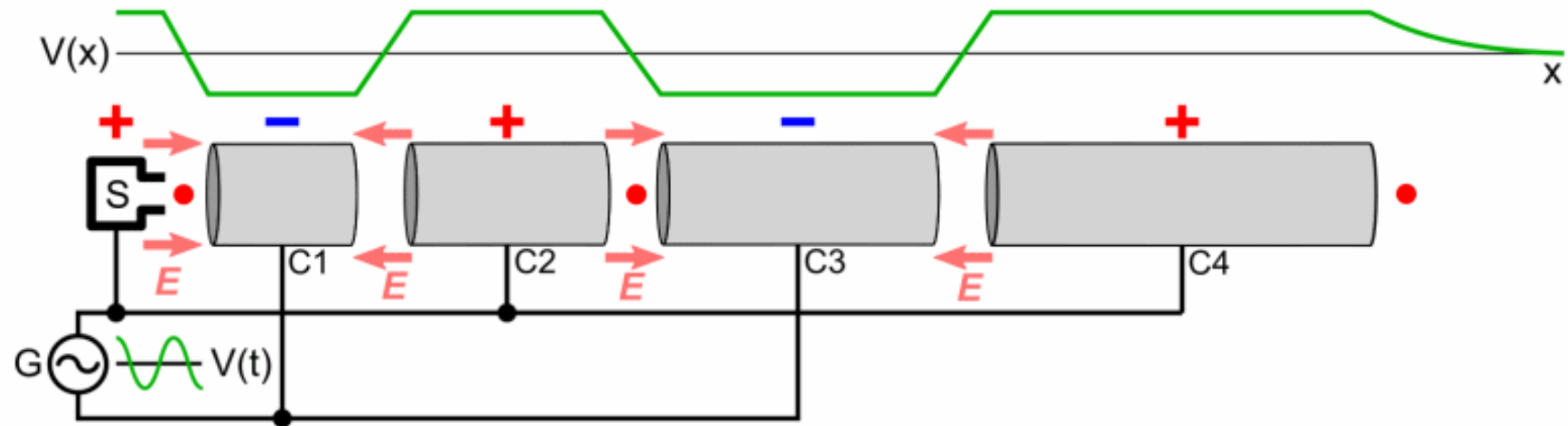
Figure 1 Schéma d'un accélérateur Van De Graaf.

Van der Graaff -1930

→1.2 MeV

Encore utilisé près des sources d'ions

Accélérateurs linéaires radio fréquence



LINAC de R. Wideröe-1928

$$V(t) = V_0(\sin \omega t + \phi) \quad V_0 \sim \text{quelques kV}$$

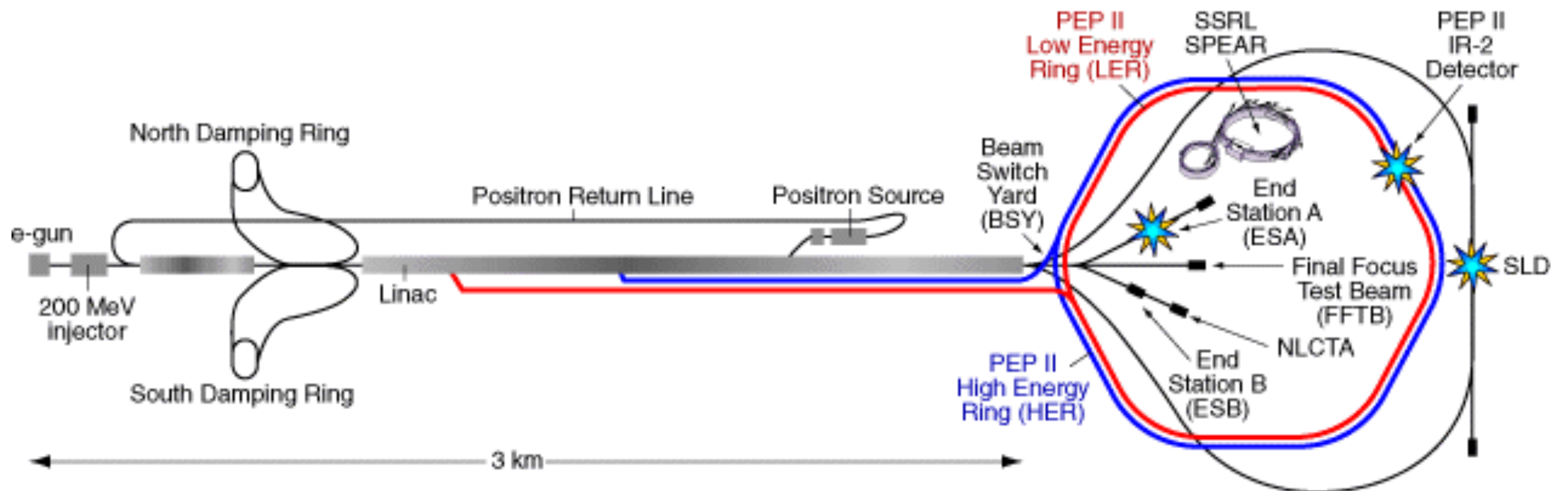
$$\Delta E_{cin} = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{l} = q \Delta V$$

ΔV est la différence de potentiel moyen entre deux éléments

Linac d'Alvarez

Voir animation sur site [web](#)

Accélérateurs linéaires d'électrons

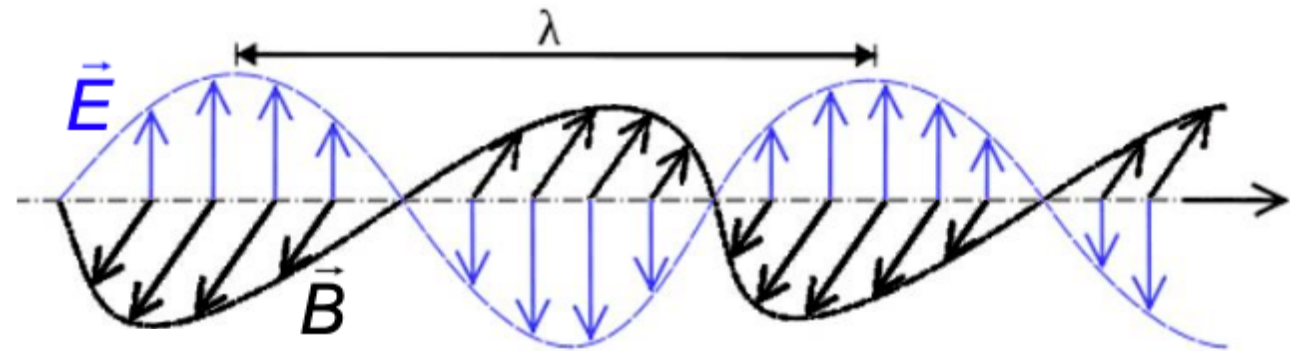


SLC: Stanford Linear Accelerator (SLAC) - 1966-2000

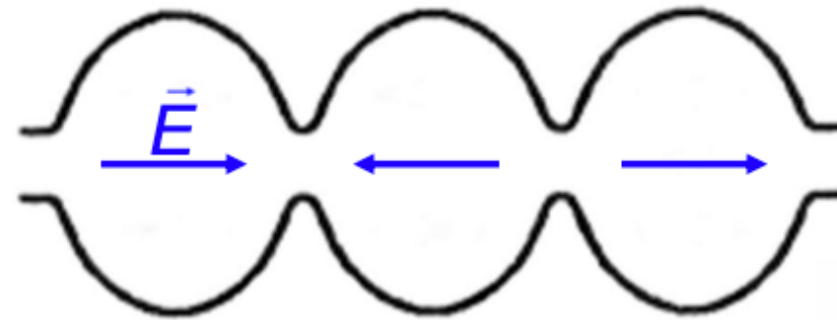
3 km - 80 000 cavités accélératrices - $E_e = 50 \text{ GeV}$

Cavités accélératrices radio fréquences (RF)

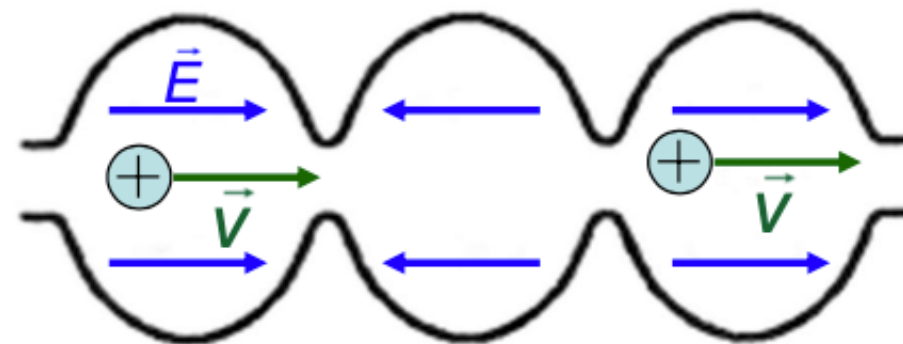
1) on crée un champ E variable
en appliquant une ΔV variable
 $\Rightarrow$ champ B variable



2) on la piège dans une cavité
conductrice résonnante



3) par réflexions multiples sur les
parois, on crée une onde EM
stationnaire

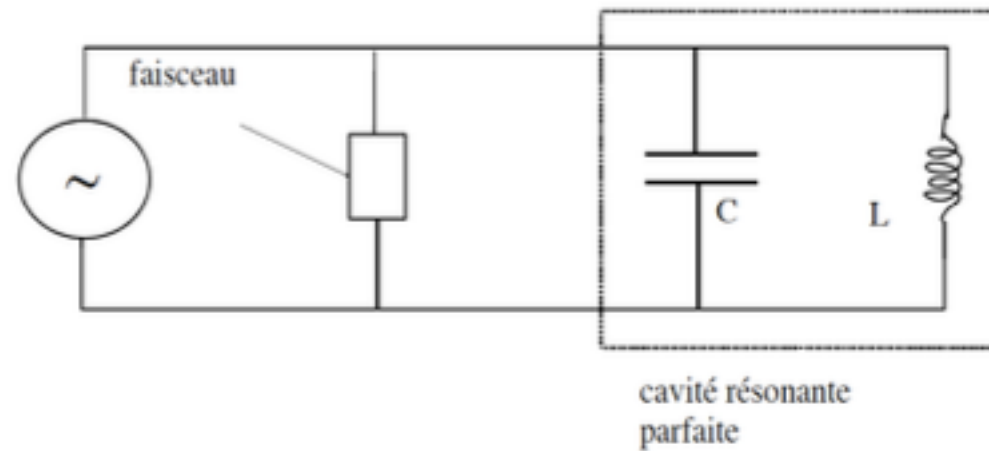
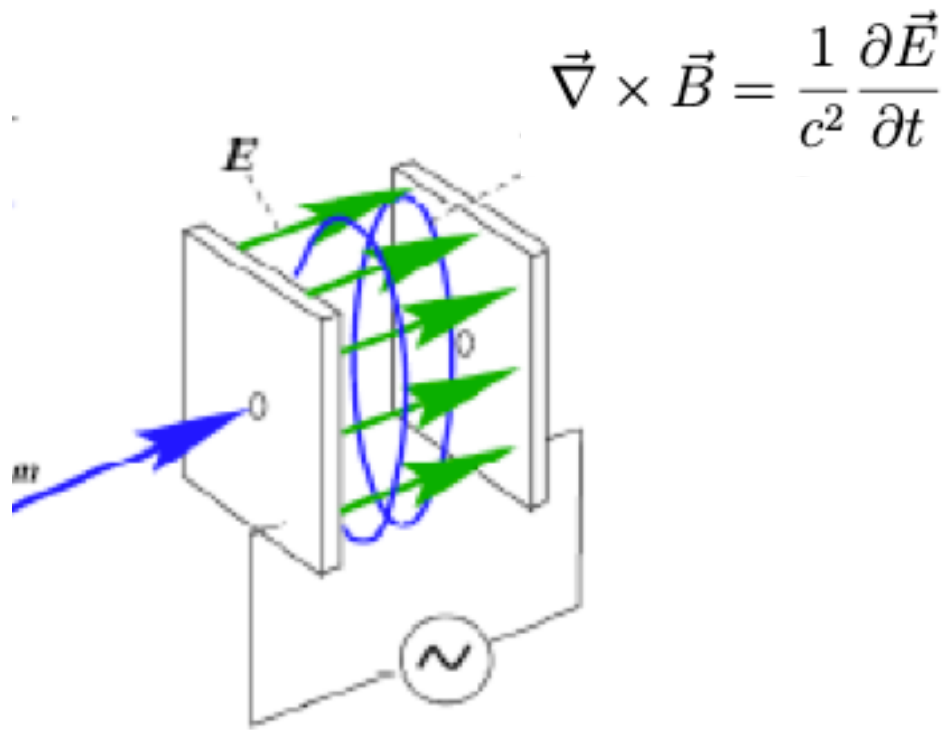


4) on y injecte des particules

$\Rightarrow$ accélération et mise en paquets

plusieurs cavités mises bout à bout = guide d'ondes

Cavités accélératrices RF résonnante



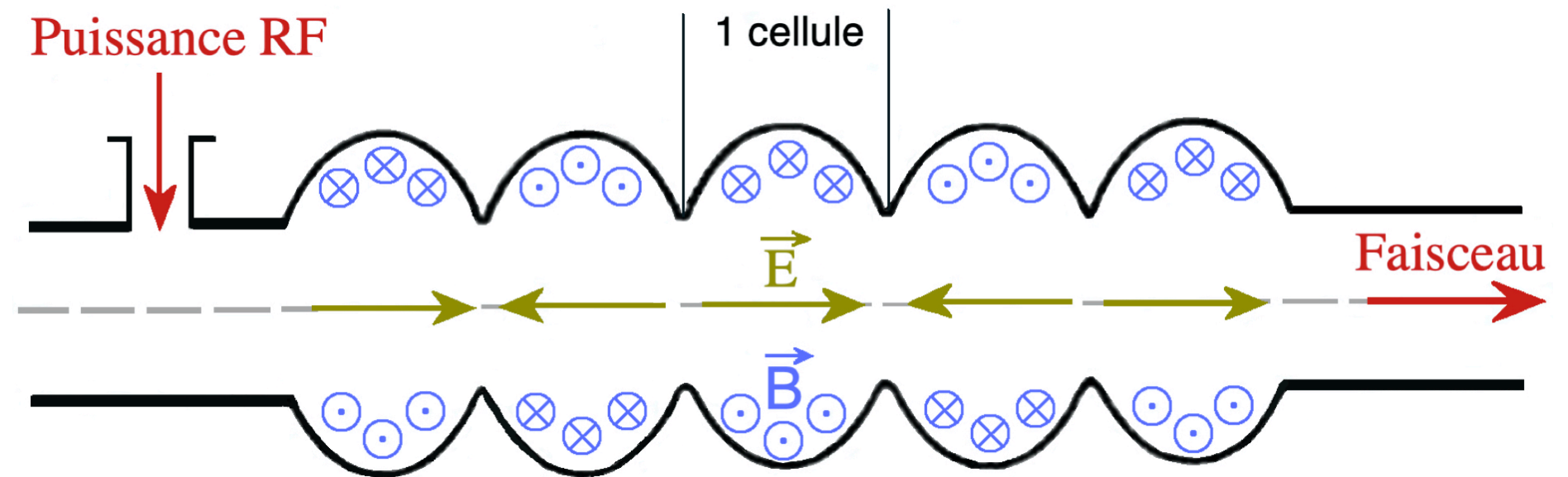
$$Z(\omega) = (i\omega C + \frac{1}{i\omega L})^{-1}$$

fréquence de résonance : $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

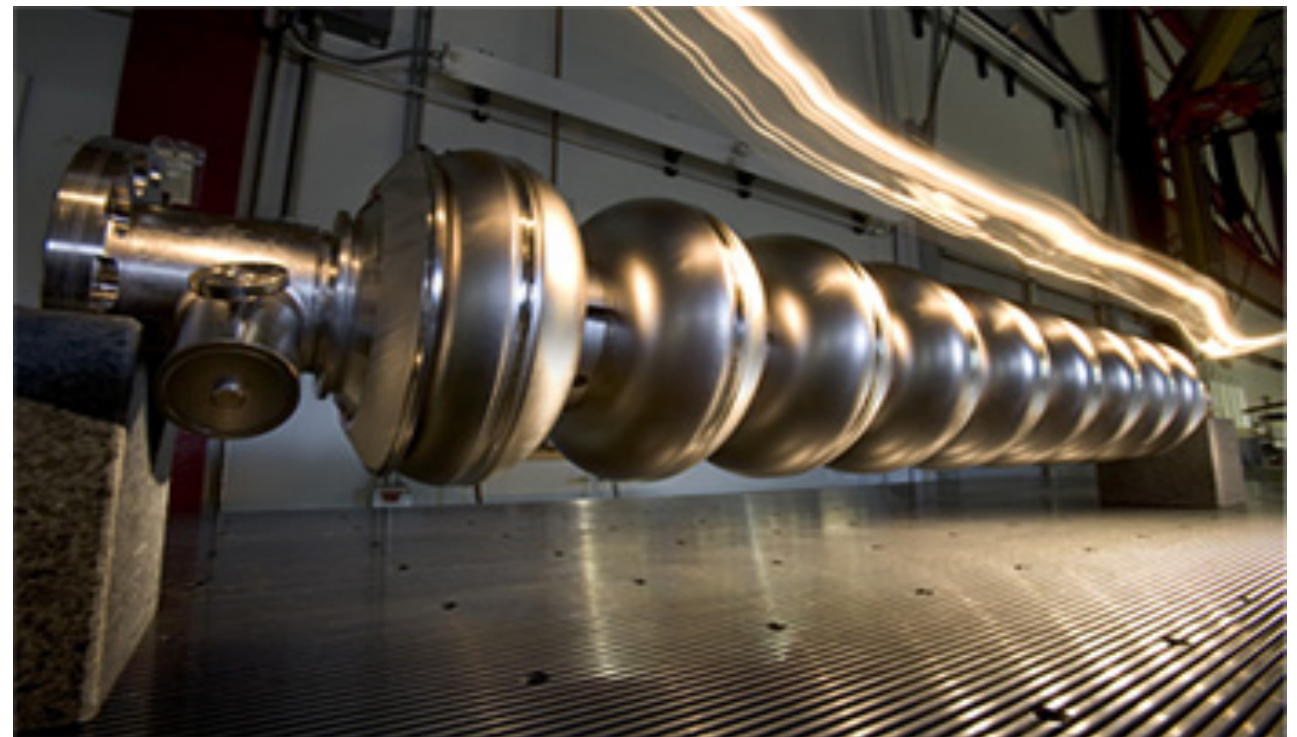
on adapte la structure de façon à minimiser l'impédance et donc à maximiser le transfert d'énergie vers le faisceau (équivalent de la résistance)

Cavité accélératrices radio fréquences

Guide d'onde:



Cavité résonnante du LEP

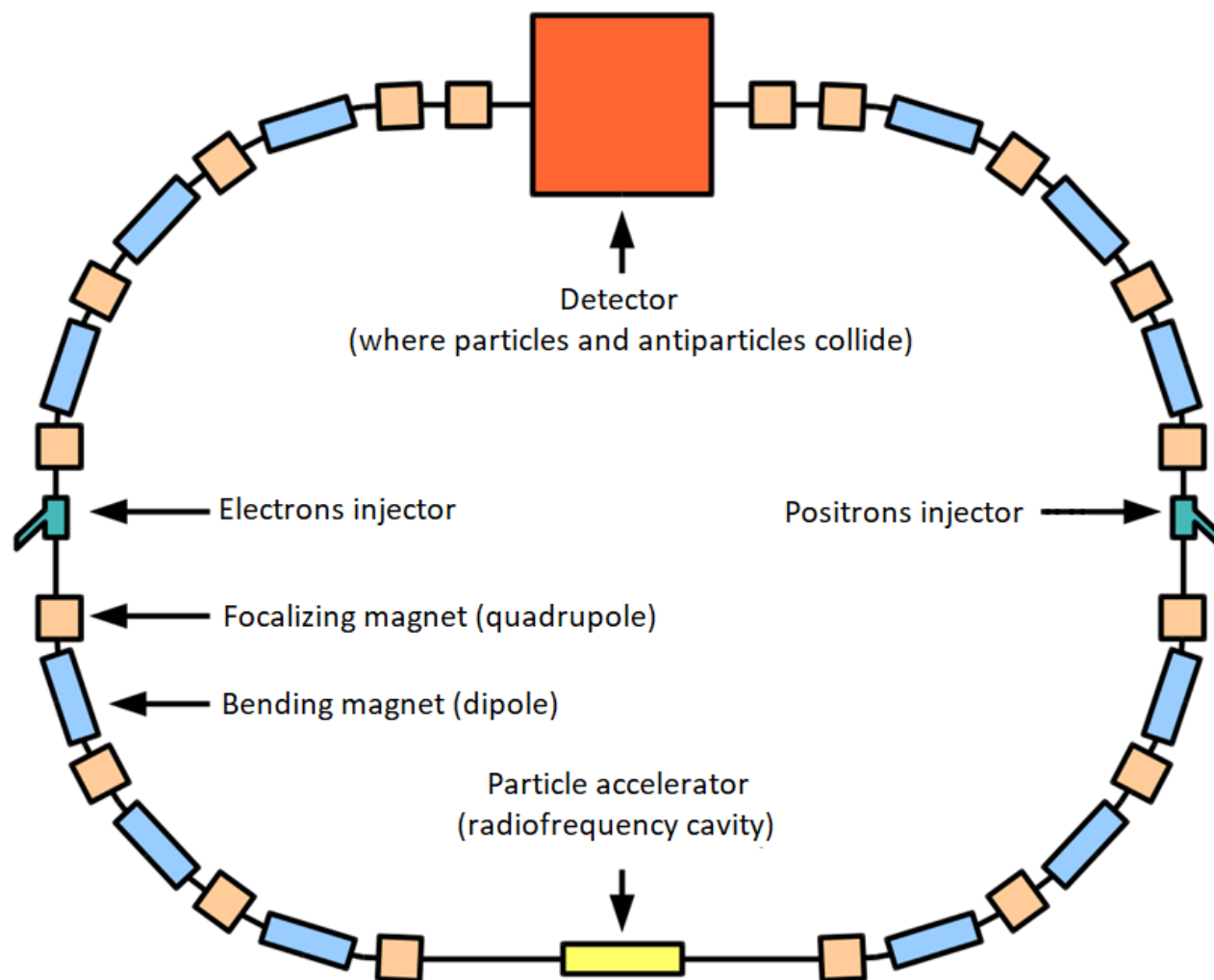
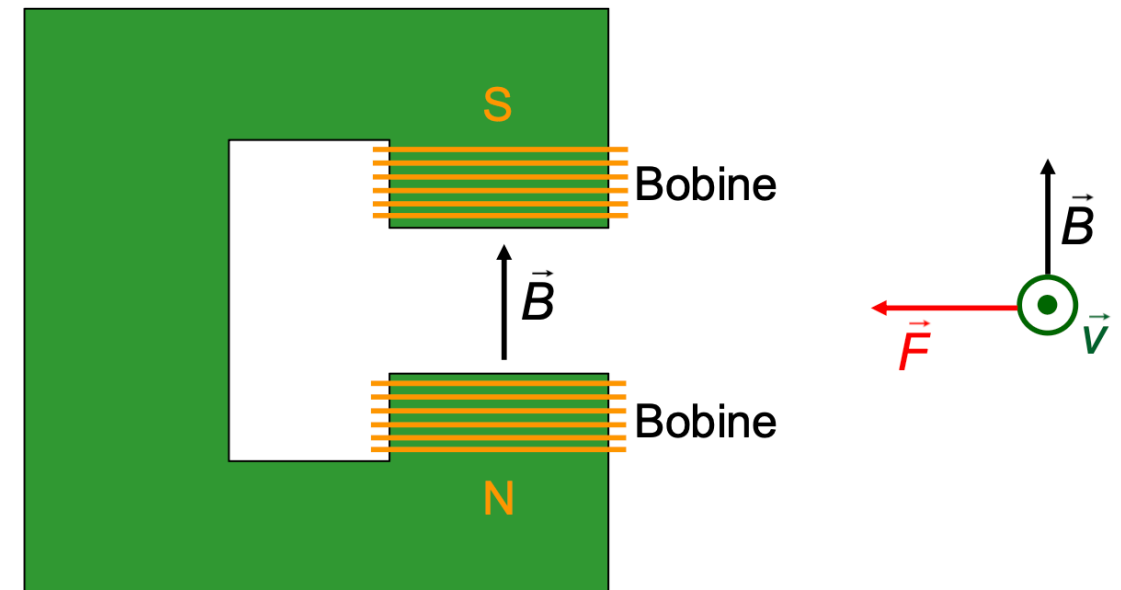


Cavités supraconductrices
(en niobium) du LHC

Guidage : aimants dipolaires

dipole magnétique, courbure circulaire

Rayon de courbure : $\frac{1}{R} = \frac{q B}{p}$

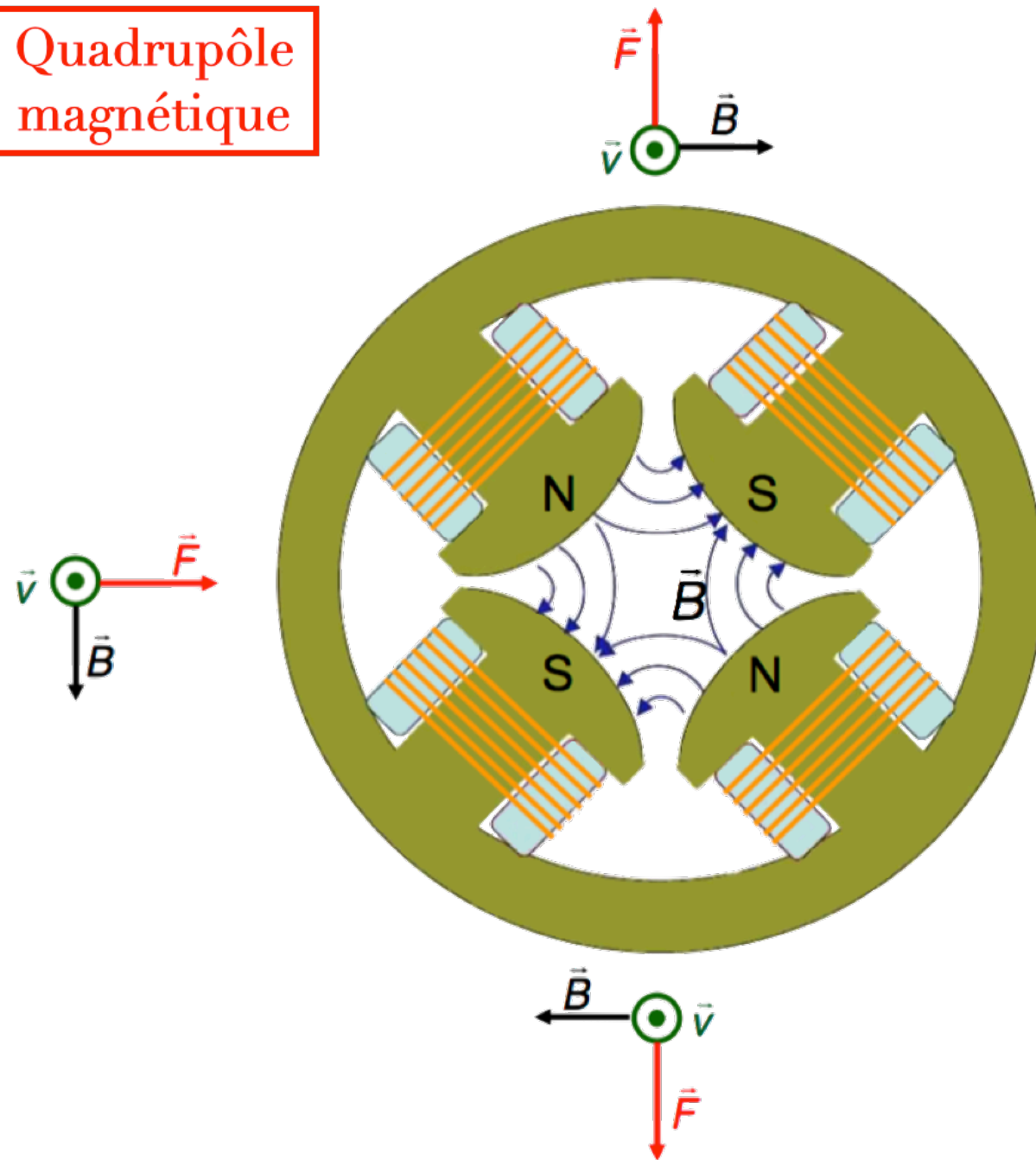


La focalisation : aimants quadrupolaires

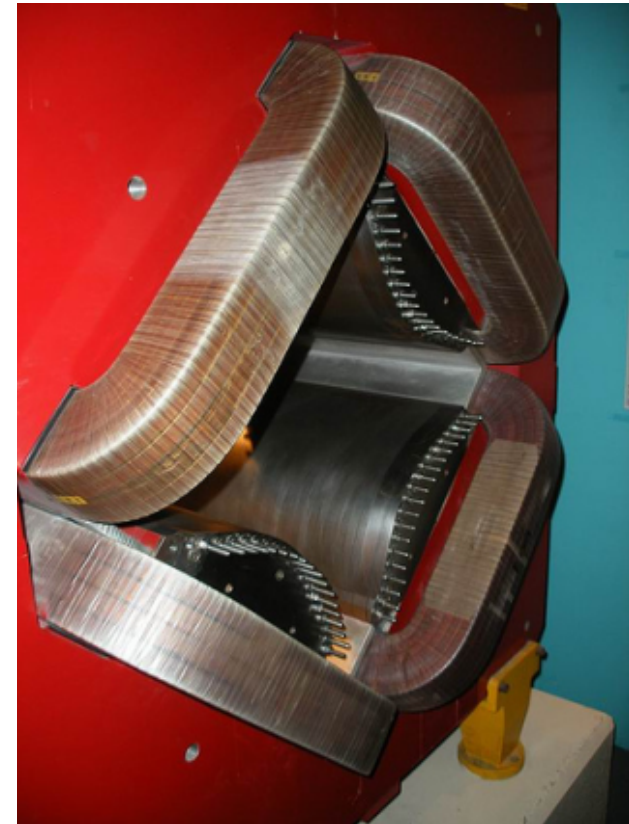
quadrupôle électrique ou magnétique ?

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B}$$

Quadrupôle
magnétique

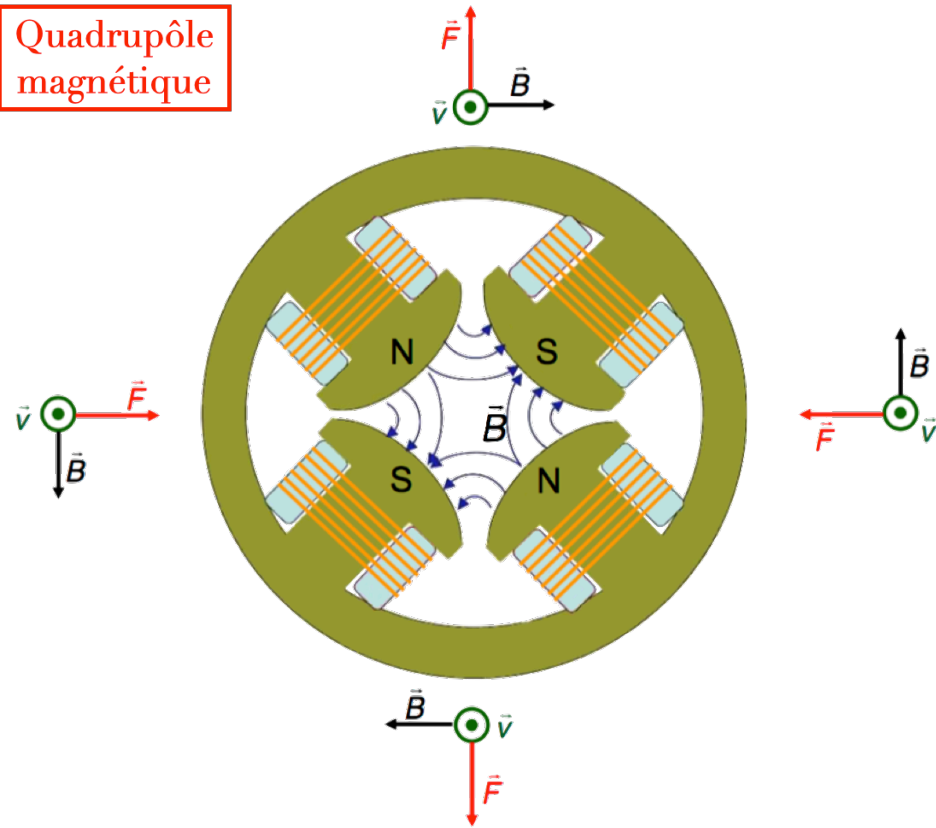


Exemple de quadrupôle
Focalisant en horizontal
Défocalisation en vertical



La focalisation : aimants quadrupolaires

Quadrupôle
magnétique



champ linéaire en la distance

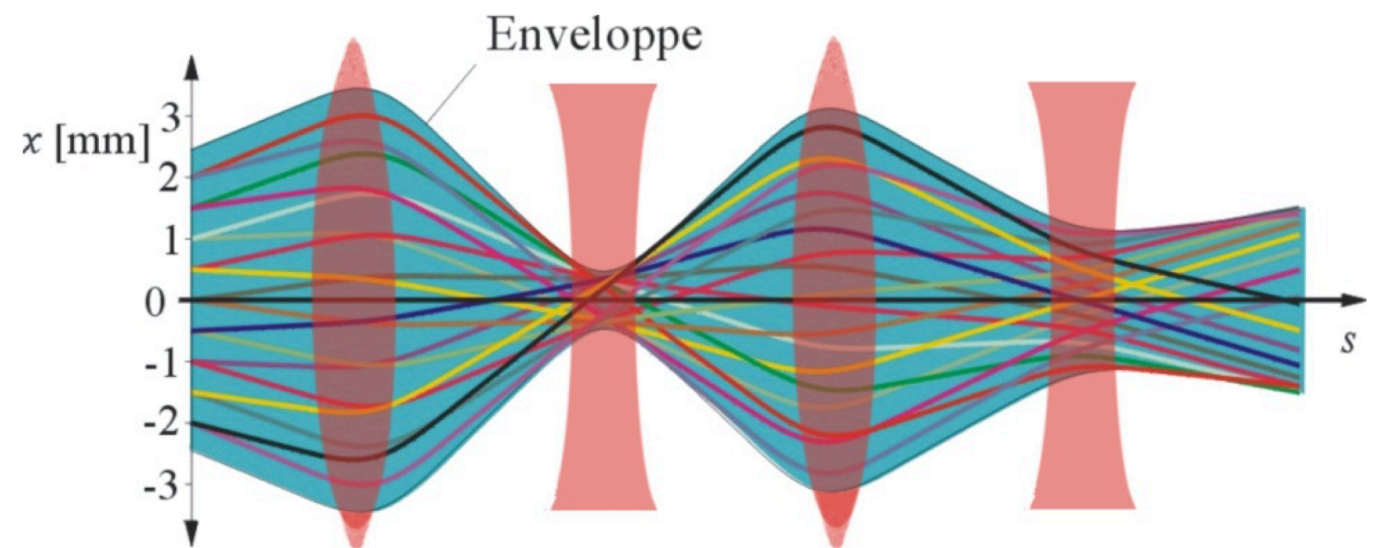
$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{B} &= 0 &\Rightarrow \frac{\partial B_y}{\partial x} &= \frac{\partial B_x}{\partial y} = cte = K \\ &&\Rightarrow B_x &= K y, \quad B_y = K x, \\ &&\Rightarrow F_x &= -qvB_y, \quad F_y = qvB_x.\end{aligned}$$

effet globalement focalisant : succession de quadrupôles

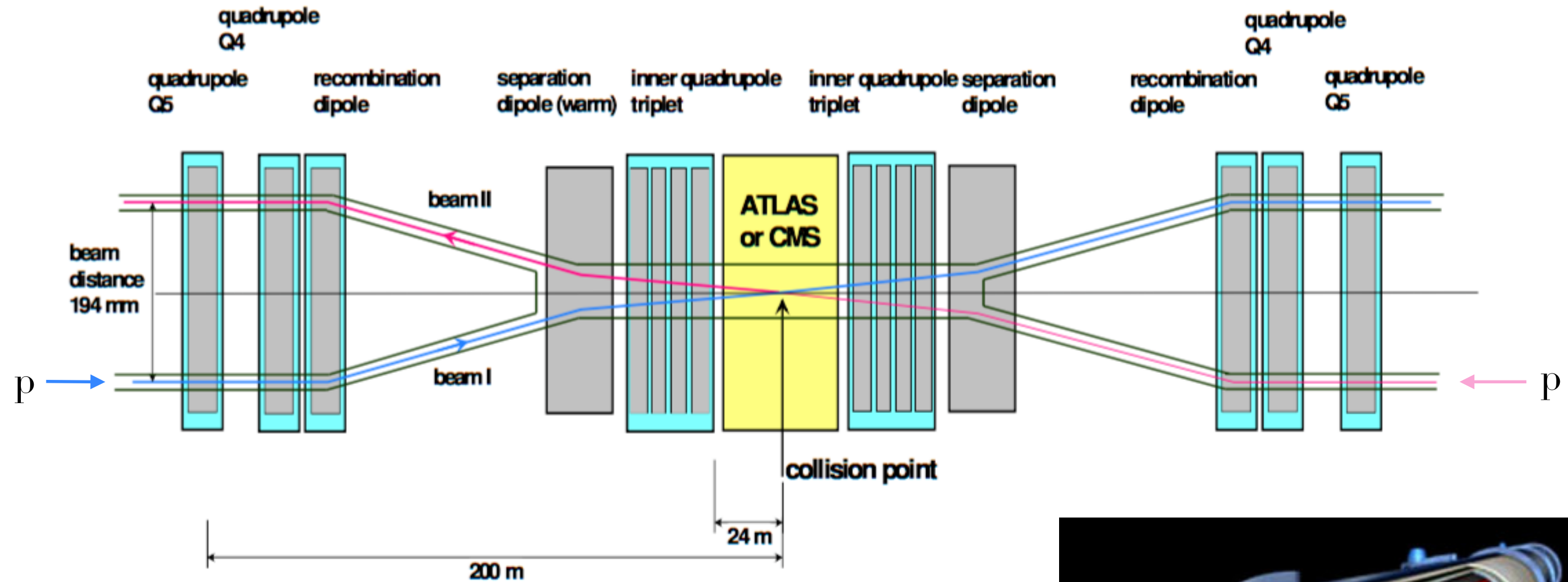
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

si on choisit les distances focales :

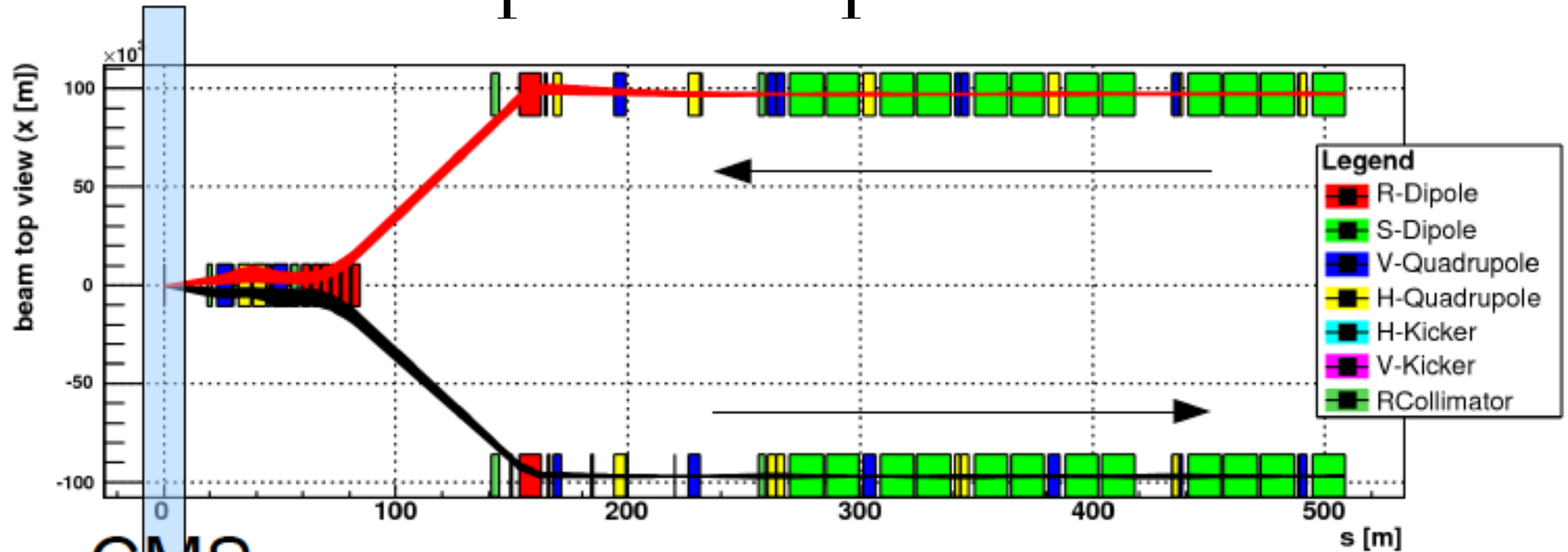
$$f_1 = -f_2 \quad \Rightarrow \quad f > 0$$



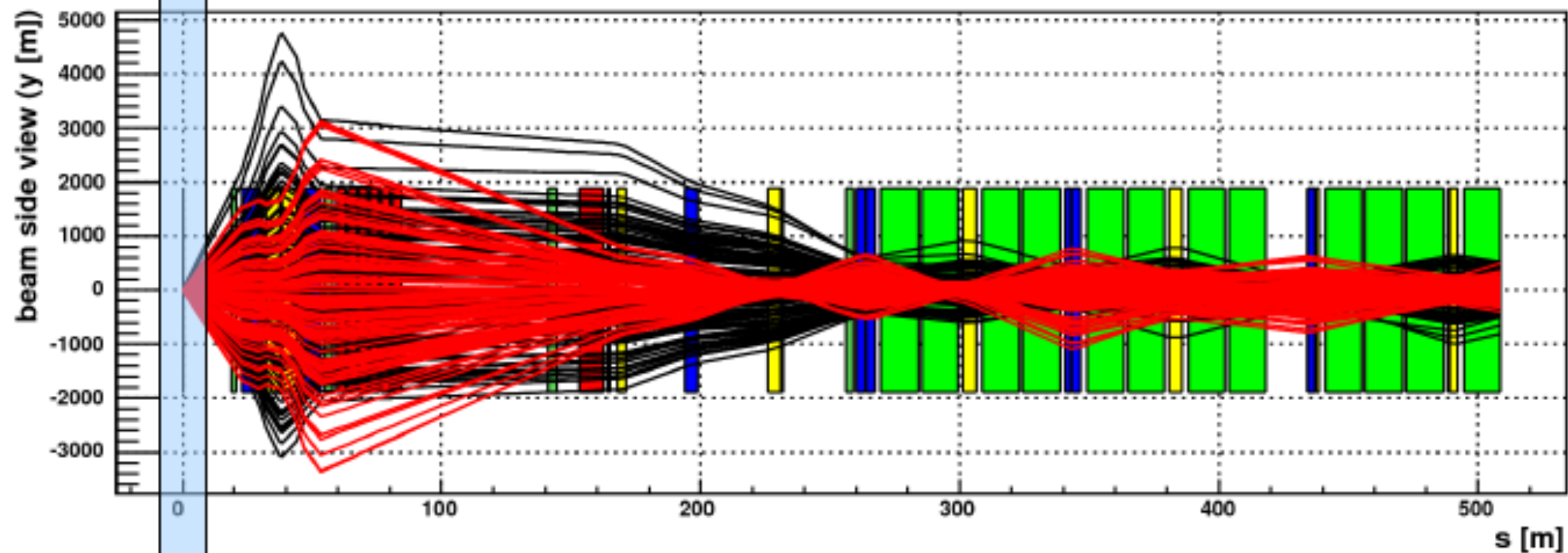
Exemple: LHC près de CMS



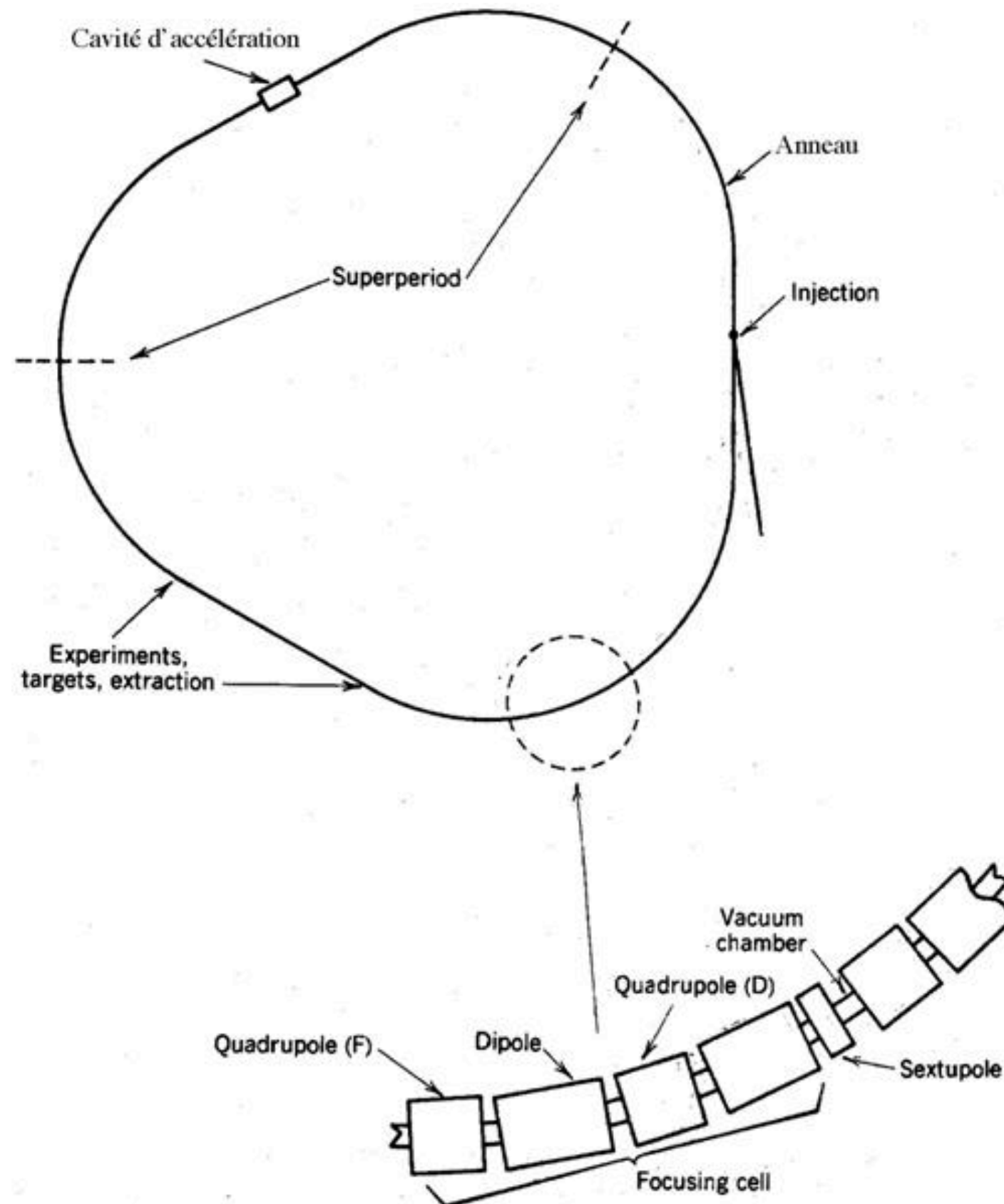
Exemple: LHC près de CMS



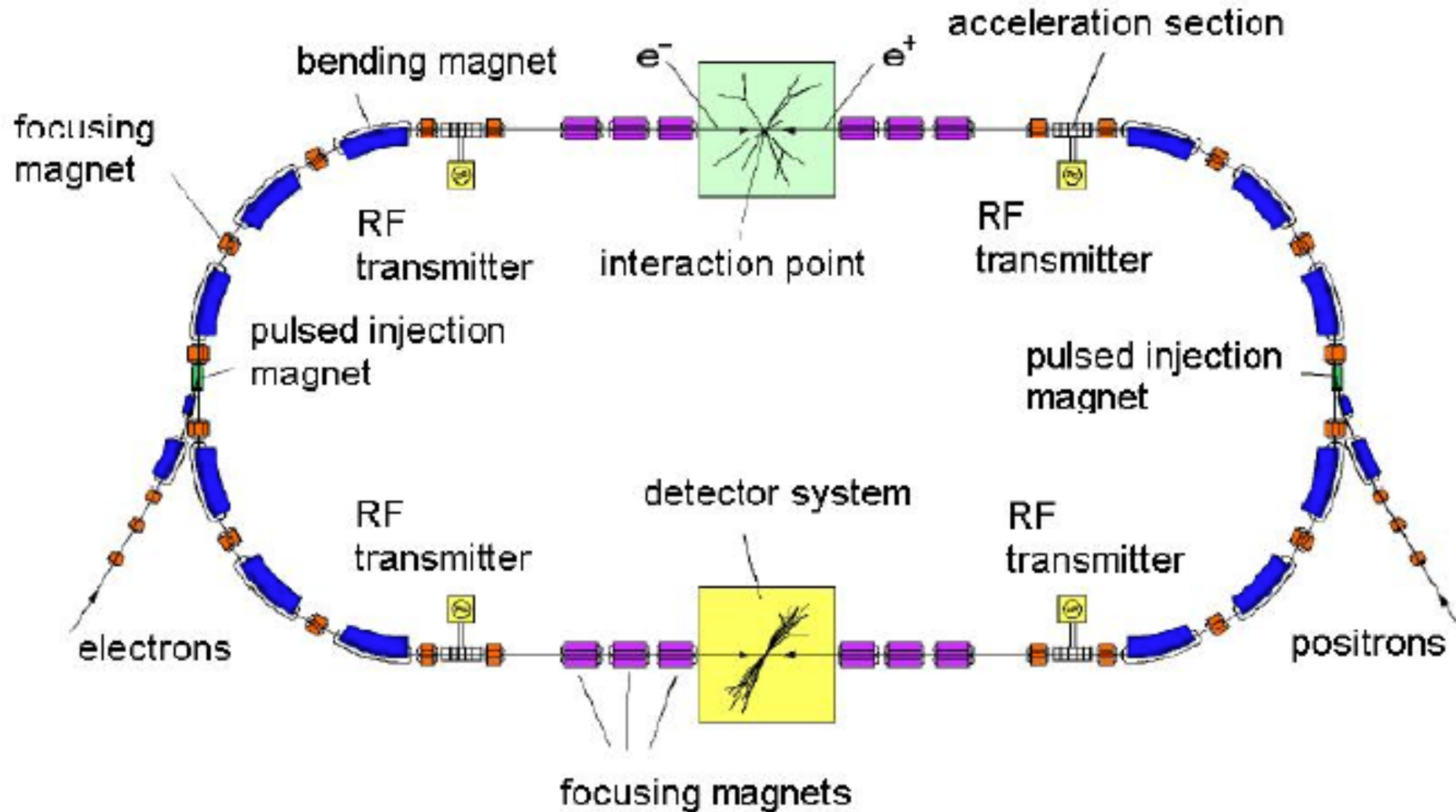
CMS



Les accélérateurs circulaires



Accélérateurs circulaires: synchrotron



Synchrotron :

- une injection de particules à une certaine énergie.

⇒ **B (dipole) et ω doivent être synchronisés au fur et à mesure que p augmente**

Synchronisation des paquets de particules

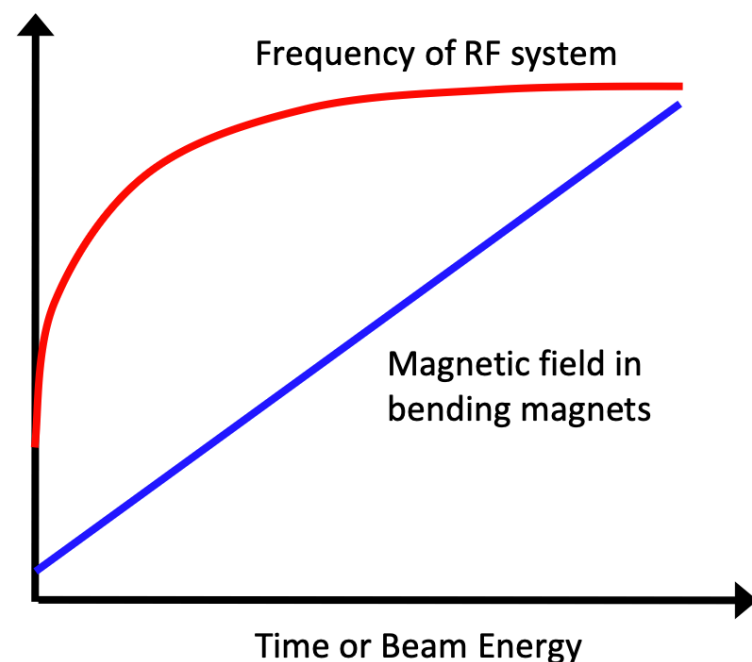
- pour que les paquets de particules du faisceau arrive en phase avec le champ E au sein des cavités RF, il faut que :

$$\omega_{RF} = N_b \omega_{revol} \quad N_b = \text{le nombre de paquets max ou d'harmoniques}$$

- au LHC cavités à du 400 MHz

$$\omega_0 = h f_{rev} \quad f_{rev} = \frac{\beta c}{2\pi R} = \frac{c}{26659[m]} = 1.1246 \cdot 10^4 \text{ Hz} \Rightarrow h = 35640$$

- B doit augmenter avec l'énergie du faisceau pour garder les particules dans le tube à vide (R=constant)
- ω_{RF} doit aussi augmenter avec l'énergie, mais de façon différente

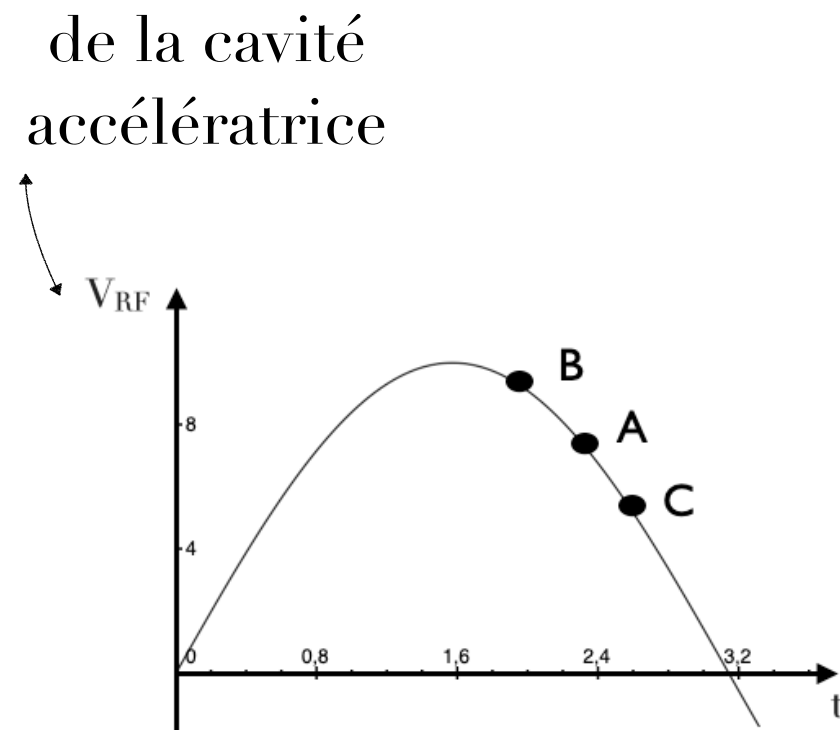


$$B(t) = \frac{\gamma m v}{q R} \sim \gamma v \quad \omega(t) = \frac{q B(t)}{\gamma m} \sim v$$

$\Rightarrow$ B et ω_{RF} doivent être synchronisés
au fur et à mesure que p augmente

$\Rightarrow$ Synchrotron

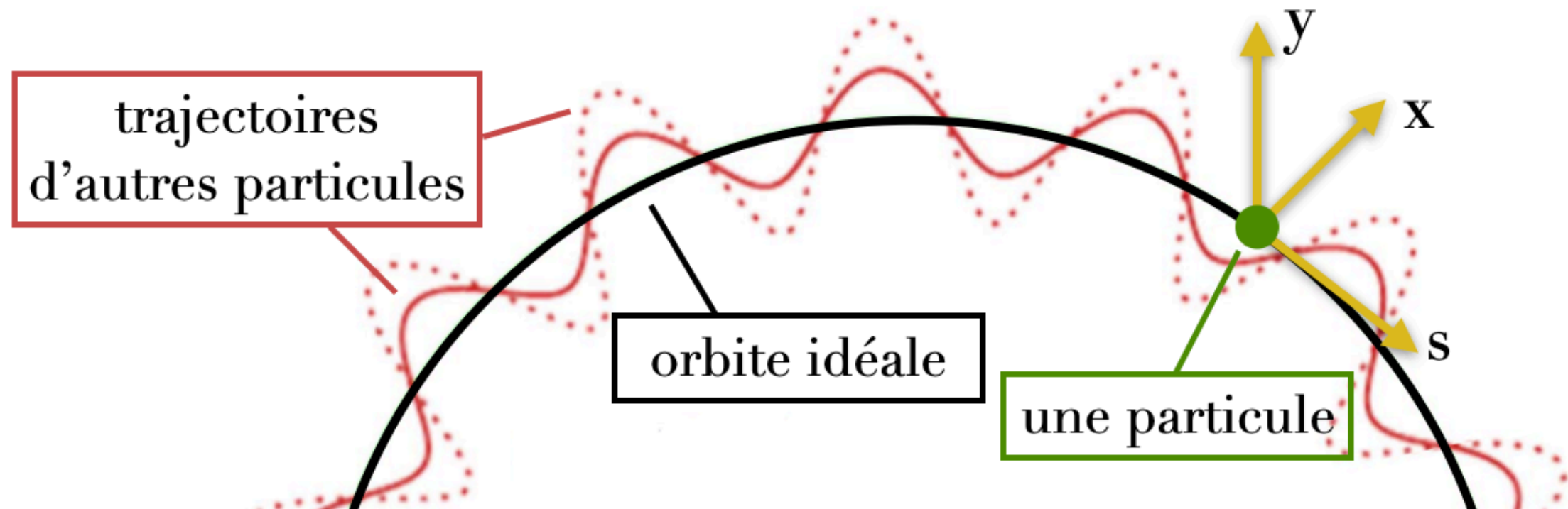
Synchronisation des particules au sein d'un paquets



- A = particule synchrone (= "idéale")
- B en retard, reçoit moins d'énergie
→ $R \downarrow$ et $f \uparrow$ → en avance
- C en avance, reçoit plus d'énergie
→ $R \uparrow$ et $f \downarrow$ → en retard

⇒ phasage induit, mais oscillations autour de l'orbite nominale

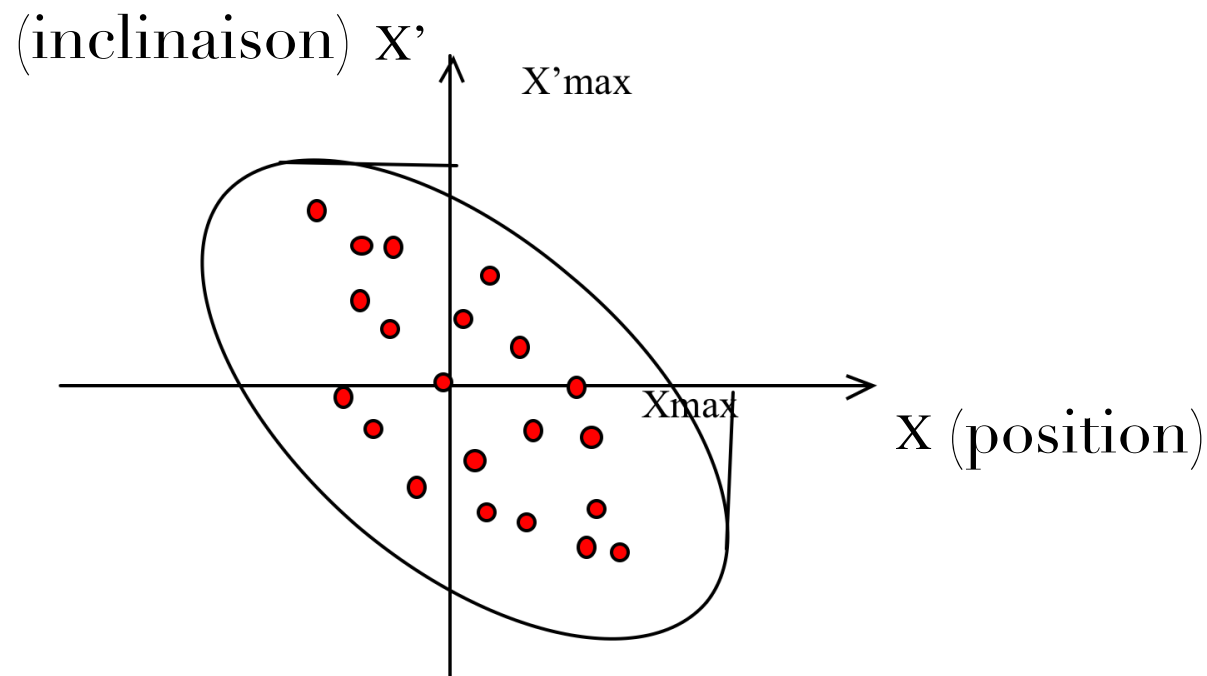
Trajectoires des particules



ensemble des variables nécessaires pour d'écrire l'orbite d'une particule :

$$(x, x', y, y', \Delta L, \Delta p/p) \quad \text{où} \quad x' = \frac{dx}{ds} \simeq \theta_x \quad y' = \frac{dy}{ds} \simeq \theta_y \quad \Delta L = s - s_0$$

Emittance d'un faisceau



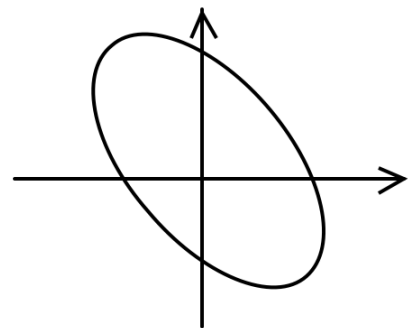
$\epsilon = A/\pi$, où A est l'aire de l'ellipse.

α, β, γ et ϵ telles que :

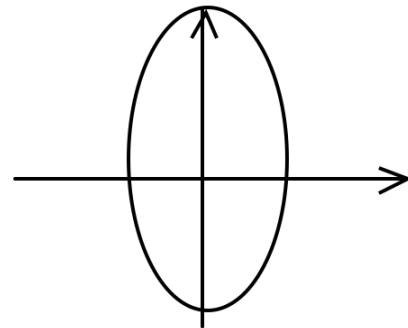
$$x_{max} = \sqrt{\beta \epsilon}$$

$$x'_{max} = \sqrt{\gamma \epsilon}$$

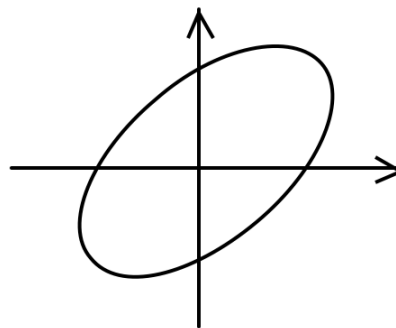
$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$$



$\alpha > 0$ (convergent)



$\alpha = 0$ (waist ou col)



$\alpha < 0$ (divergent)

Théorème de Liouville : A est conservé (pour un système conservatif - à p fixe)

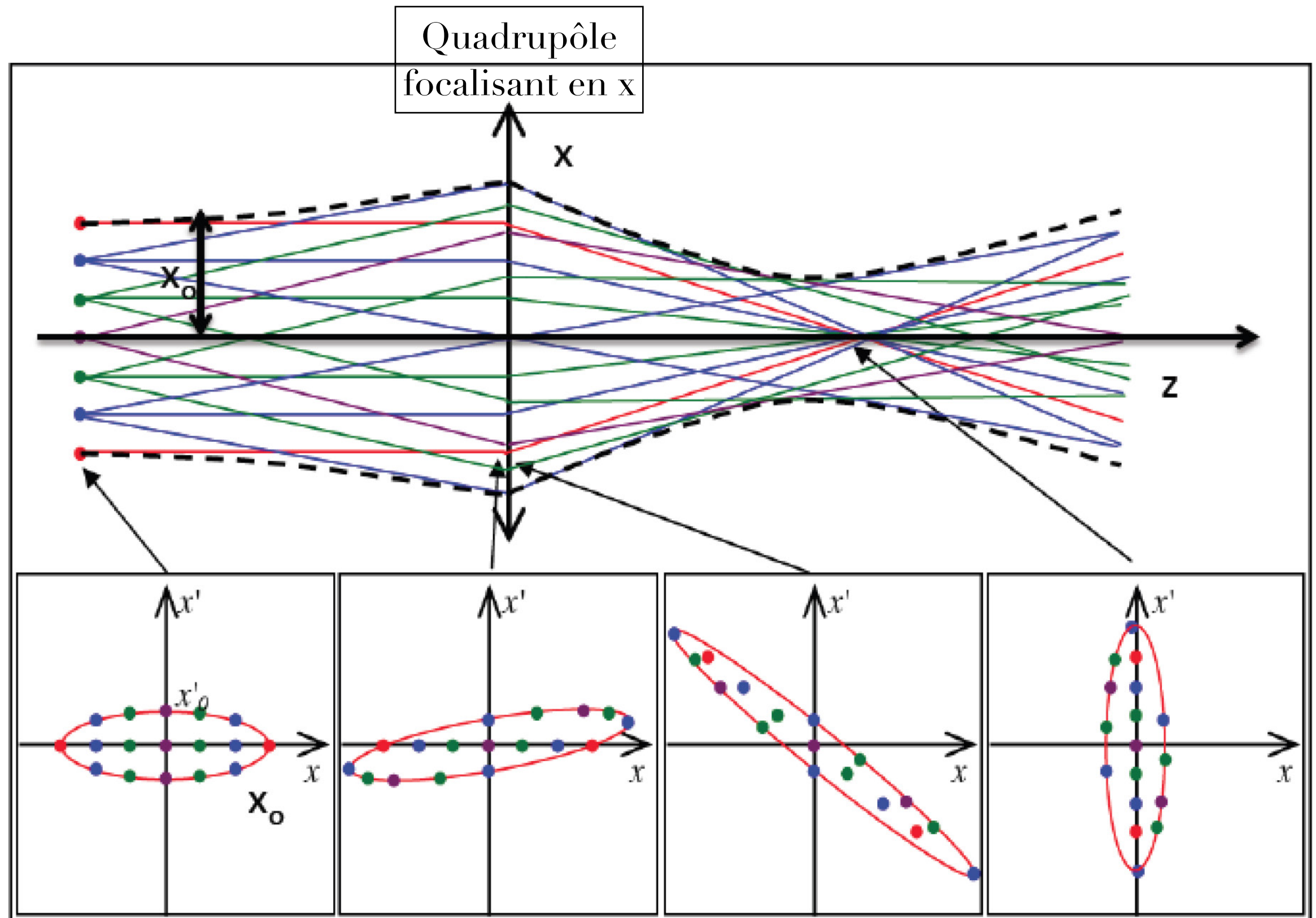
taille du faisceau

$$\sigma_x(s) = \sqrt{(\beta_x^* + \frac{s^2}{\beta_x^*})\epsilon_x}$$

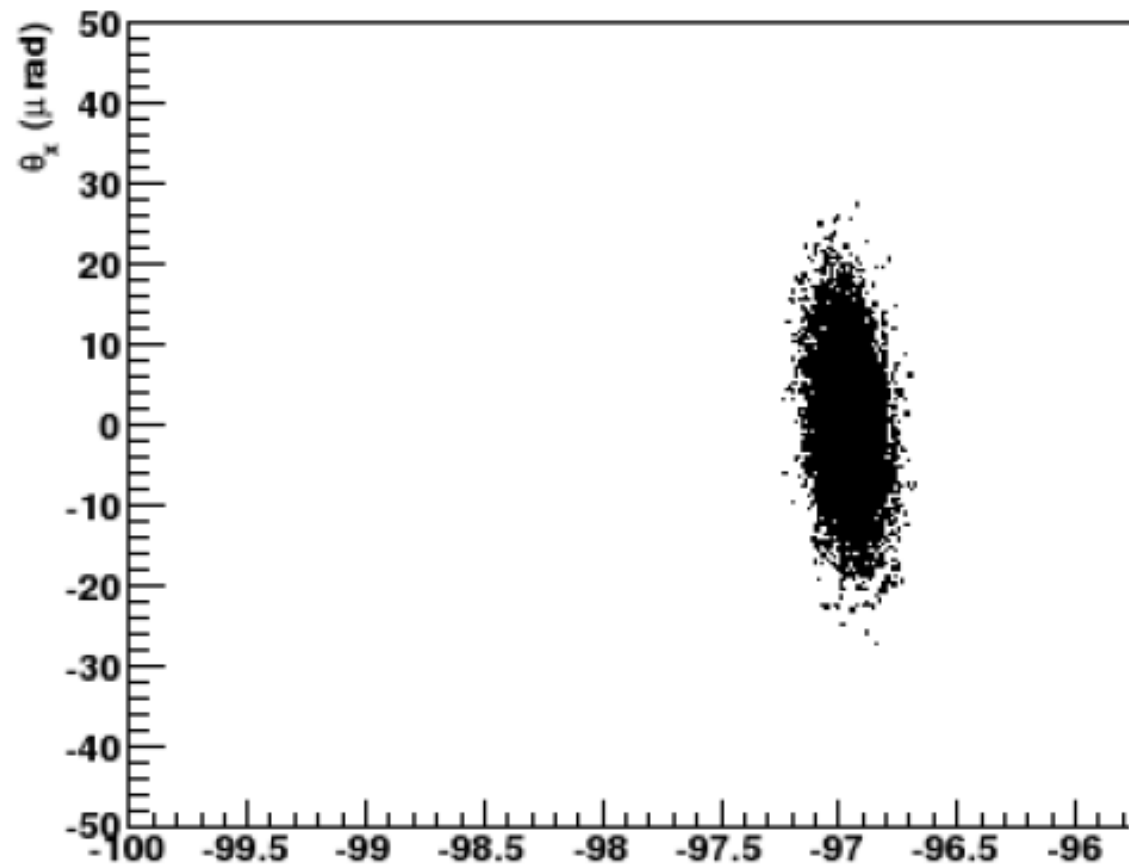
$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 N_b f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \simeq \frac{N_1 N_2 N_b f}{4\pi \sqrt{\beta_x^* \epsilon_x} \sqrt{\beta_y^* \epsilon_y}}$$

si $\beta_x^* \gg \sigma_x$ et $\beta_y^* \gg \sigma_y$:

Évolution du profil d'un paquet

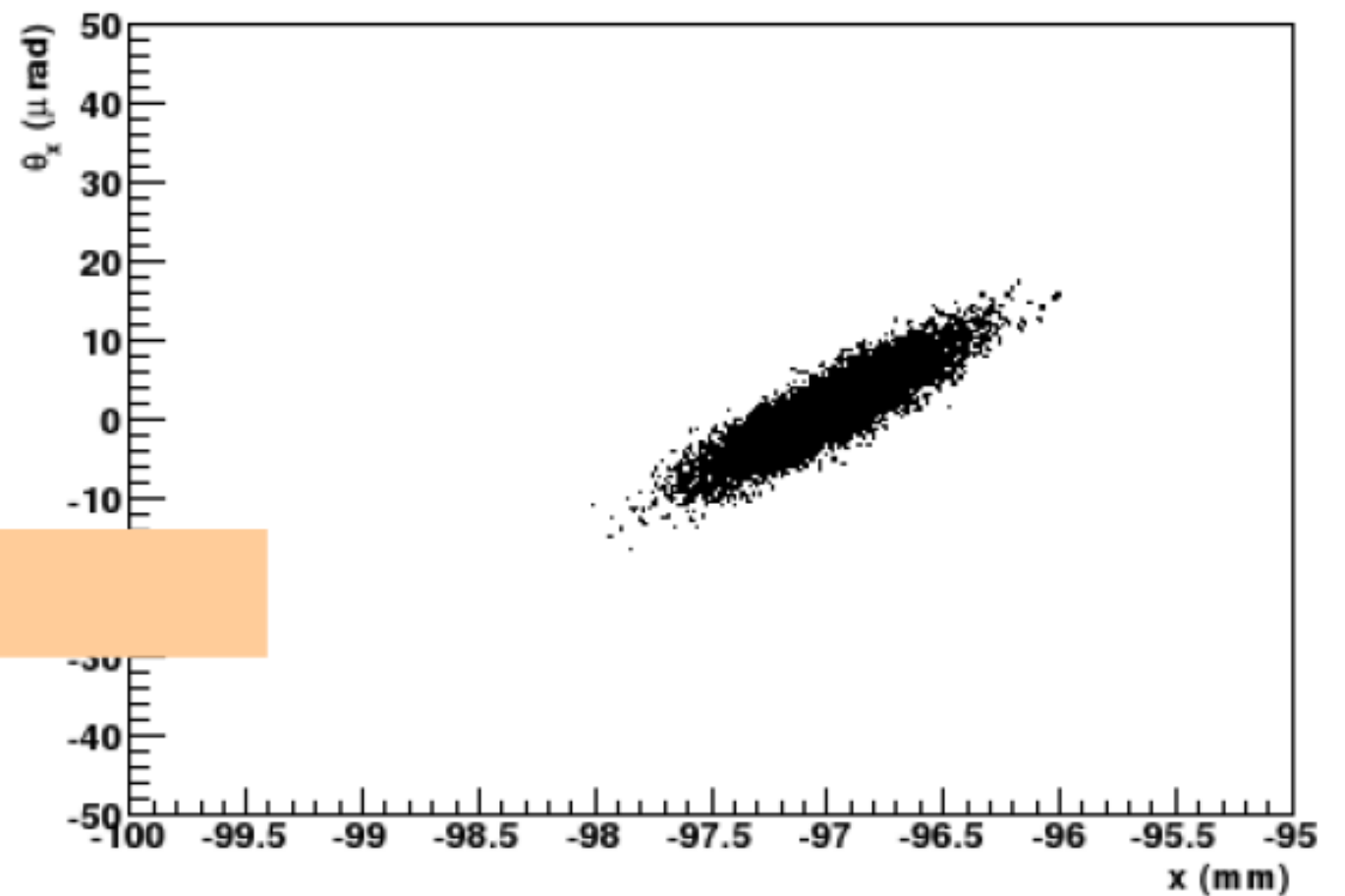


Beam 1 profile at 220m



L'hyper-volume dans l'espace de phase ($\mathbf{r}$, $\mathbf{p}$) est conservé

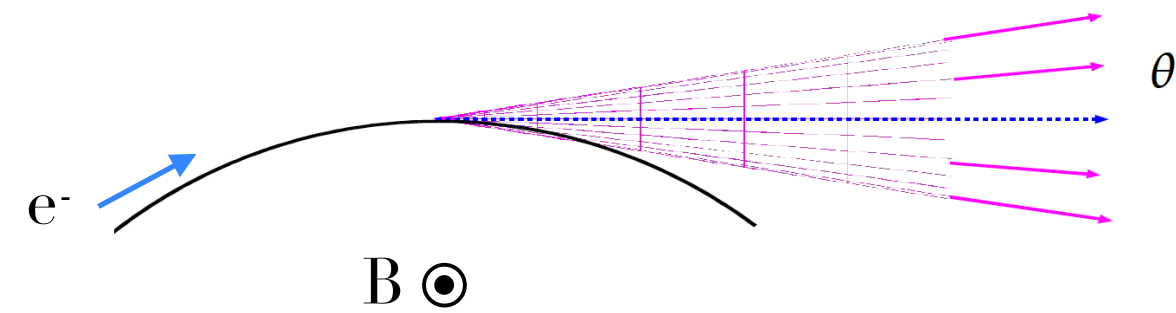
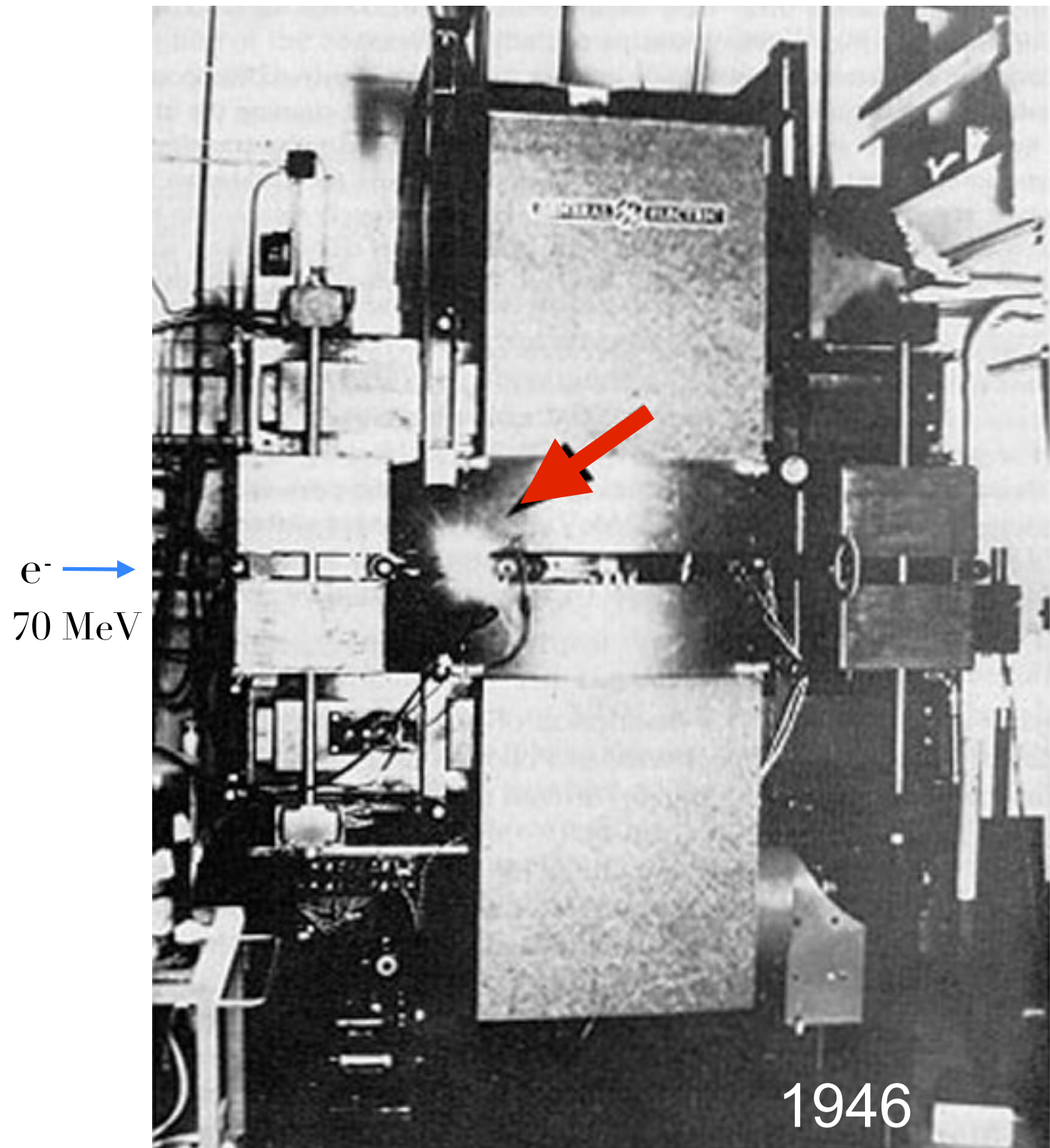
Beam 1 profile at 420m



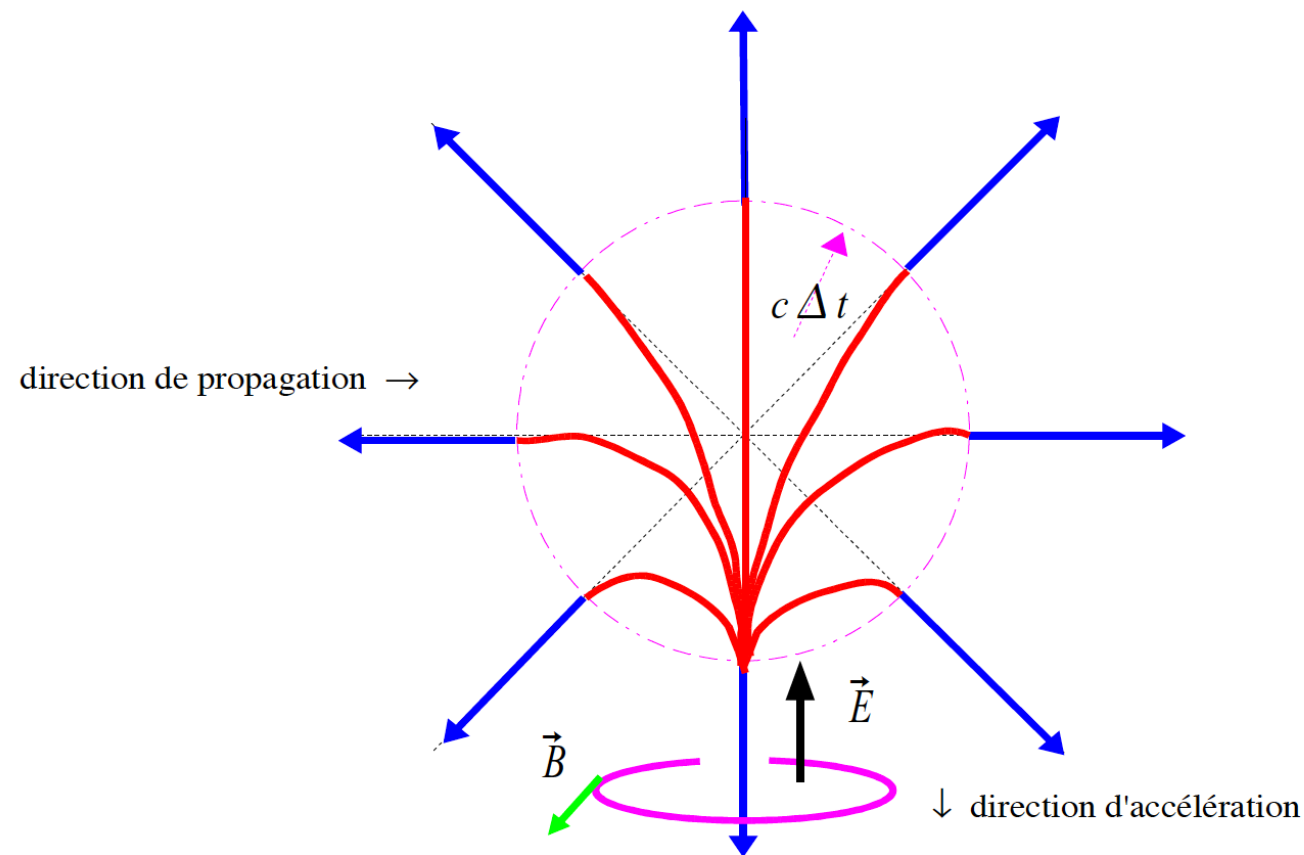
L'émittance du faisceau reste constante

NB l'angle θ_x ici est défini par rapport à l'axe z au point d'interaction et non par rapport à s (local)

Radiation synchrotron/de courbure



Radiation synchrotron/de courbure



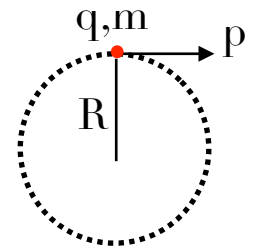
particule chargée accélérée dans une direction perpendiculaire à sa direction

vecteur de Poynting : énergie rayonnée

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{B} > 0$$

puissance rayonnée :

$$\mathcal{P} = \frac{2}{3} \frac{q^2 c}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma^4 \beta^4}{R^2} \xrightarrow{\beta \rightarrow 1} \sim \frac{p^4}{m^4 R^2}$$



$$p/mc = \beta\gamma$$

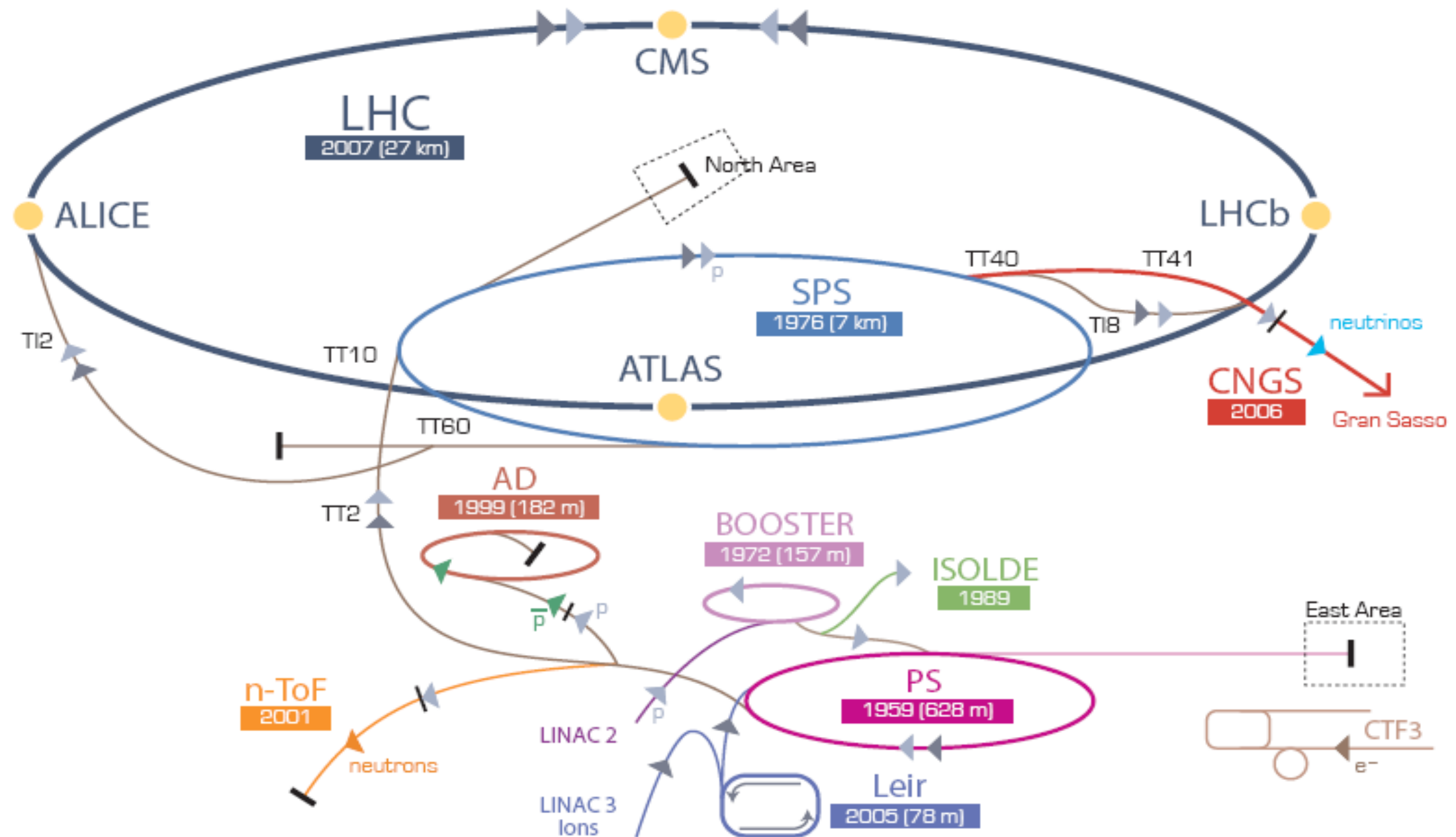
perte d'E par tour :

$$\Delta E = \mathcal{P} \underbrace{\frac{2\pi R}{\beta c}}_{\text{tps de revol}} = \frac{1}{3} \frac{q^2}{\epsilon_0} \frac{\gamma^4 \beta^3}{R}$$

		$E[\text{GeV}]$	$R[\text{m}]$	$I[\text{mA}]$	$B[T]$	$\Delta E[\text{GeV}/\text{tour}]$	$\mathcal{P}[\text{MW}]$
e^-	LEP100	50	3096	6	0.06	0.17	1.1
e^-	LEP200	104.5	3096	6	0.12	3.4	20.5
p	LHC	7000	2778	1060	8.3	$6.9 \cdot 10^{-6}$	$7.3 \cdot 10^{-3}$

$$\frac{\mathcal{P}_p}{\mathcal{P}_e} = \frac{m_e^4}{m_p^4} \simeq 9 \cdot 10^{-14}$$

Complexes d'accélérateurs : CERN



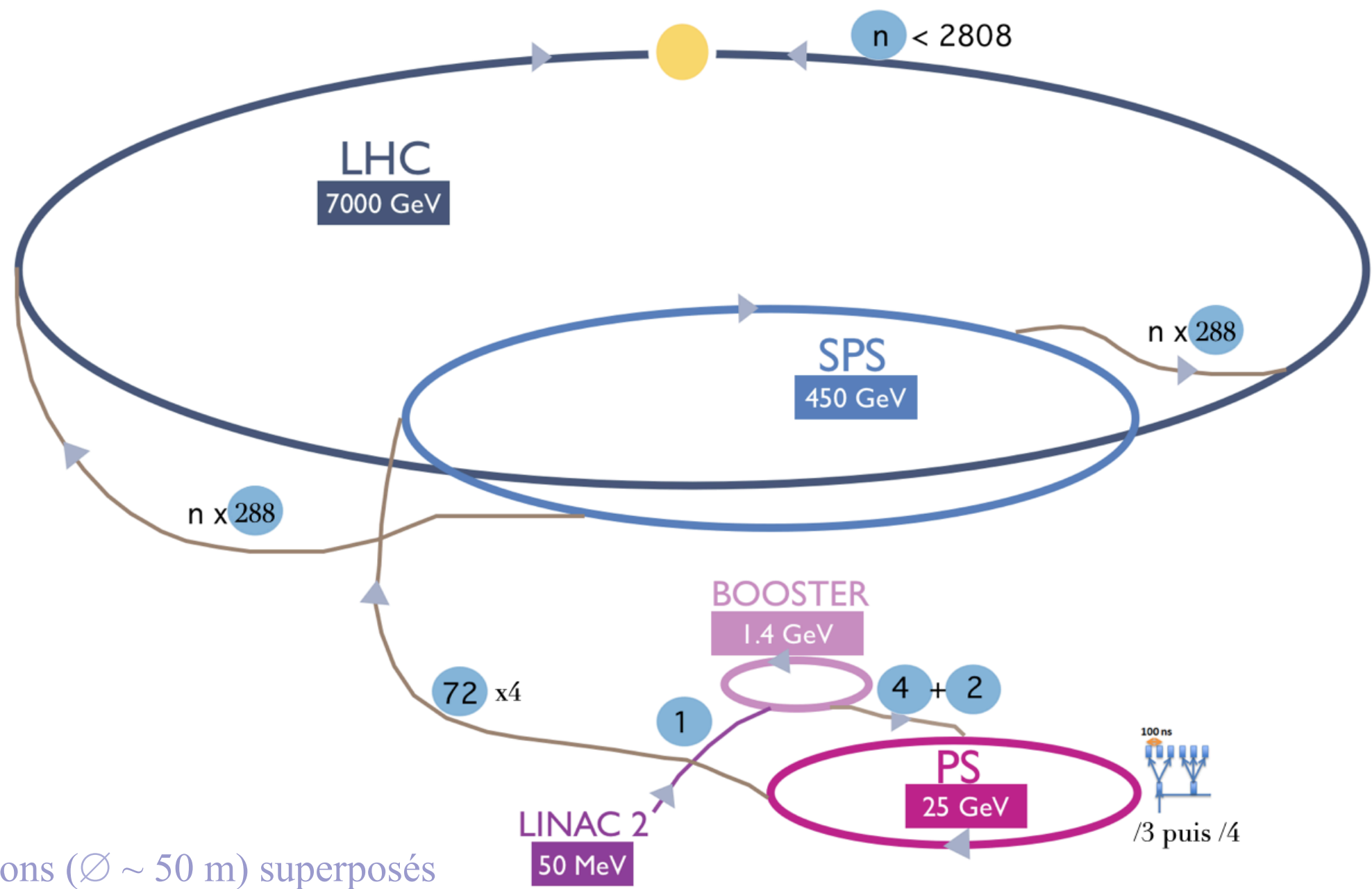
▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ $\bar{p}$ [antiproton] ▶ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Circuit des p jusqu'au LHC



1. LINAC2: $H^+ \rightarrow 50 \text{ MeV}$

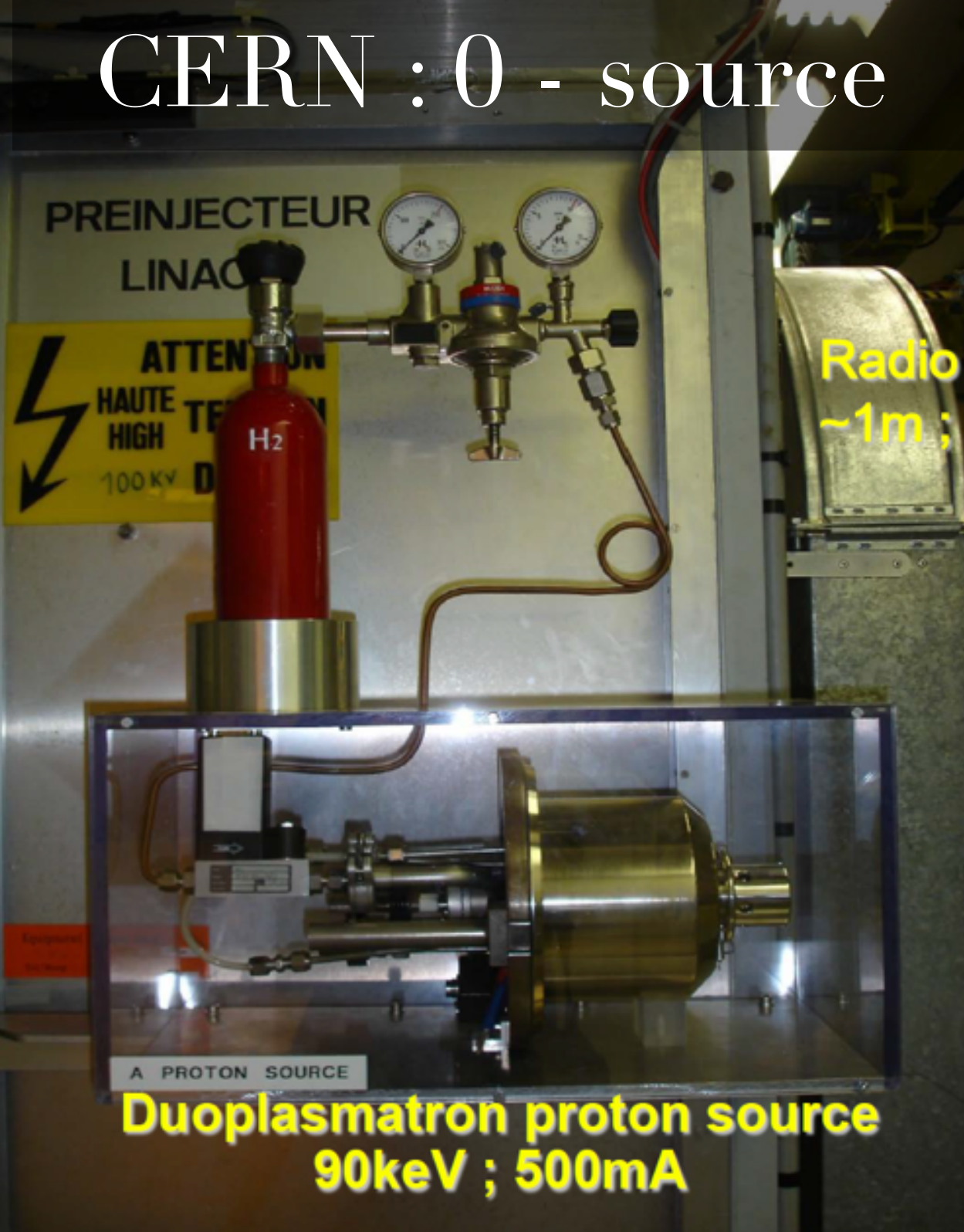
2. BOOSTER : 4 Synchrotrons ($\varnothing \sim 50 \text{ m}$) superposés
accumuler p et accélérer $\rightarrow 1.4 \text{ GeV}$

3. PS : Synchrotron ($\varnothing \sim 200 \text{ m}$) $\rightarrow 28 \text{ GeV}$

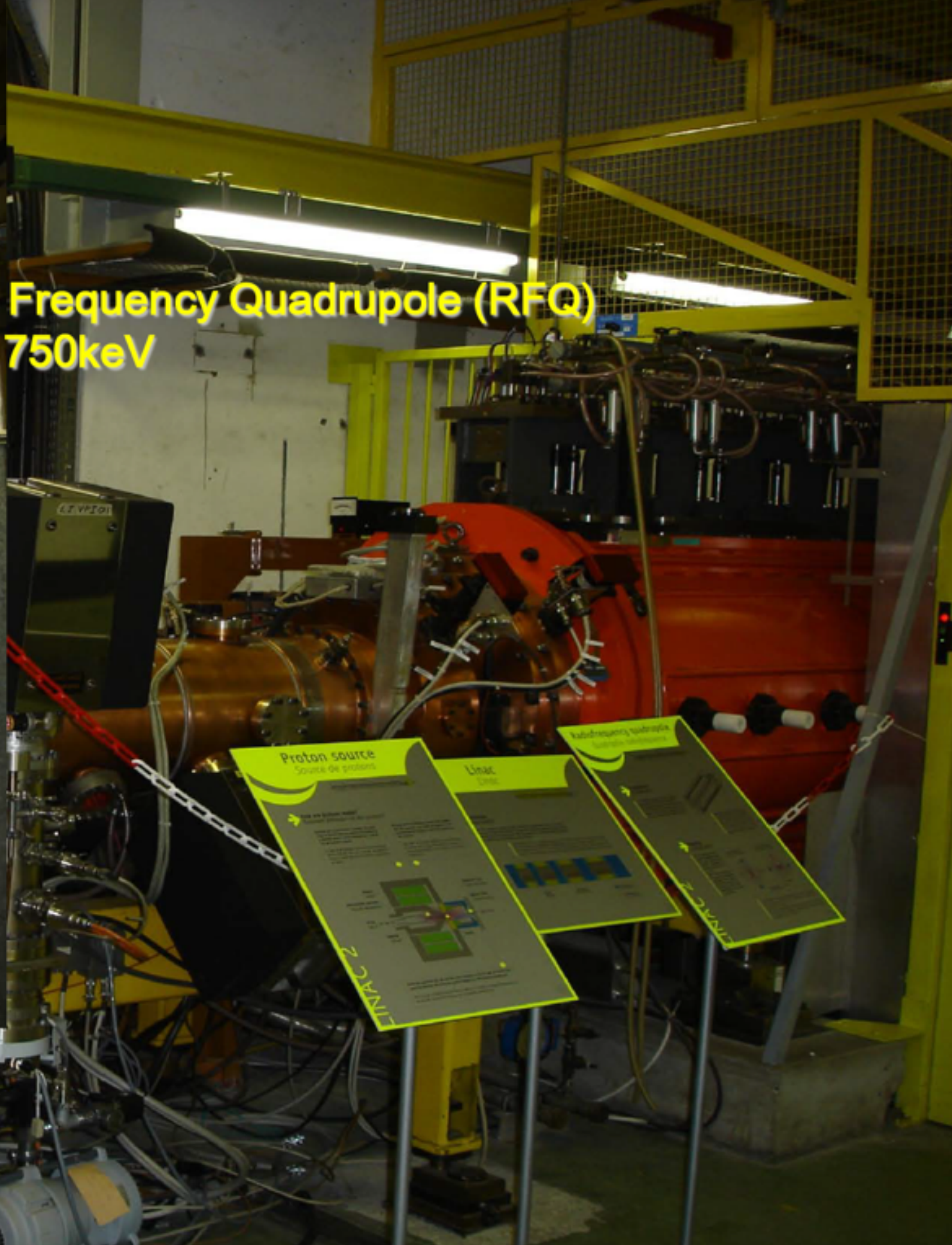
4. SPS : Synchrotron ($\varnothing \sim 2200 \text{ m}$) $\rightarrow 450 \text{ GeV}$
(Ancien collisionneur $p\bar{p}$ ($\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$) $L \leq 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

5. LHC: Synchrotron ($\varnothing \sim 6200 \text{ m}$)
Collisionneur pp ($\sqrt{s} = 8 \text{ TeV} \rightarrow 14 \text{ TeV (2015?)}$) $L \leq 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Collisionneur Pb^+Pb^+ $2,75 \text{ TeV/nucléon}$

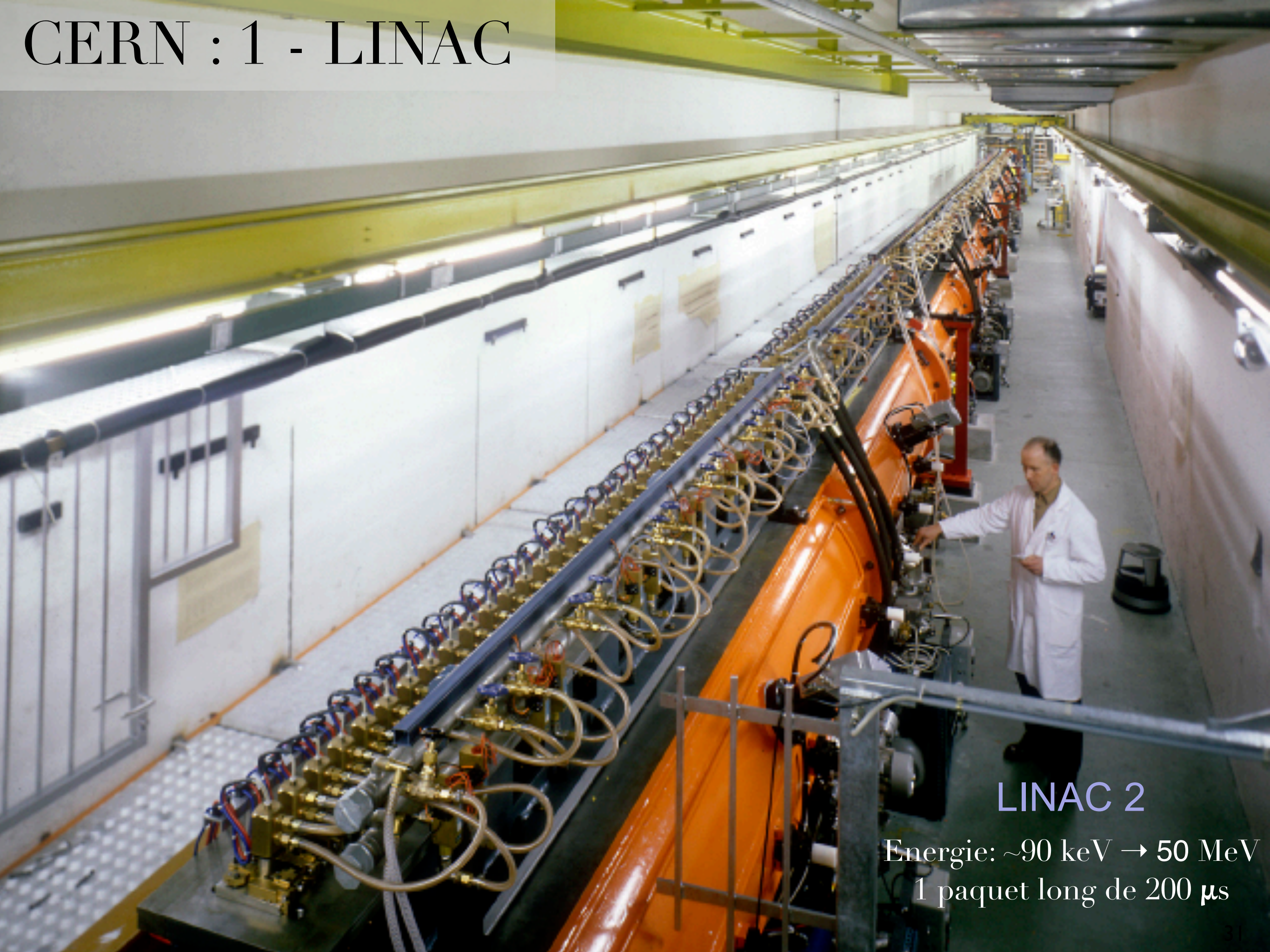
CERN : 0 - source



Radio Frequency Quadrupole (RFQ)
~1m ; 750keV



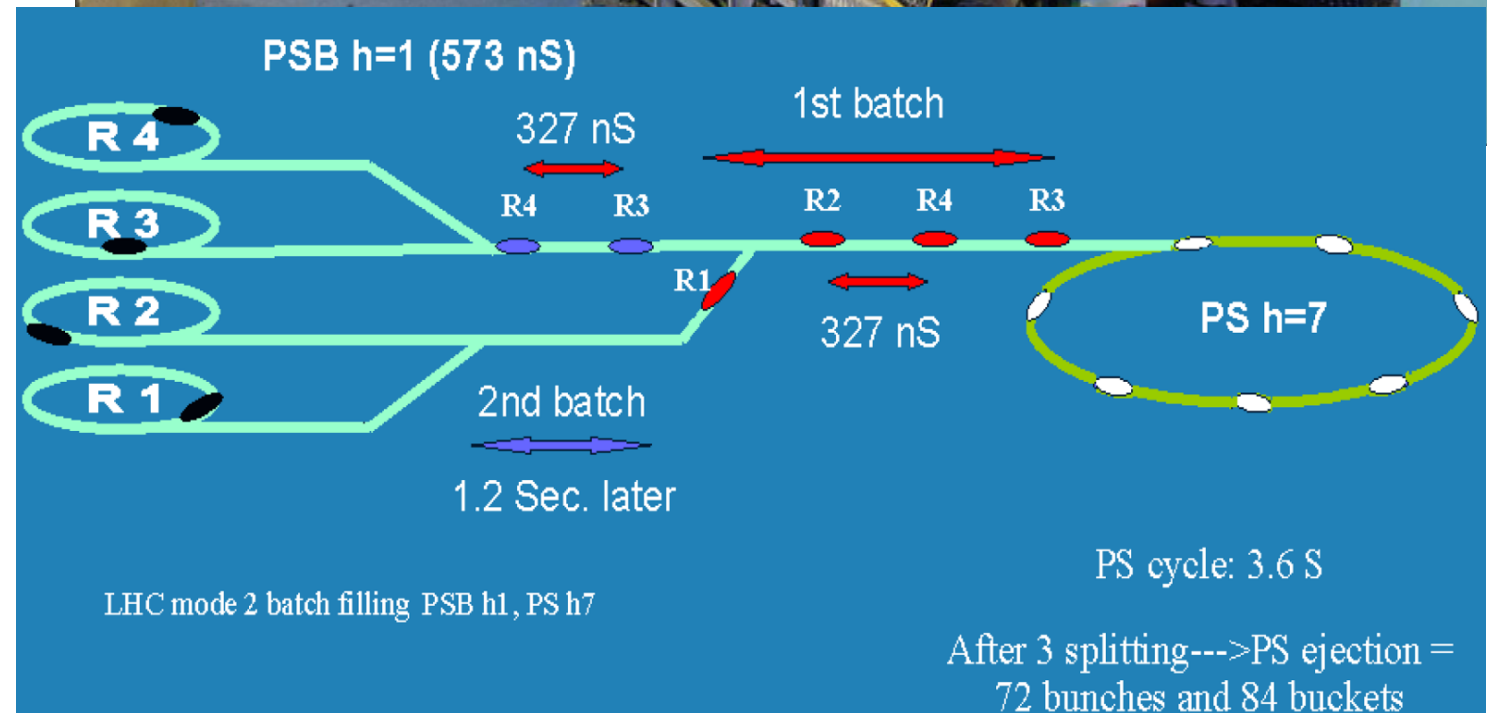
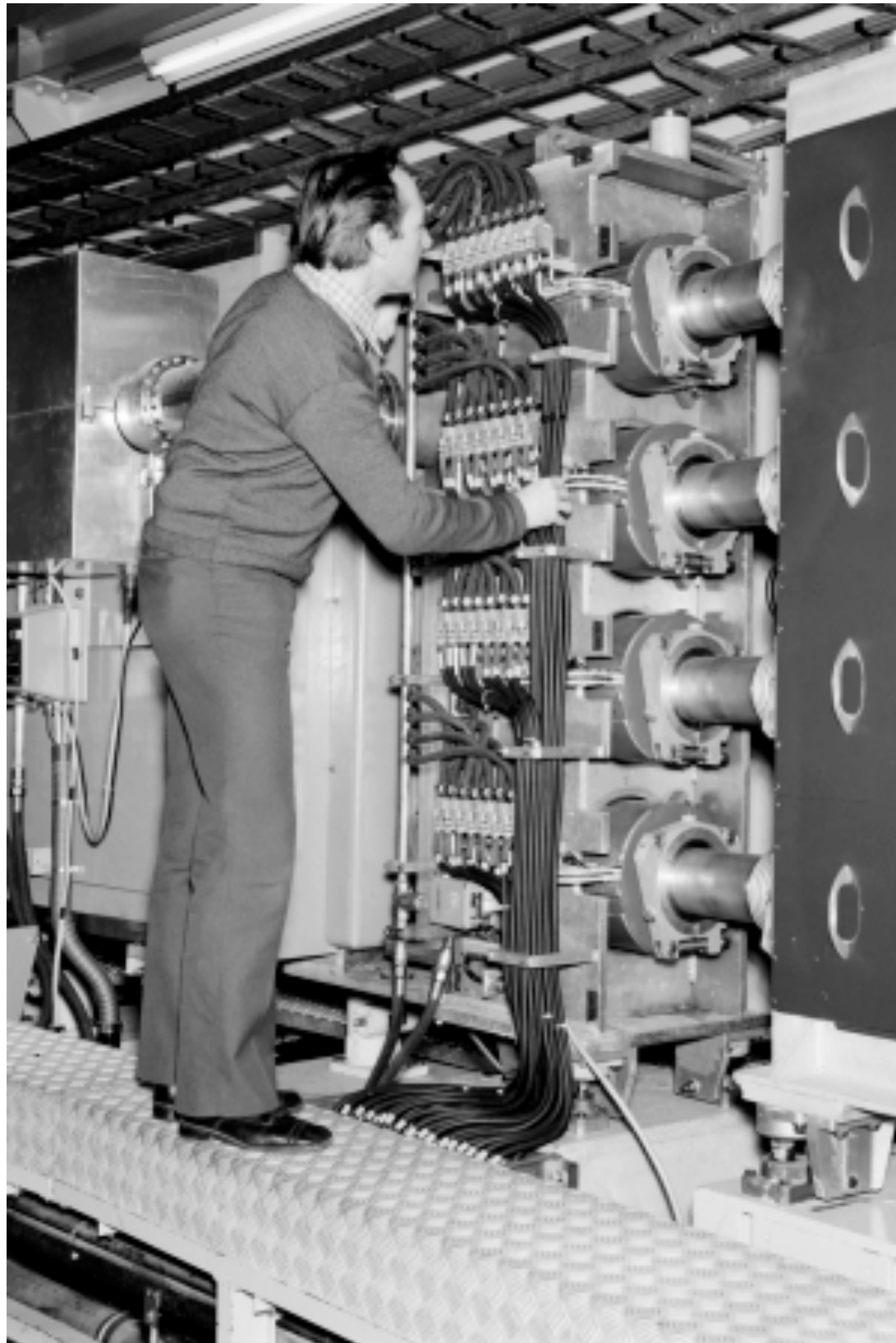
CERN : 1 - LINAC



LINAC 2

Energie: $\sim 90 \text{ keV} \rightarrow 50 \text{ MeV}$
1 paquet long de $200 \mu\text{s}$

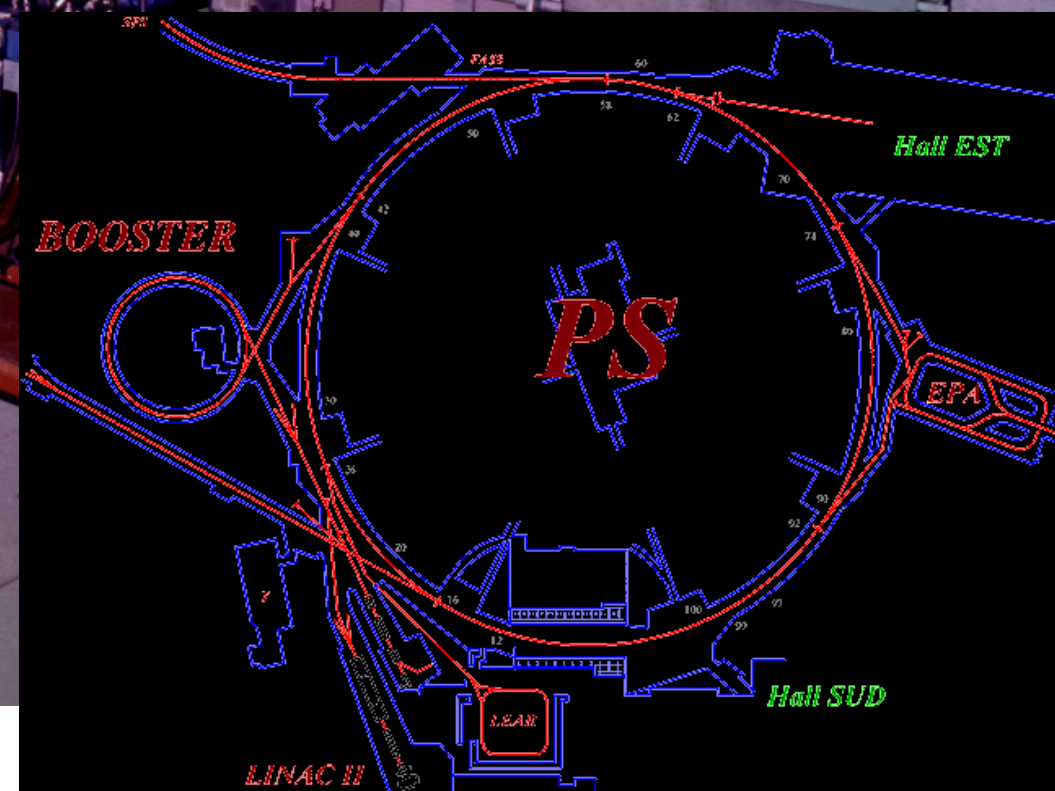
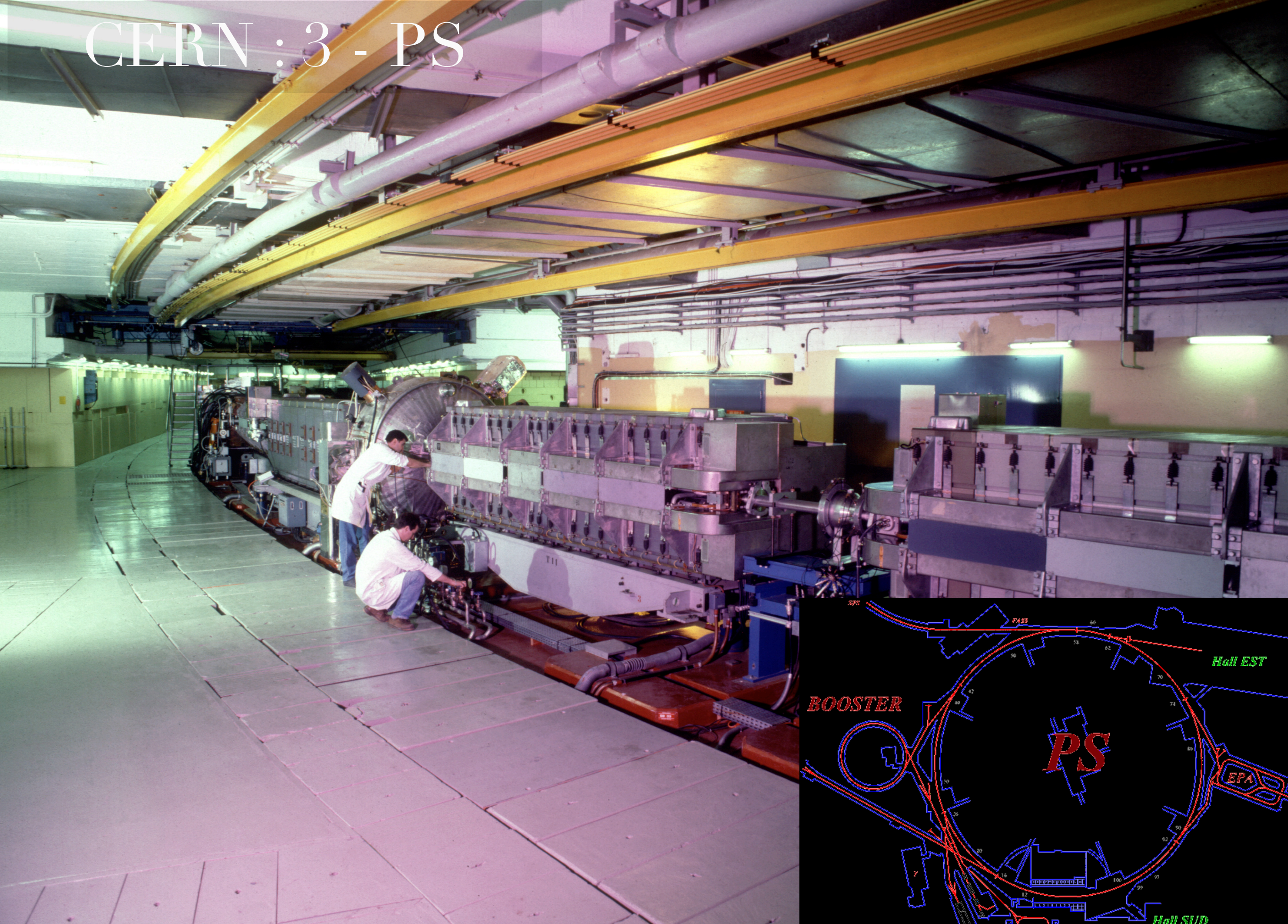
CERN : 2 - Booster PSB



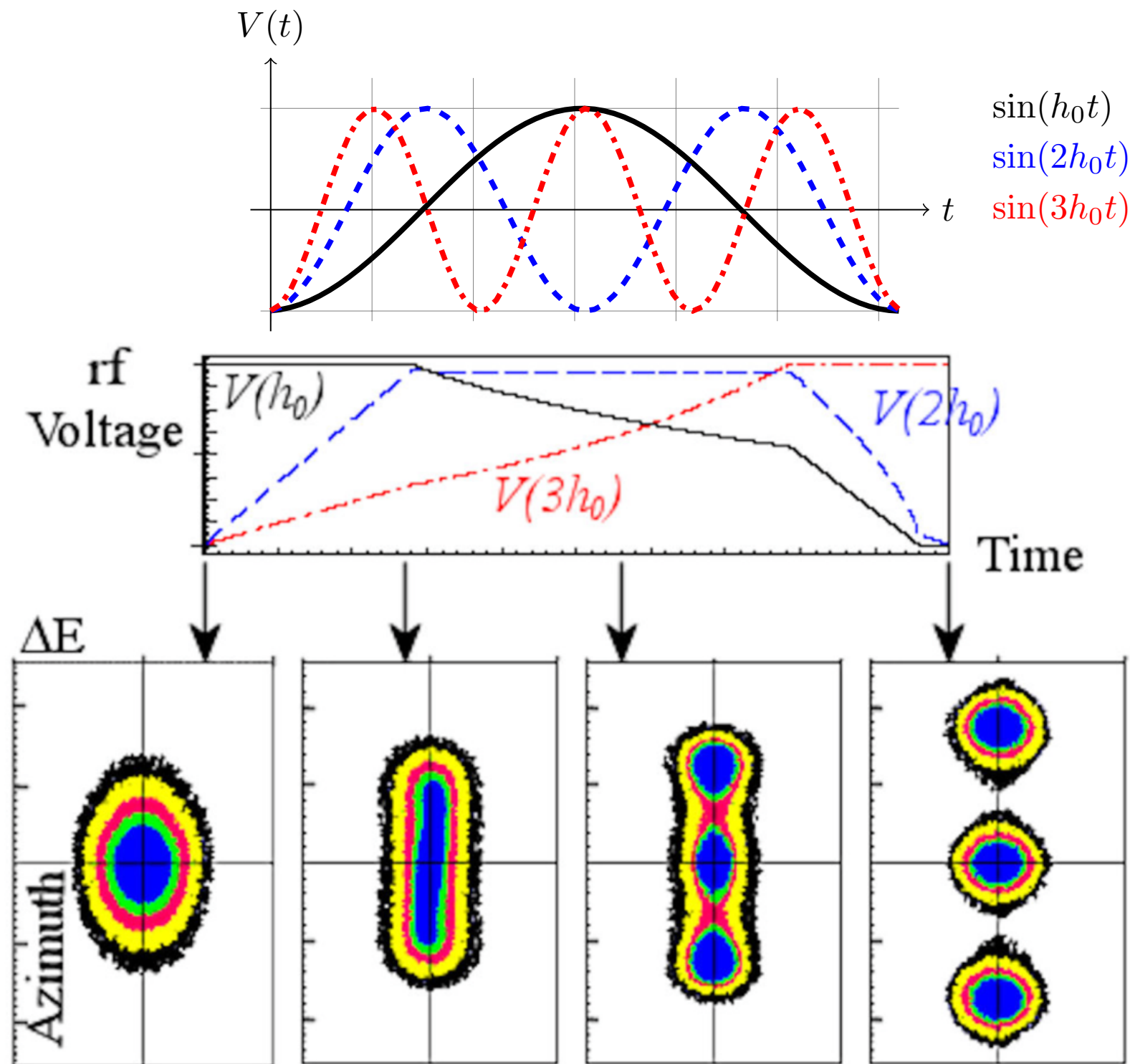
Energie: 0.05 → 1.4 GeV

4+2 paquets

CERN : 3 - PS

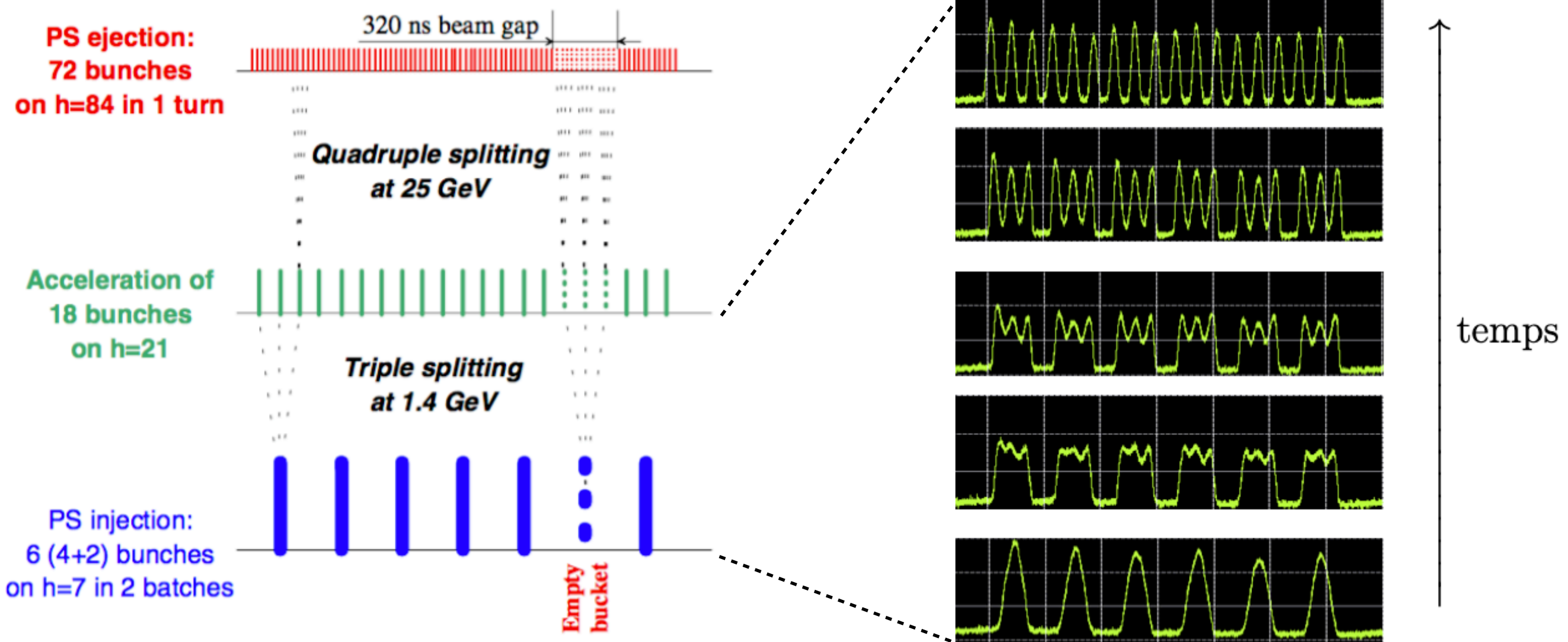


CERN : 3 - PS - séparation des paquets



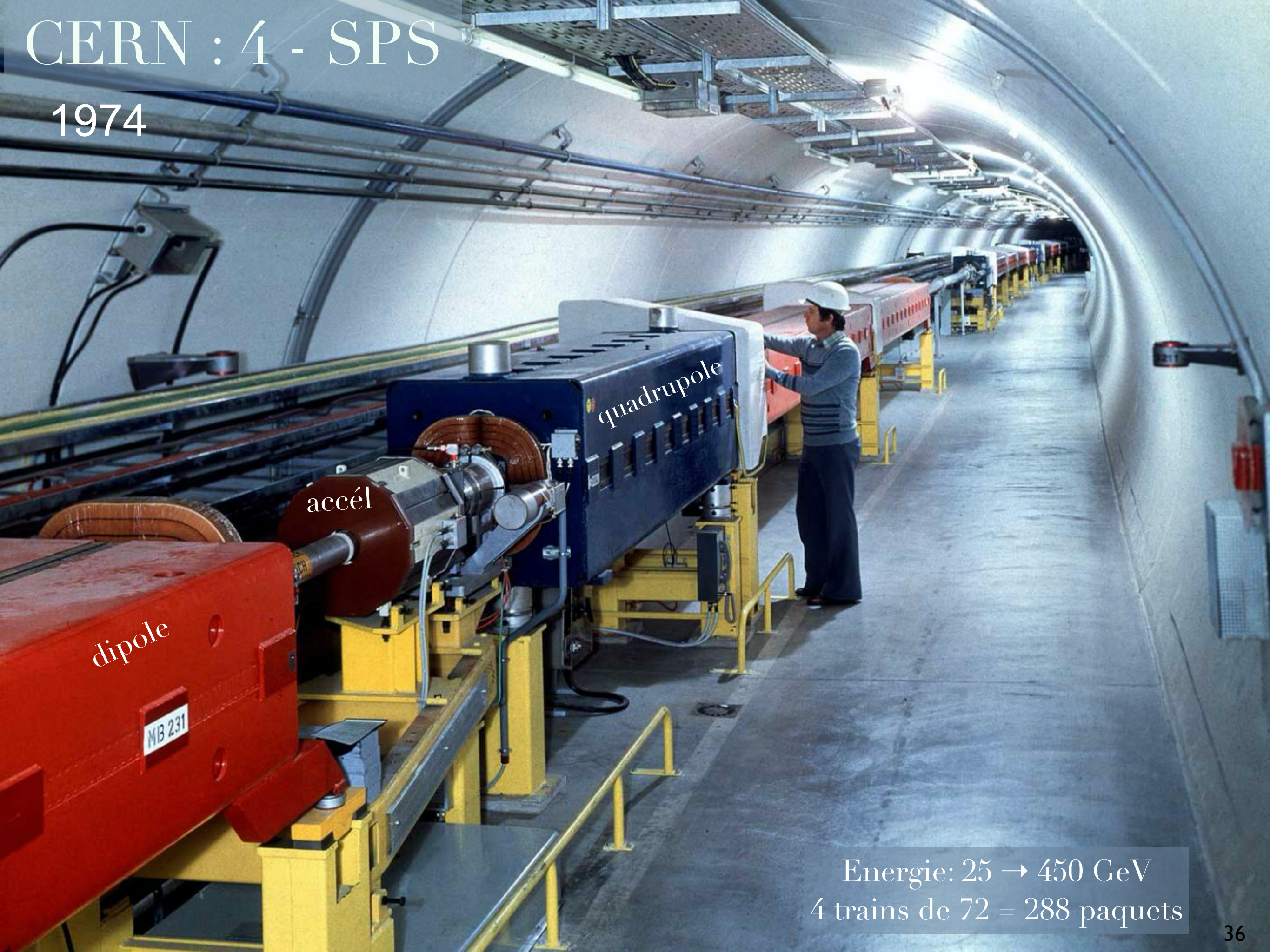
à 1.4 GeV : séparation des (6+1 vide) paquets en 3

CERN : 4 - PS - séparation des paquets



CERN : 4 - SPS

1974



quadrupole

accél

dipole

MB 231

Energie: $25 \rightarrow 450$ GeV
4 trains de 72 = 288 paquets

CERN : 5 - LHC

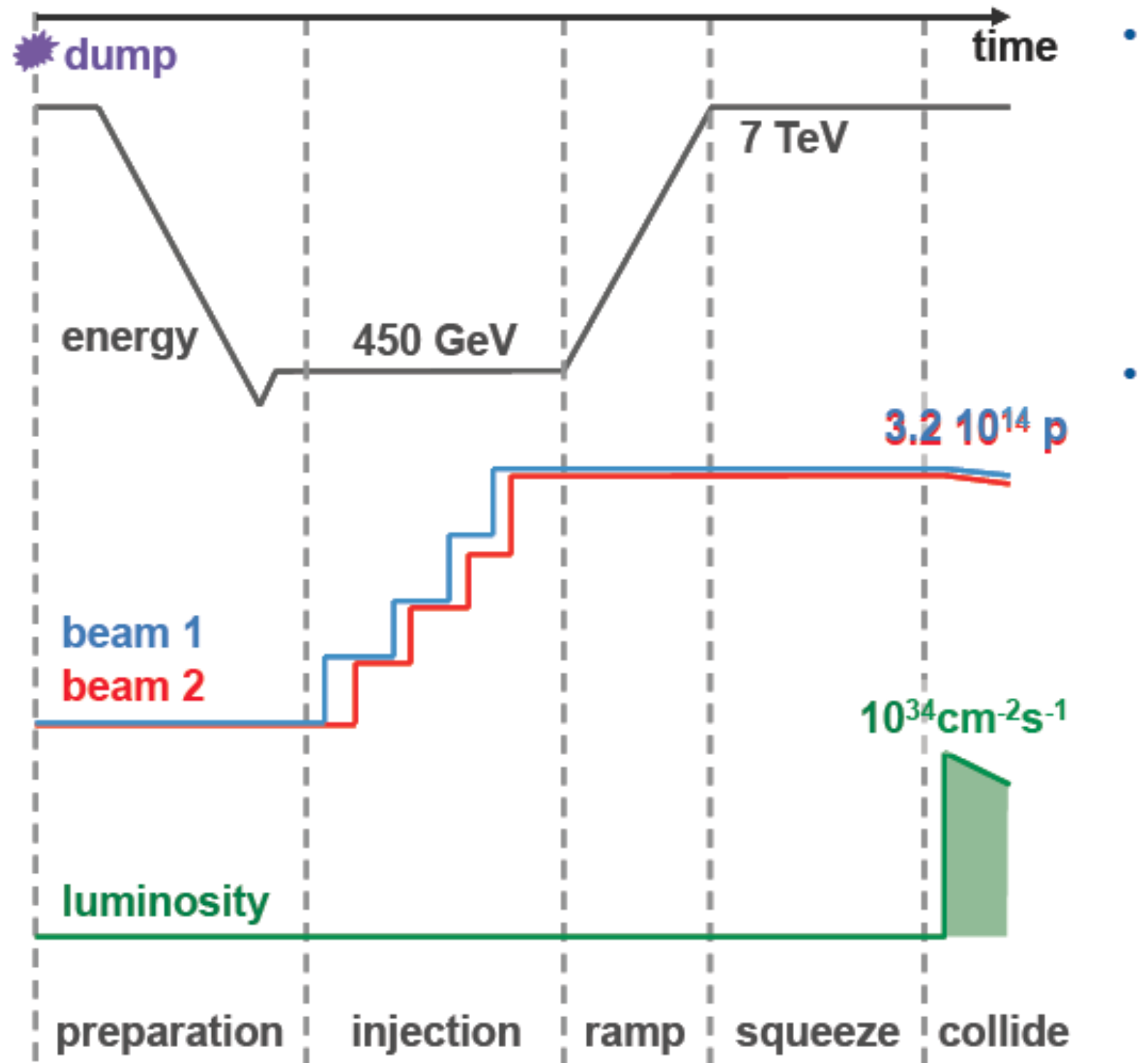


Energie: $450 \rightarrow 7000$ GeV
n x 288 $\rightarrow$ 2 x 2808 paquets

1232 dipoles - $B_z=8.3$ Tesla
16 cavités RF à 400 MHz, 5 MV/m

LHC : remplissage et accélération

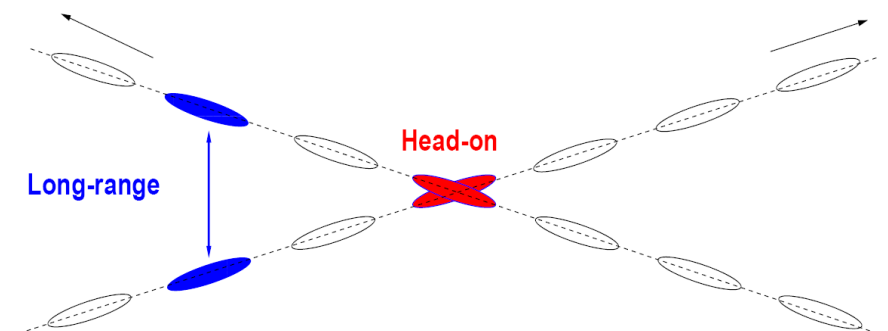
2012	typ. time
prep	>50 min.
inj	~60 min.
ramp	~15 min.
squ.	~20 min.
coll.	0-20 h



LHC : paramètres

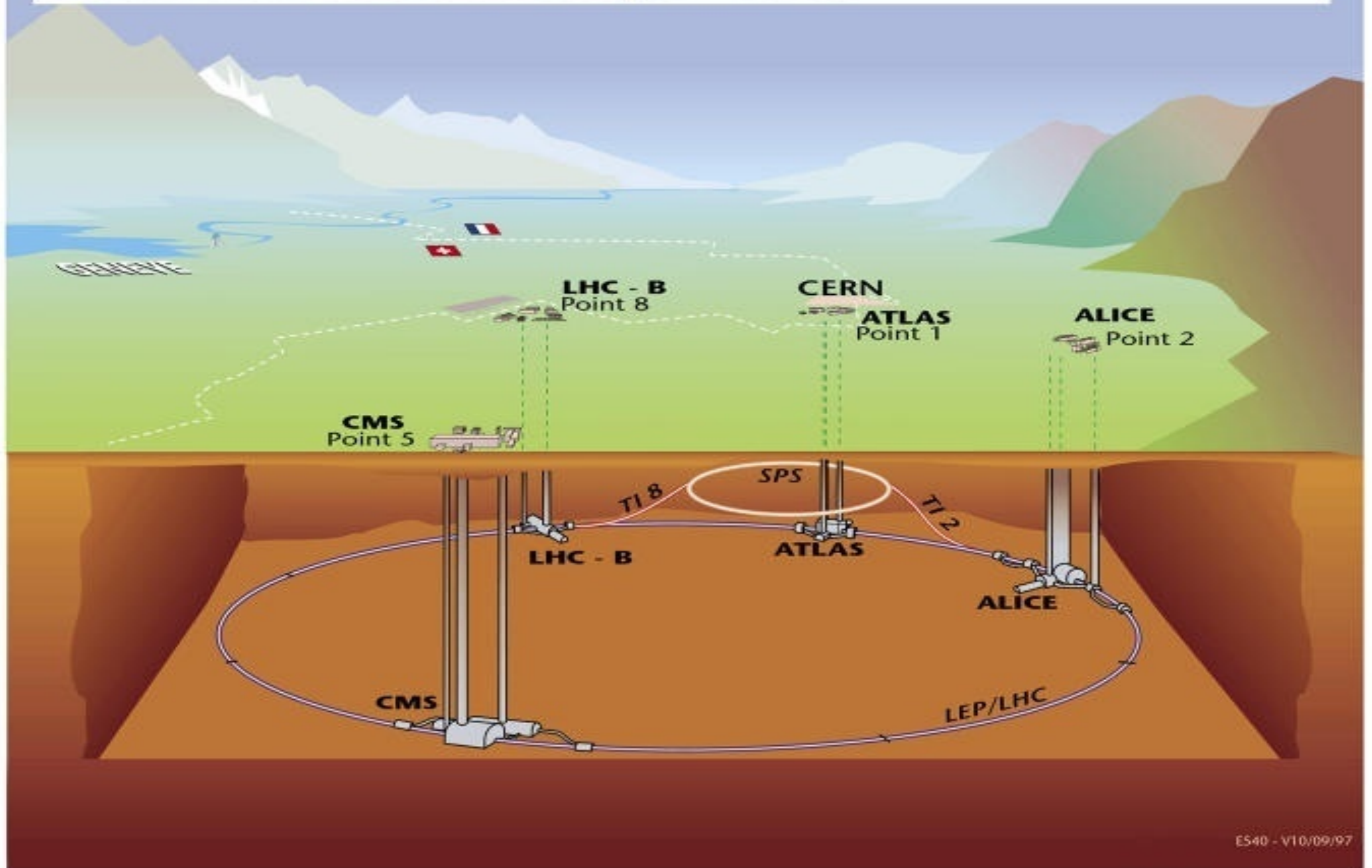
Parameter	Nominal
beam energy [TeV]	7.0
bunch spacing [ns]	25
k [no. bunches]	2808
N_b [10^{11} p/bunch]	1.15
ε [mm mrad]	3.75
β^* [m]	0.55
half crossing angle [μ rad]	142.5
L reduction factor	~ 0.84
L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	10^{34}

LHC
$\beta^* = 18 \rightarrow 0.55 \text{ m}$
$\varepsilon = 3.75 \mu\text{m}$
$\gamma = 7463$
$\sigma_{x,y} = 16.6 \mu\text{m}$



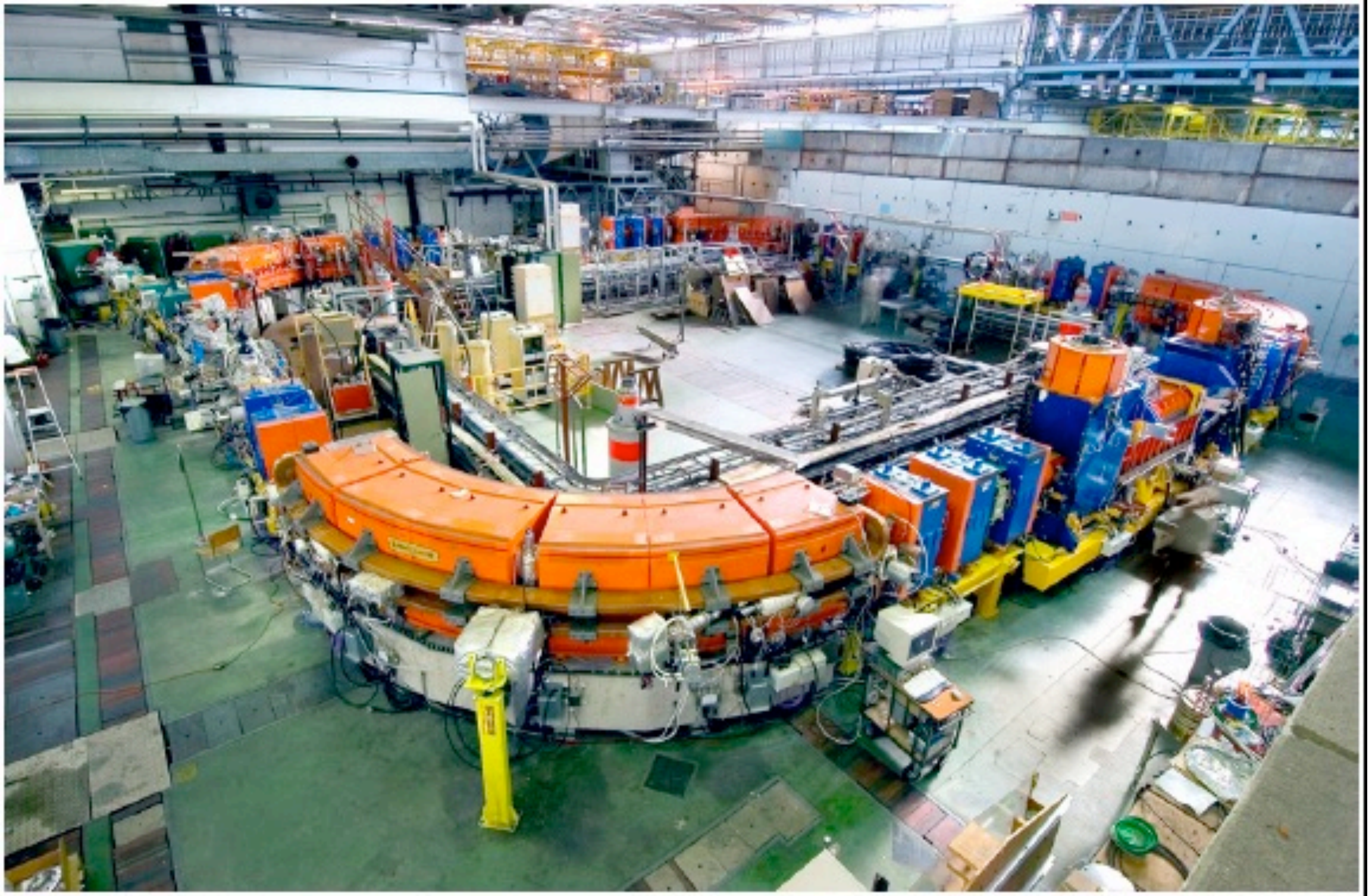
collisions non purement frontales

Overall view of the LHC experiments.



Animation CERN - LHC

Synchrotron : LEIR



LEIR: Low Energy Ion Ring - CERN

Principaux collisionneurs

	Energy (GeV)	$\mathcal{L}_{max}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	rate s^{-1}	σ_x/σ_y $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Particles per bunch
SPS ($p\bar{p}$)	315x315	$6 \cdot 10^{30}$	$4 \cdot 10^5$	60/30	$\approx 10 \cdot 10^{10}$
Tevatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	$100 \cdot 10^{30}$	$7 \cdot 10^6$	30/30	$\approx 30/8 \cdot 10^{10}$
HERA (e^+p)	30x920	$40 \cdot 10^{30}$	40	250/50	$\approx 3/7 \cdot 10^{10}$
LHC (pp)	7000x7000	$10000 \cdot 10^{30}$	10^9	17/17	$\approx 11 \cdot 10^{10}$
LEP (e^+e^-)	105x105	$100 \cdot 10^{30}$	≤ 1	200/2	$\approx 50 \cdot 10^{10}$
PEP (e^+e^-)	9x3	$8000 \cdot 10^{30}$	NA	150/5	$\approx 2/6 \cdot 10^{10}$

Collisionneurs : LEP (e^+e^-)



$$f \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$$

$$N_b = 4$$

$$N_1, N_2 = 2 \cdot 10^{10}$$

$$\sigma_{x,y} = 200 \text{ } \mu\text{m}, 8 \text{ } \mu\text{m}$$

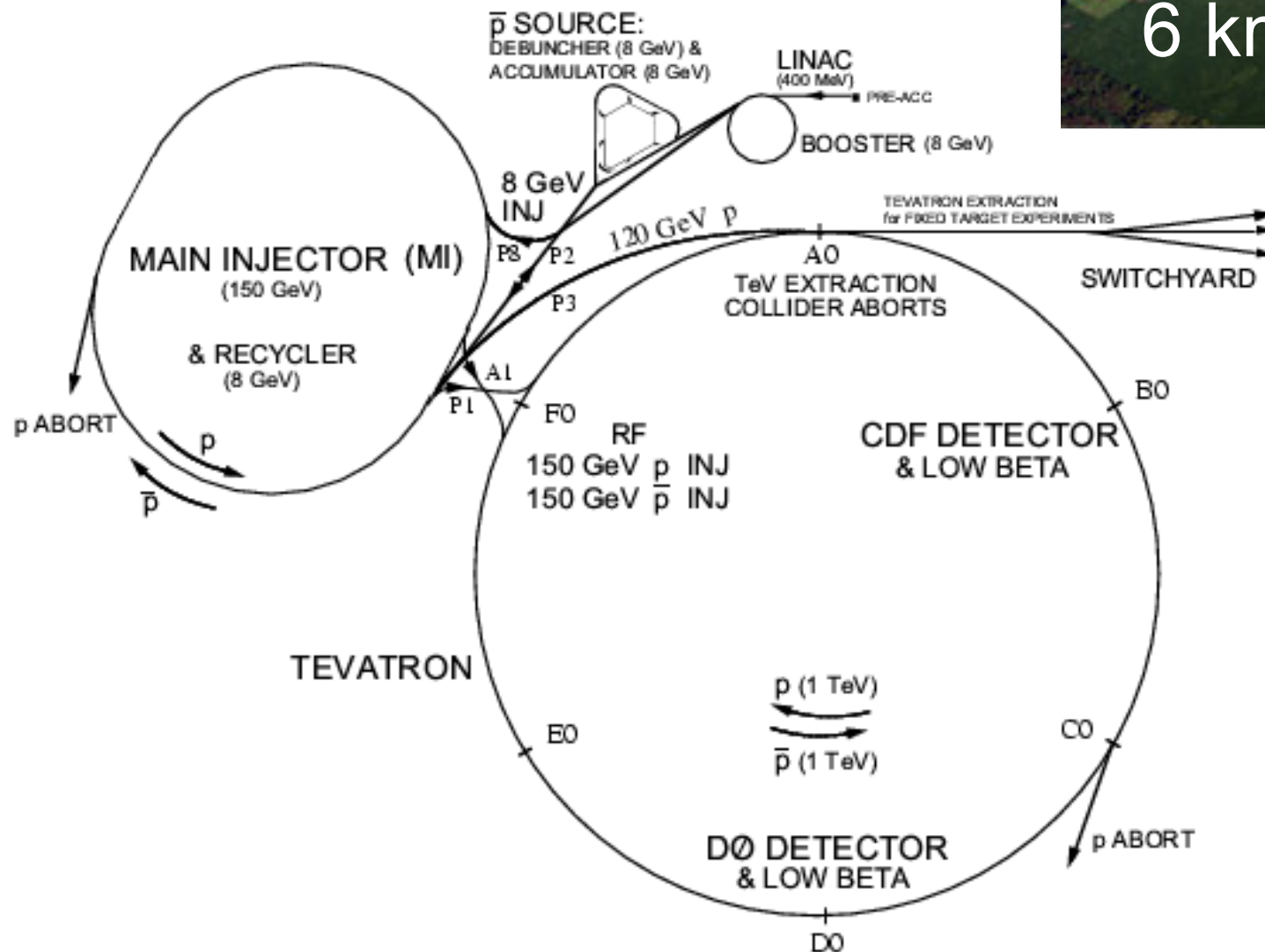
$$\rightarrow L \sim 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

LEP (1989-2001) - CERN

Collisionneurs p- $\bar{p}$: TeVatron

FermiLab (Chicago)

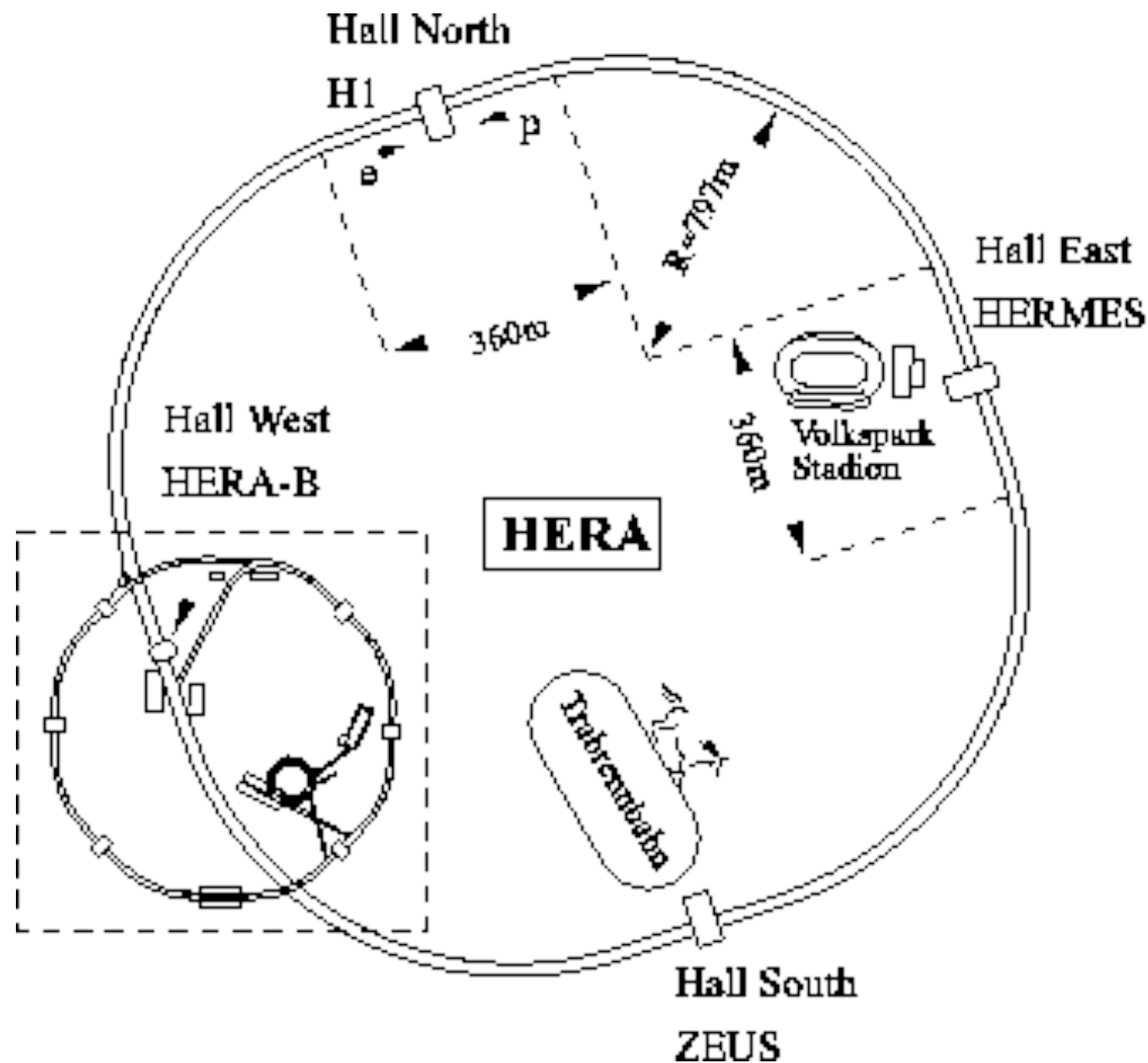
$$\sqrt{s_{p\bar{p}}} = 1.96 \text{ TeV}$$



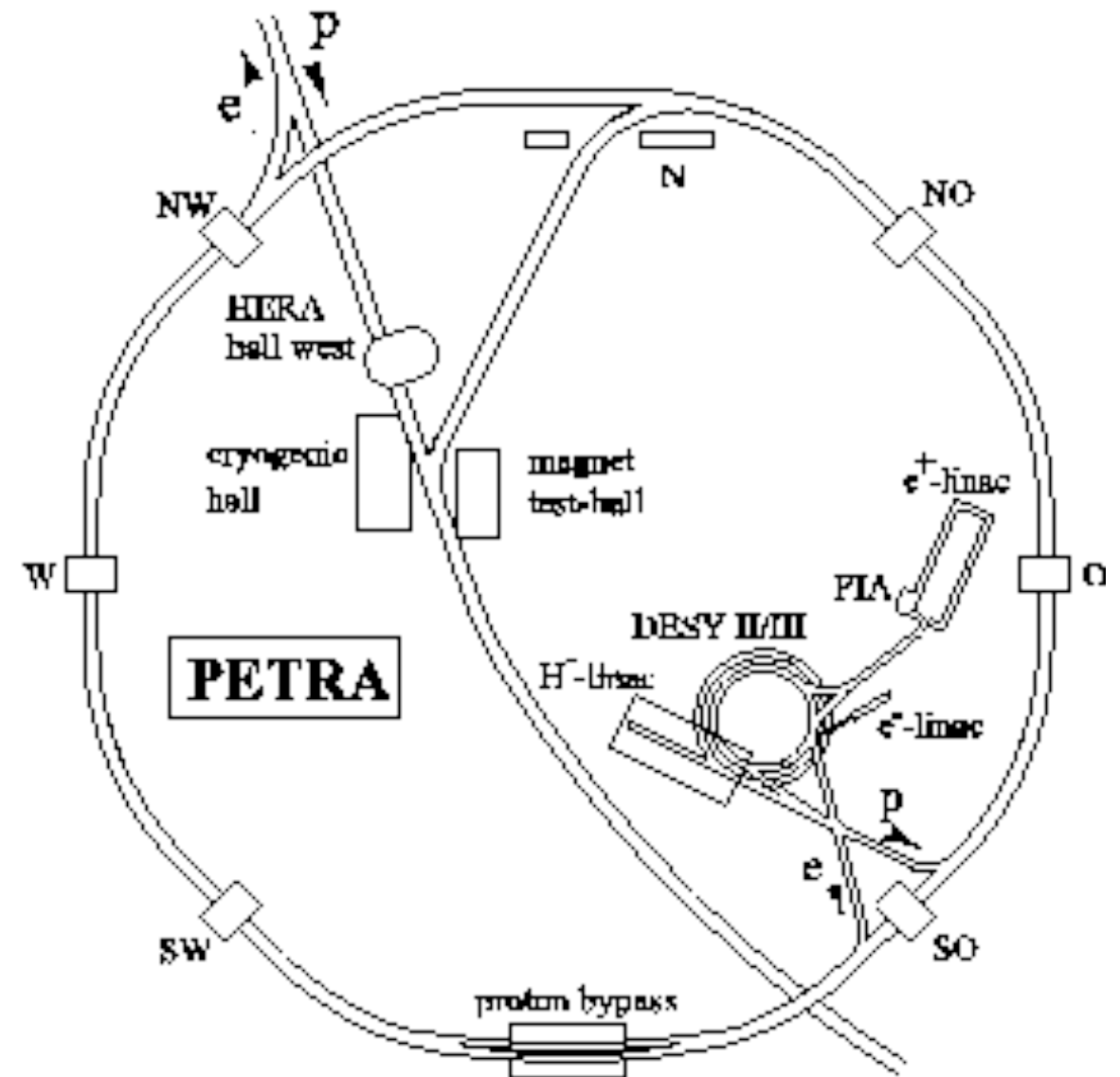
Collisionneurs e-p HERA

DESY (Hambourg)

$$E_e = 37 \text{ GeV} - E_p = 920 \text{ GeV}$$



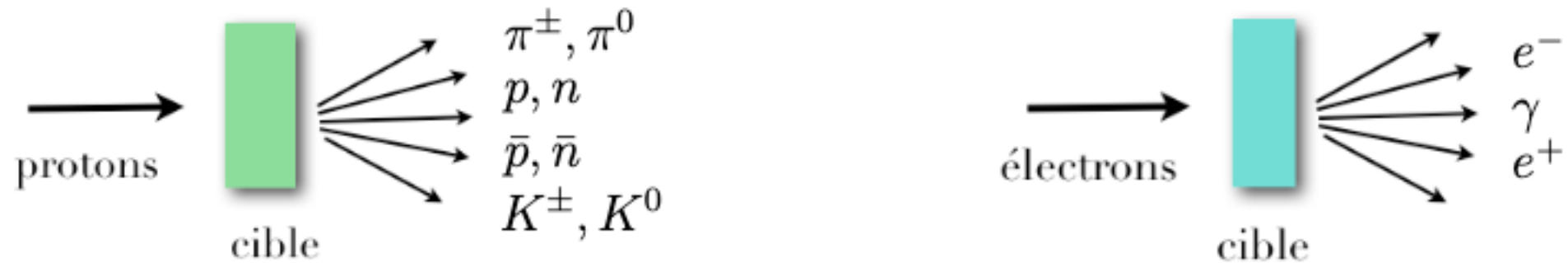
premier faisceau de p supraconducteur



fonctionnement 1992-2007

Faisceaux secondaires

Sources secondaires :

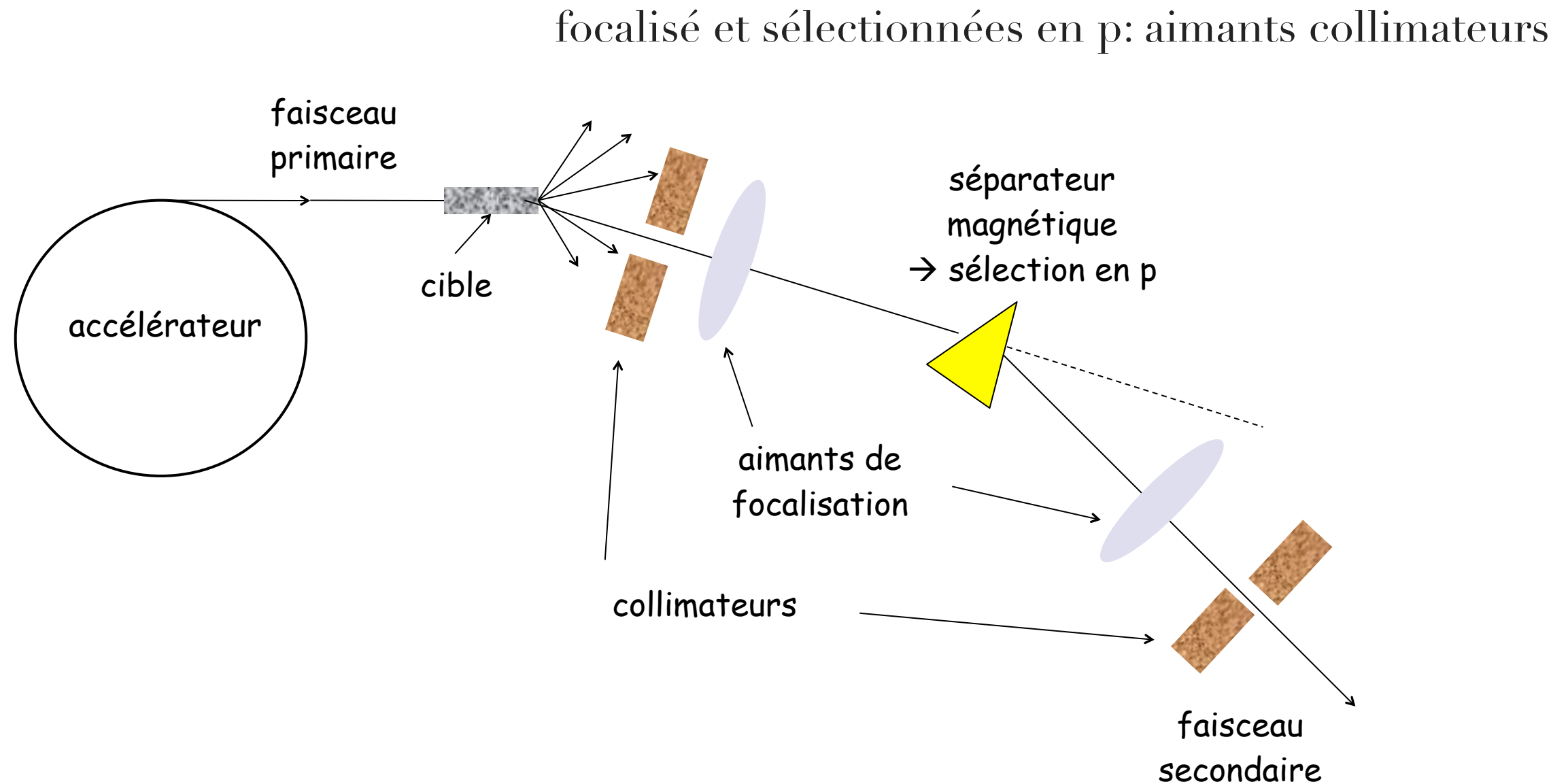


plus loin de la cible, suivi de :

$$K^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$
$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

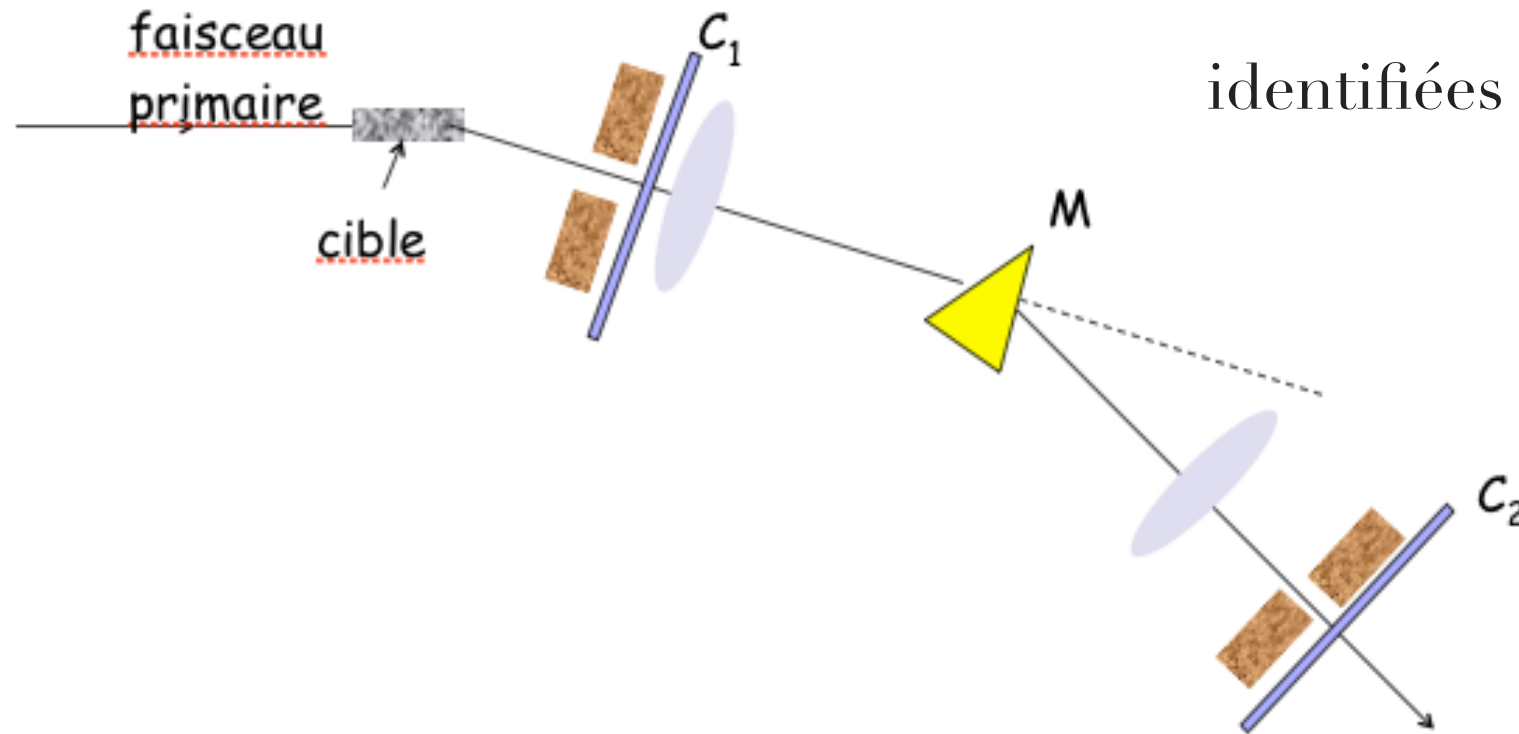
Faisceaux secondaires

Particules chargées



(dessin pas à l'échelle)

Faisceaux secondaires

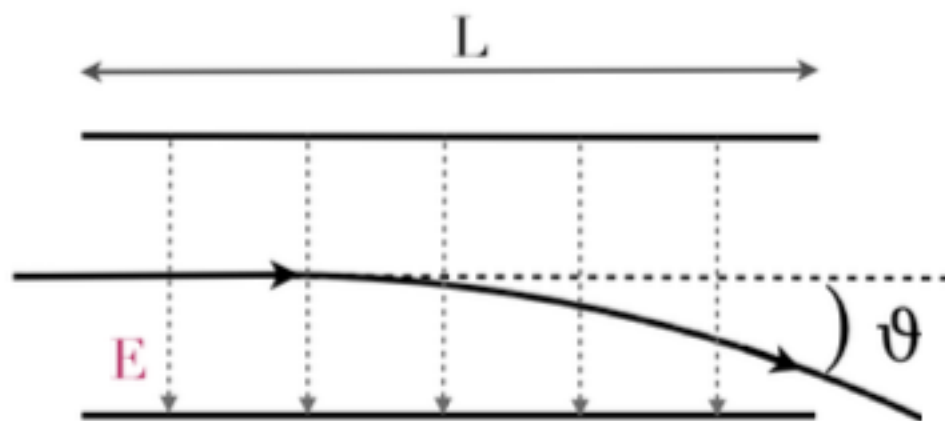


identifiées par leur temps de vol

$$t = \frac{d}{v} = \frac{d}{c\beta} \simeq \frac{d}{c} \frac{E}{p} = \frac{d}{c} \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{p}$$

⇒ information sur la masse

sélection en impulsion :



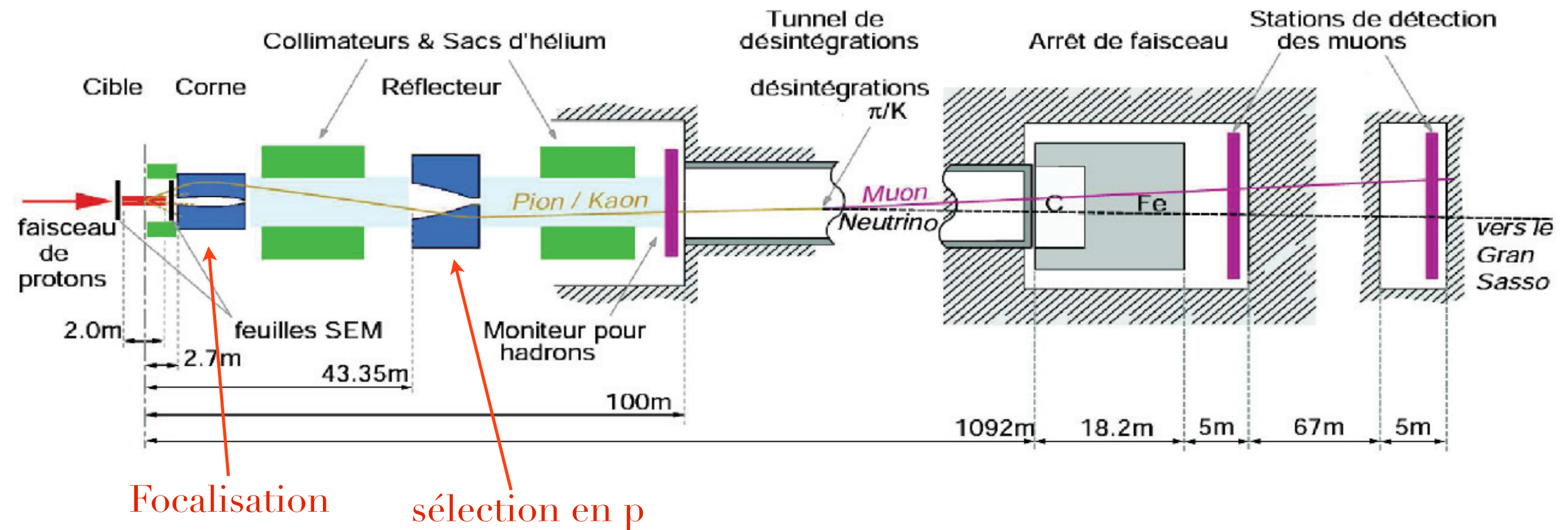
$$\theta \simeq \frac{p_T}{p} = \frac{\int qE dt}{p} = \frac{1}{v} \frac{\int_0^L qE dl}{p} = \frac{qEL}{c\beta p}$$

$$p = 3 \text{ GeV}/c, L = 5 \text{ m et } E = 5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

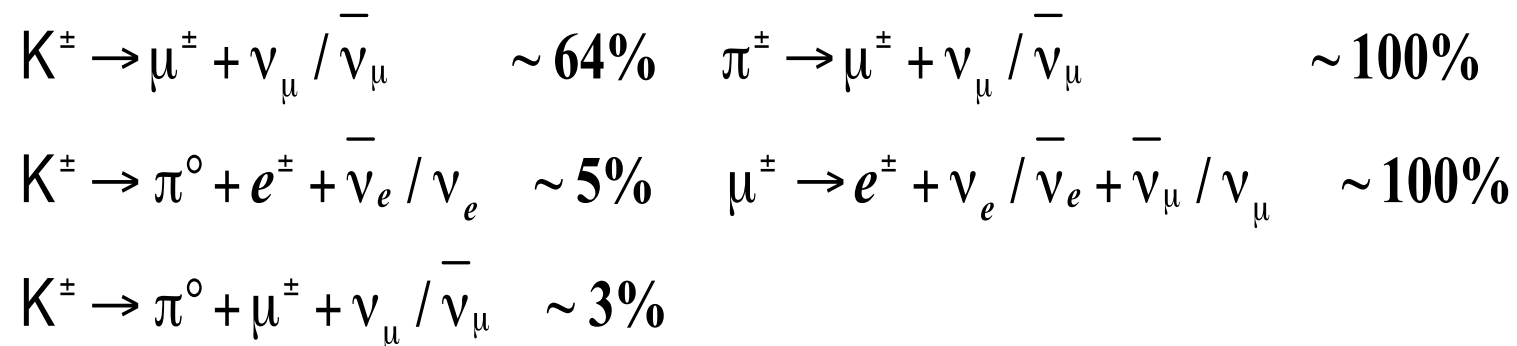
$$\Delta\theta = \theta_K - \theta_{\pi^\pm} = 0.1 \text{ mrad (soit environ } 0.005^\circ)$$

Faisceaux secondaires : neutrinos

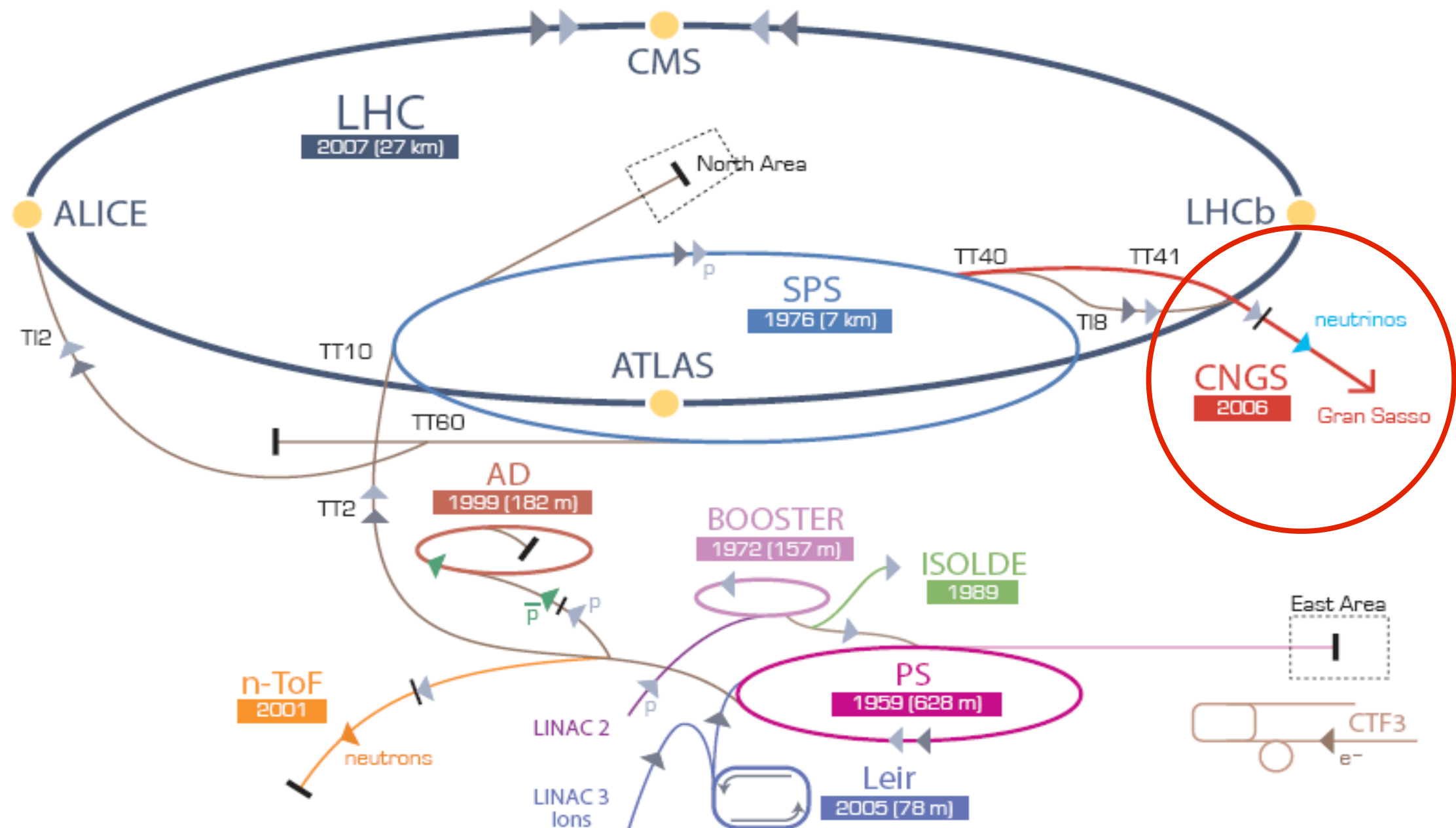
CERN → Gran Sasso



Production :



CERN: CNGS

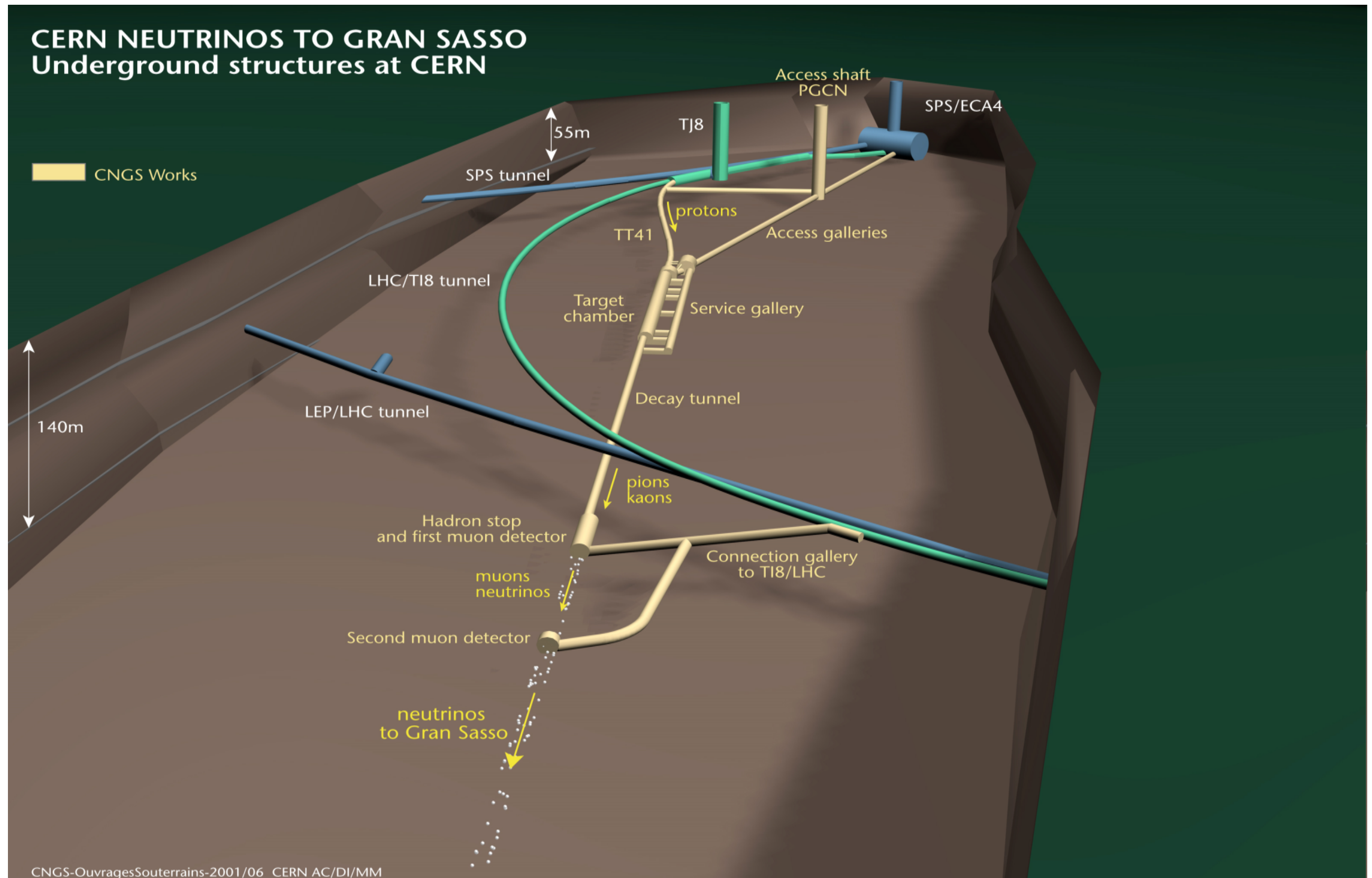


LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

CERN: CNGS



CERN: CNGS → LNGS

