

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2022-2023

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

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

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

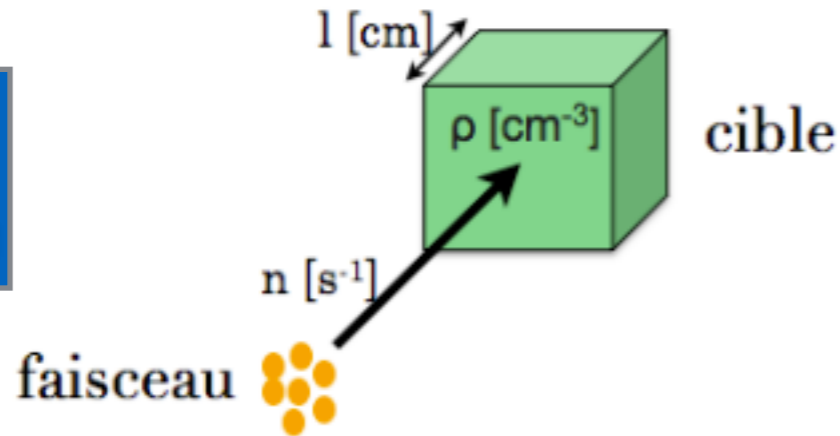
taux d'evt/s

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

et la luminosité intégrée

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

**Mode
cible fixe**



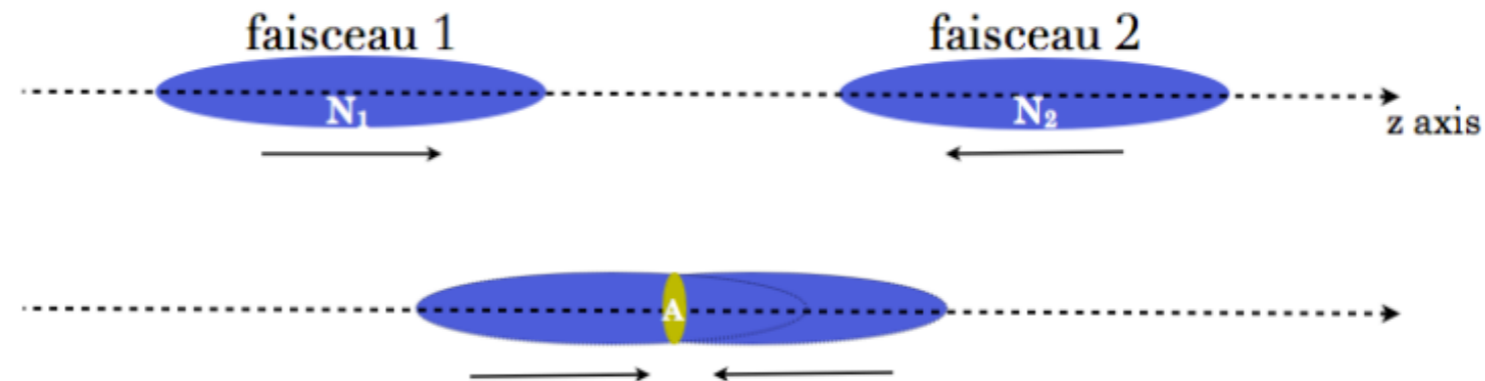
$$\mathcal{L}[cm^{-2}s^{-1}] = n \rho l$$

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

l : épaisseur de la cible ($[cm]$)

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

**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

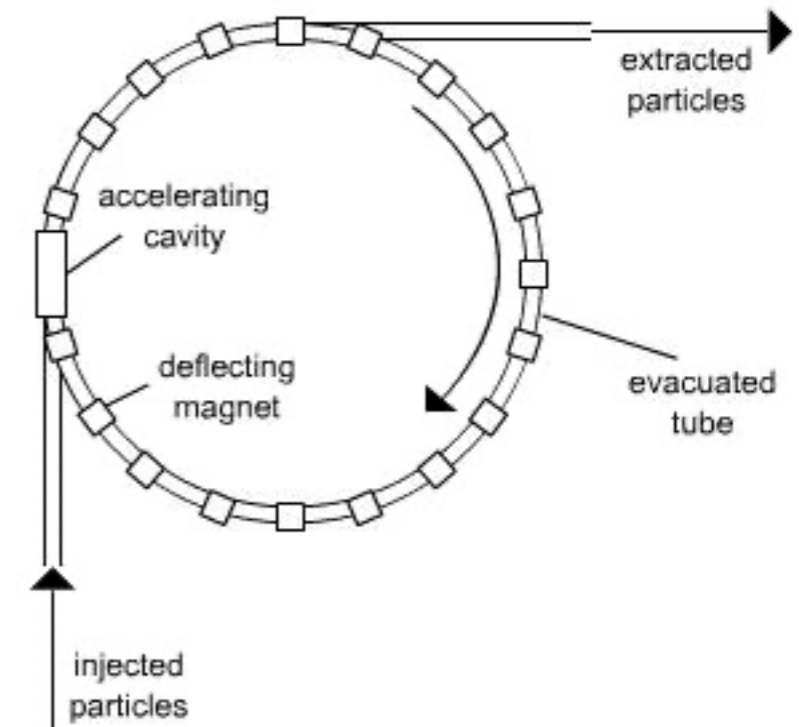
f : fréquence de révolution $[s^{-1}]$

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 :

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

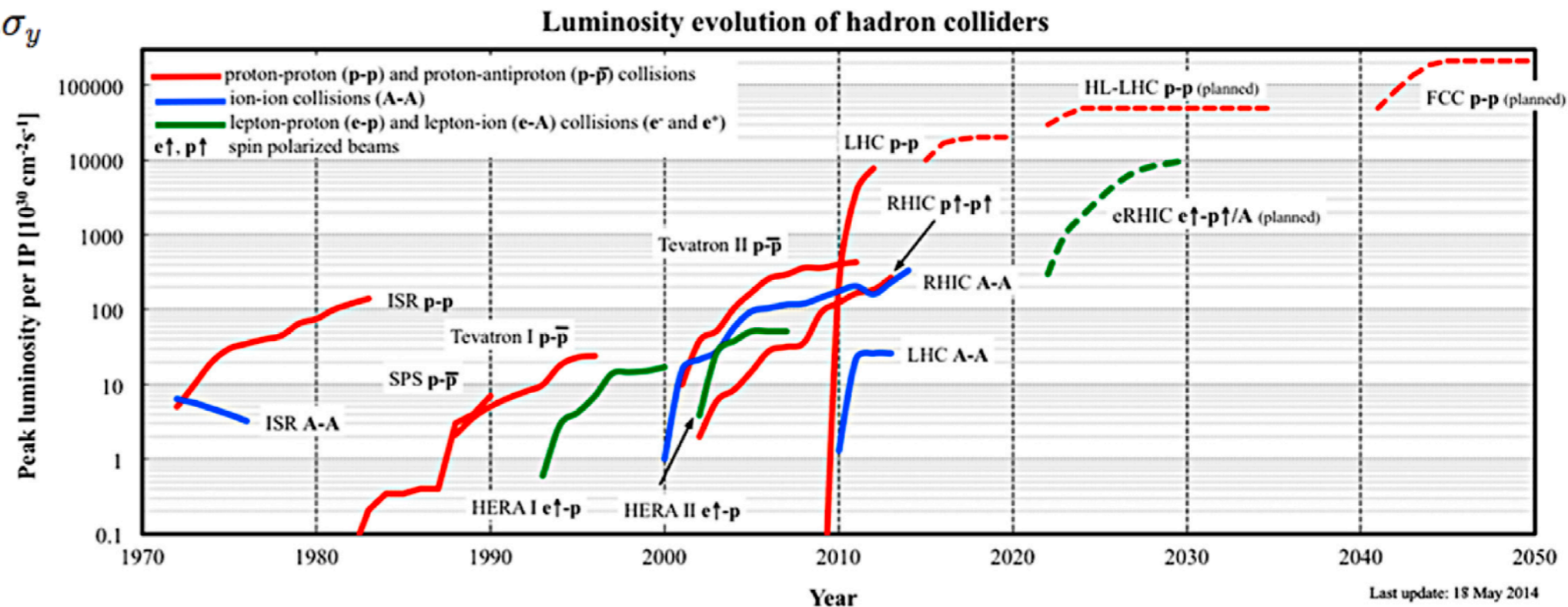
$$\Delta E = \int \vec{F} \cdot \vec{v} dt = q \int (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} dt$$

$$= q \int \vec{E} \cdot \vec{v} dt \quad \text{seul E permet d'accélérer les particules}$$

Principaux collisionneurs

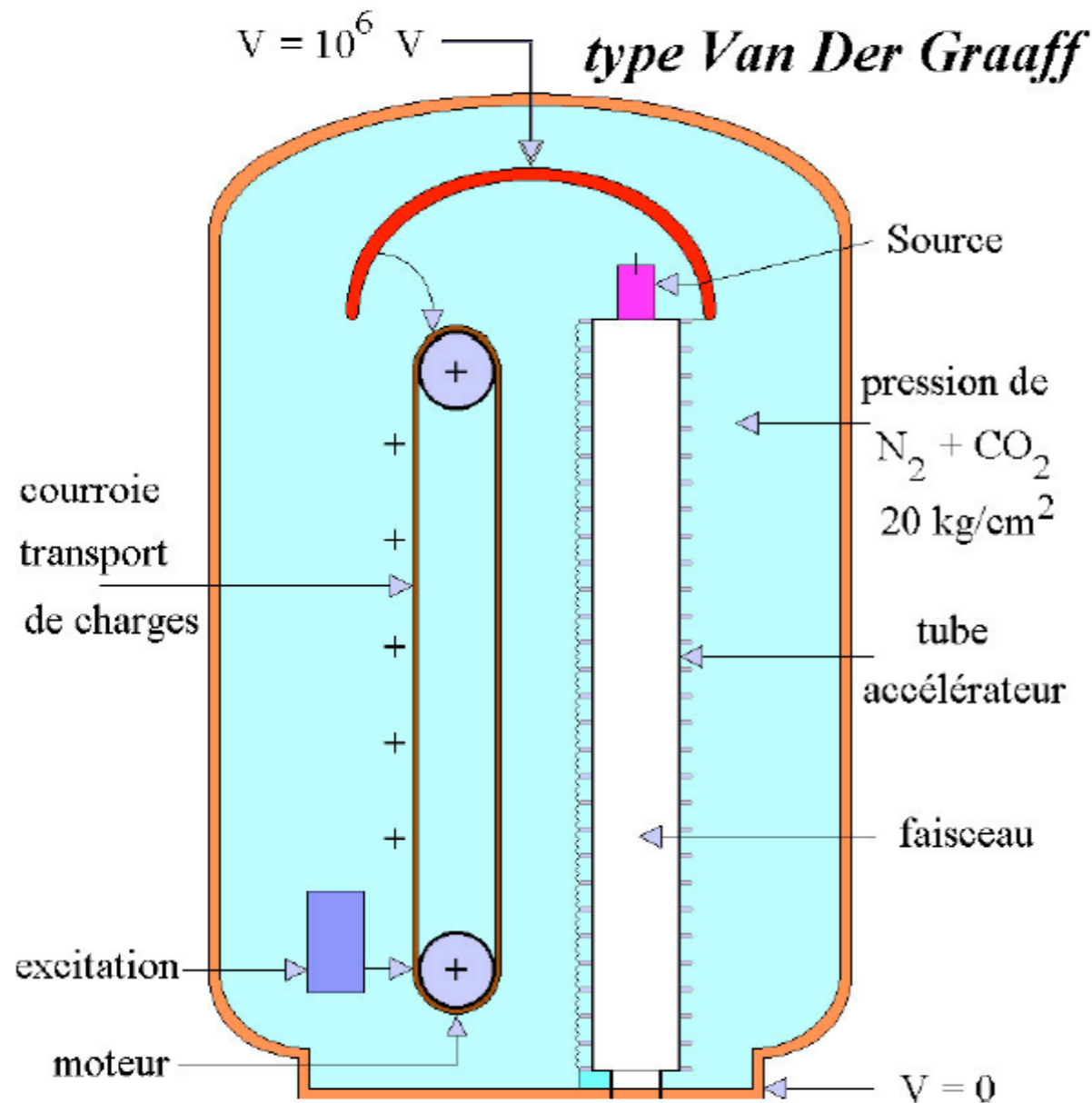
accélérateur	énergies [GeVxGeV]	\mathcal{L} [$10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	fréquence [s^{-1}]	σ_x/σ_y [$\mu\text{m}/\mu\text{m}$]	particules par paquet
SPS ($p\bar{p}$)	315x315	6	$4 \cdot 10^5$	60/30	10^{10}
TeVatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	100	$4 \cdot 10^6$	30/30	$30/8 \cdot 10^{10}$
HERA (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	$1.3/1.6 \cdot 10^{10}$

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



Champ électrique statique

ACCELERATEUR électrostatique



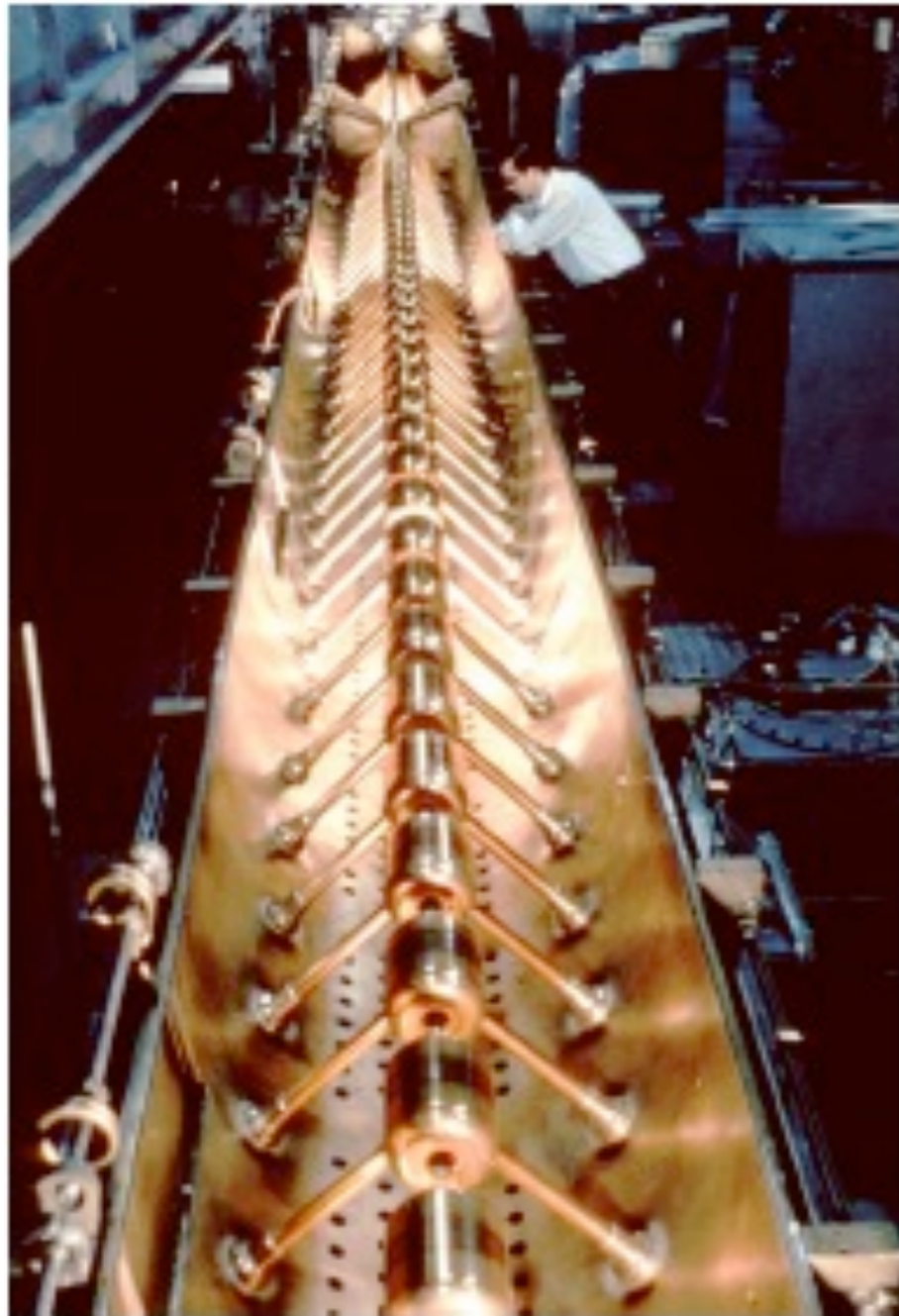
Van der Graaff -1930

→1.2 MeV

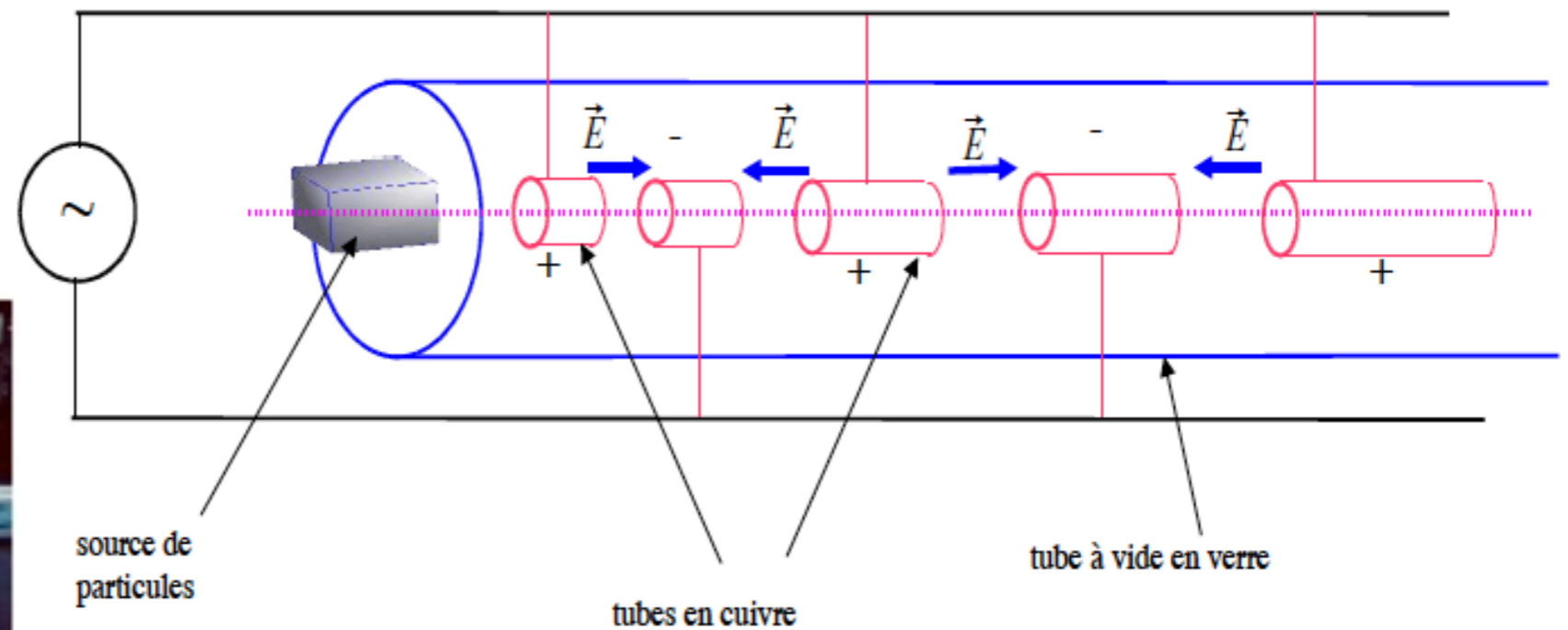
Figure 1 Schéma d'un accélérateur Van De Graaf.

Encore utilisé près des sources d'ions

Accélérateurs linéaires radio fréquence



tension HF



LINAC de R. Wideröe-1928

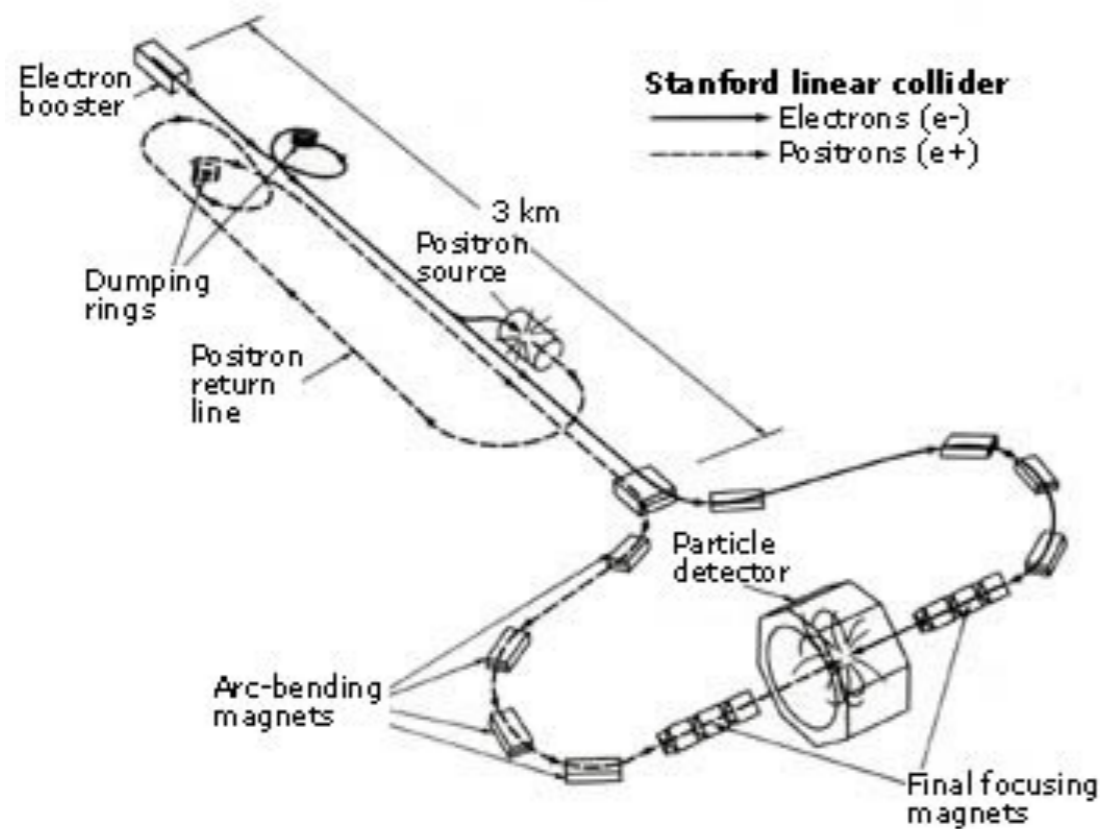
$$V(t) = V_0(\sin \omega t + \phi) \quad V_0 \sim \text{quelques kV}$$

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

ΔV est la différence de potentiel moyen entre deux éléments

Linac d'Alvarez

Accélérateurs linéaires d'électrons



SLC: Stanford Linear Accelerator (SLAC)

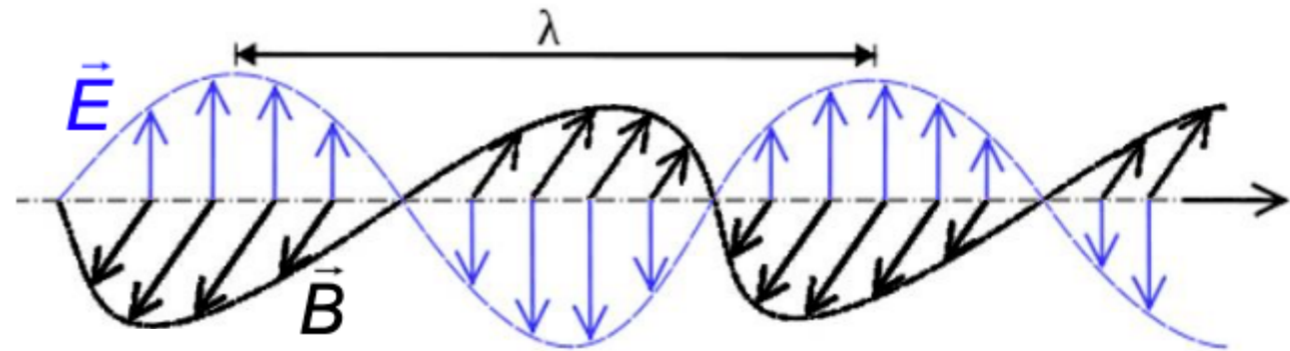
3 km - 80 000 cavités accélératrices

$E_e = 50 \text{ GeV}$

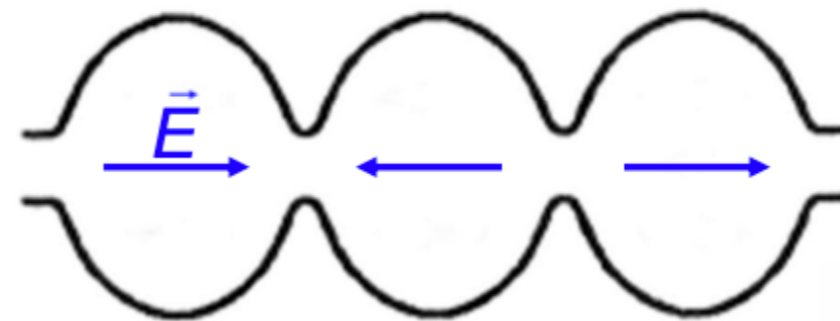
1966-2000

Cavité accélératrices radio fréquences (RF)

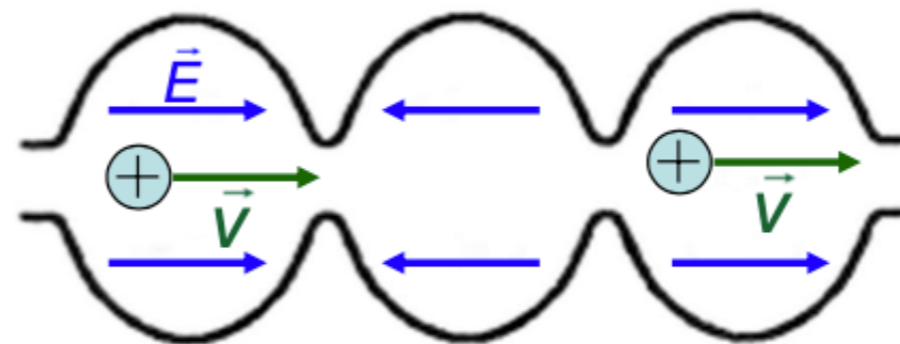
1) on crée un champ E variable en appliquant une ΔV variable
 \Rightarrow champ B variable



2) on la piège dans une cavité conductrice résonnante



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

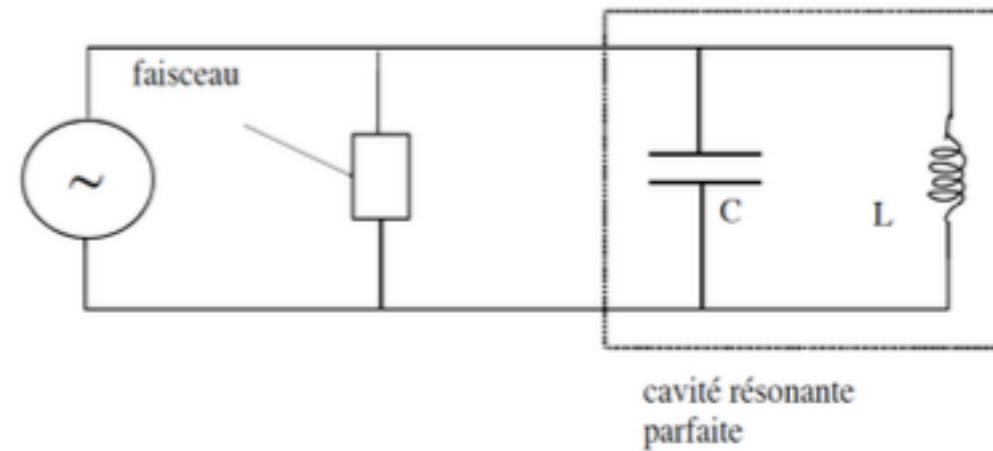
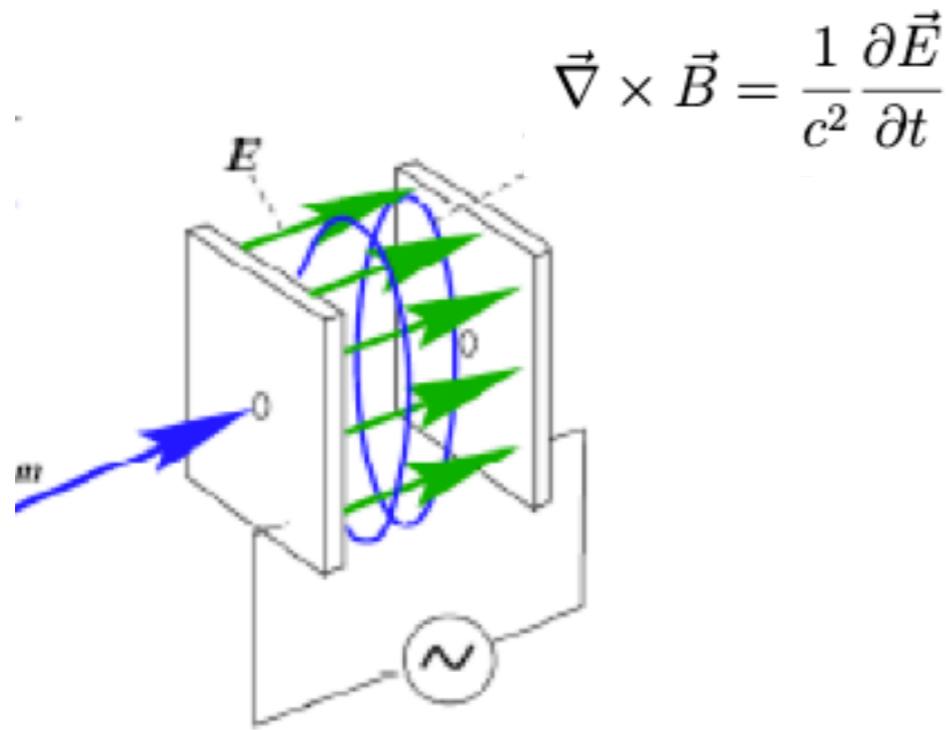


4) on y injecte des particules

\Rightarrow accélération et mise en paquets

plusieurs cavités mises bout à bout = guide d'ondes

Cavité accélératrices RF résonnante



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

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

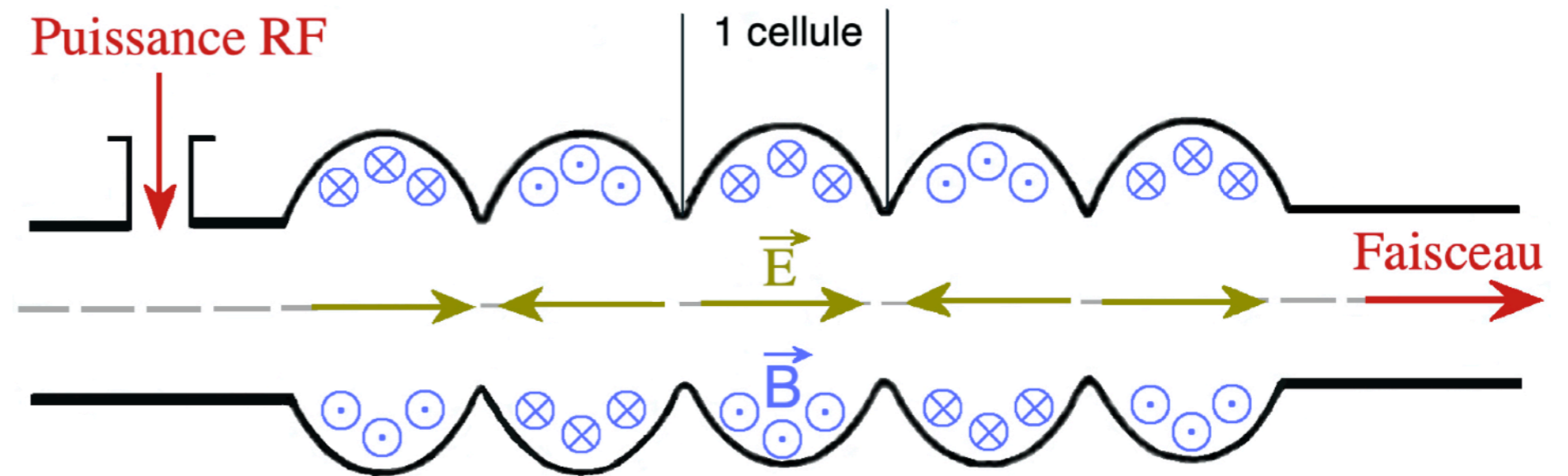
on adapte la structure de façon à minimiser l'impédance et donc à maximiser le transfert d'énergie vers le faisceau (équivalent de la résistance)

- au LHC : 400 MHz

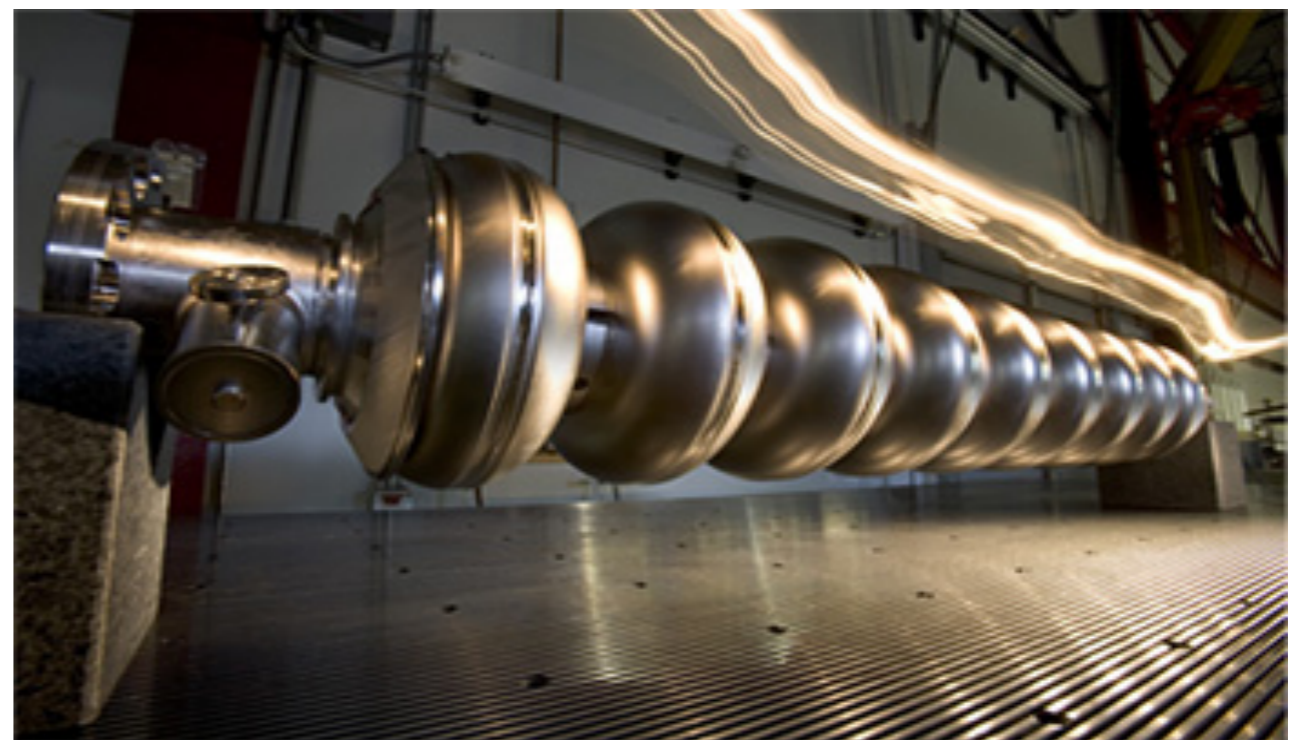
$$\omega_0 = h f_{rev} \quad f_{rev} = \frac{\beta c}{2\pi R} = \frac{c}{26659[m]} = 1.1246 \cdot 10^4 \text{ Hz} \Rightarrow h = 35640$$

nombre harmonique

Cavité accélératrices radio fréquences



Cavité résonnante du LEP



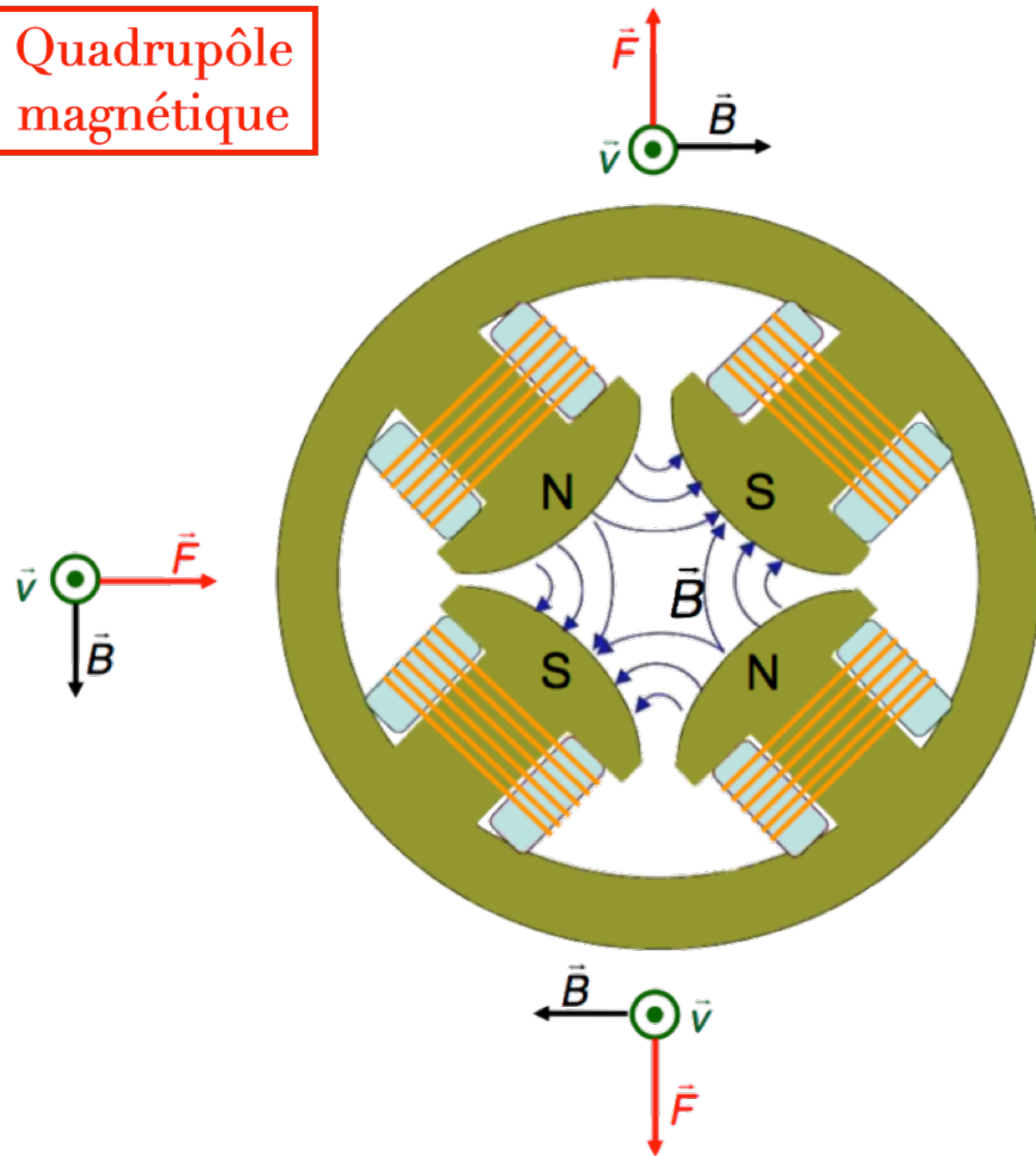
Cavités supraconductrices
(en niobium) du LHC

La focalisation : aimants quadripolaires

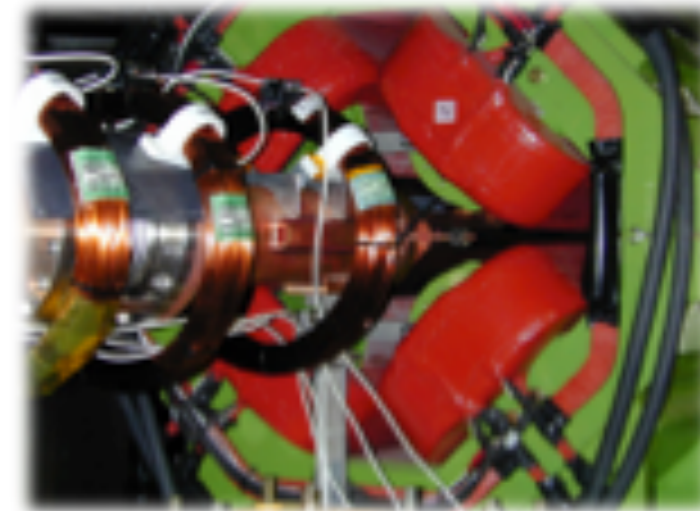
quadropole électrique ou magnétique ?

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

Quadrupôle
magnétique

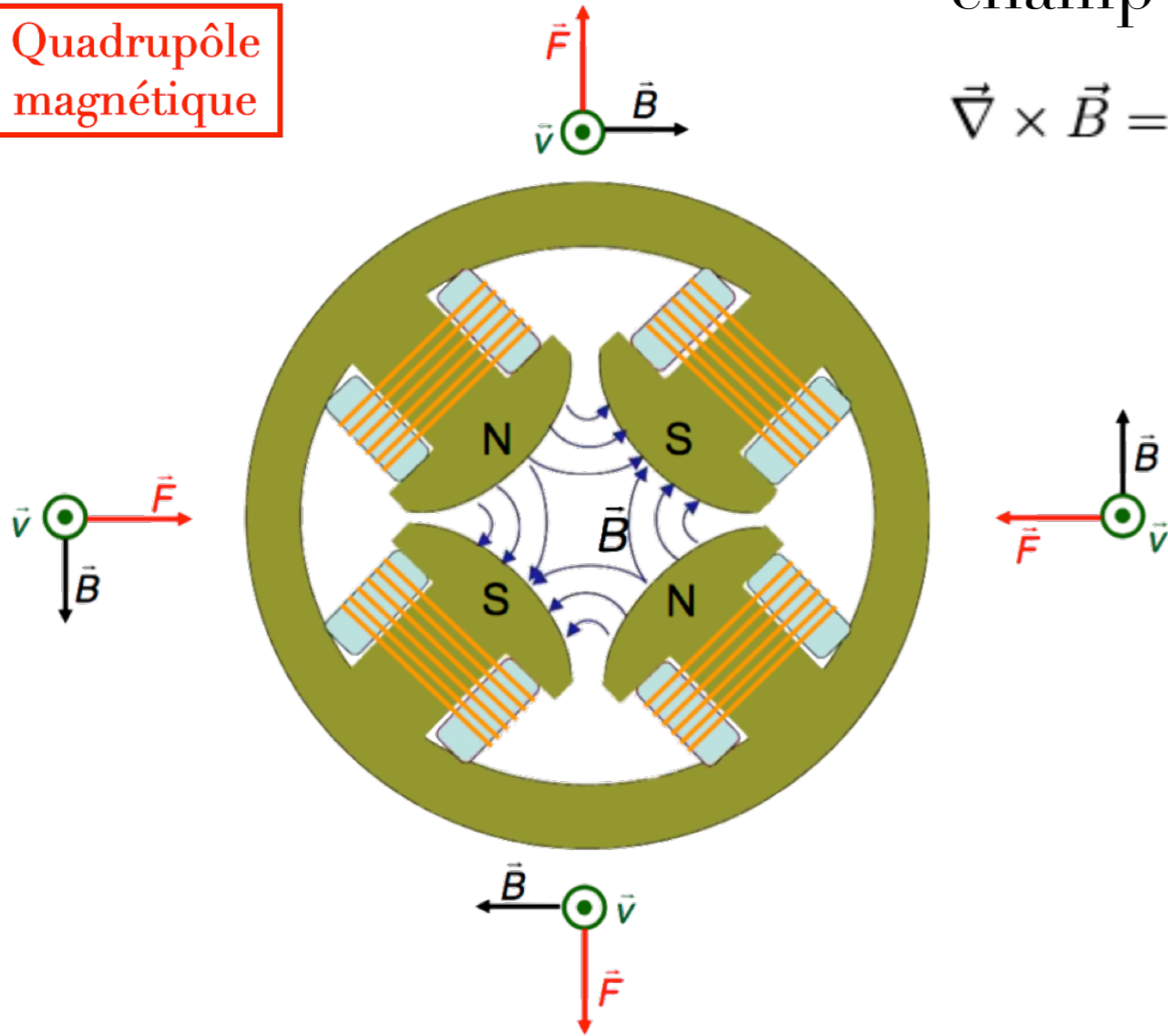


Exemple de quadrupôle
Focalisant en horizontal
Défocalisation en vertical



La focalisation : aimants quadripolaires

Quadrupôle
magnétique



champ linéaire en la distance

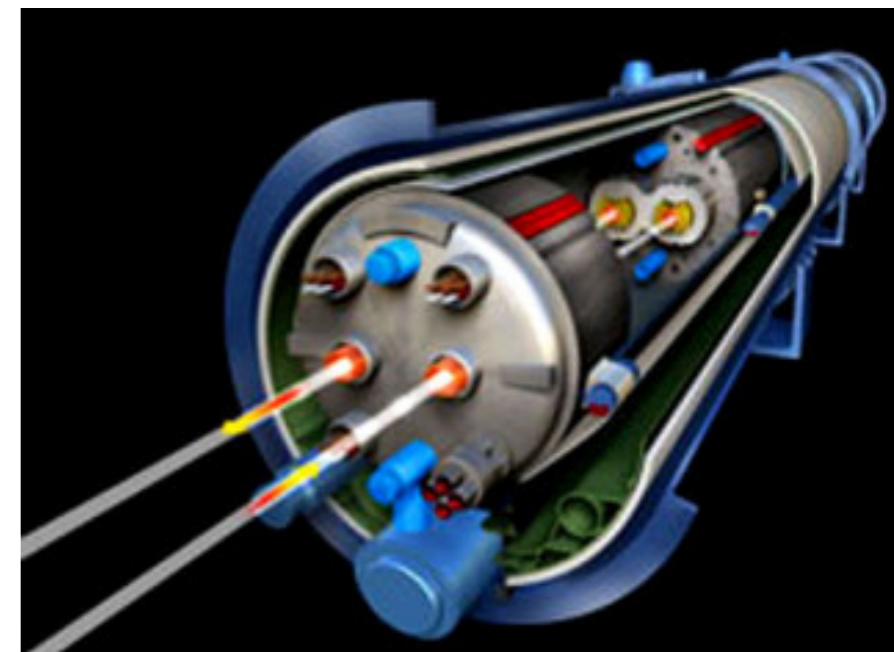
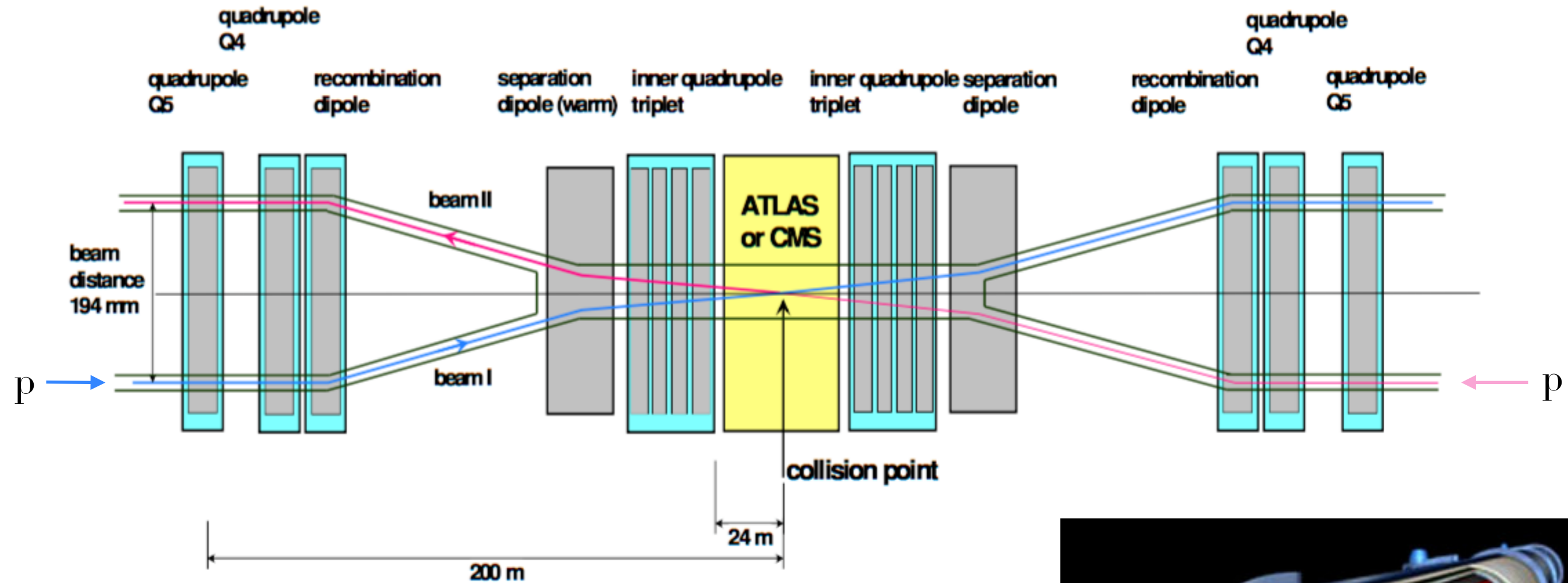
$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{B} &= 0 & \Rightarrow & \frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial y} = cte = K \\ & & \Rightarrow & B_x = K y, \quad B_y = K x, \\ & & \Rightarrow & F_x = -qvB_y, \quad F_y = qvB_x. \end{aligned}$$

effet globalement focalisant : succession de quadripôles

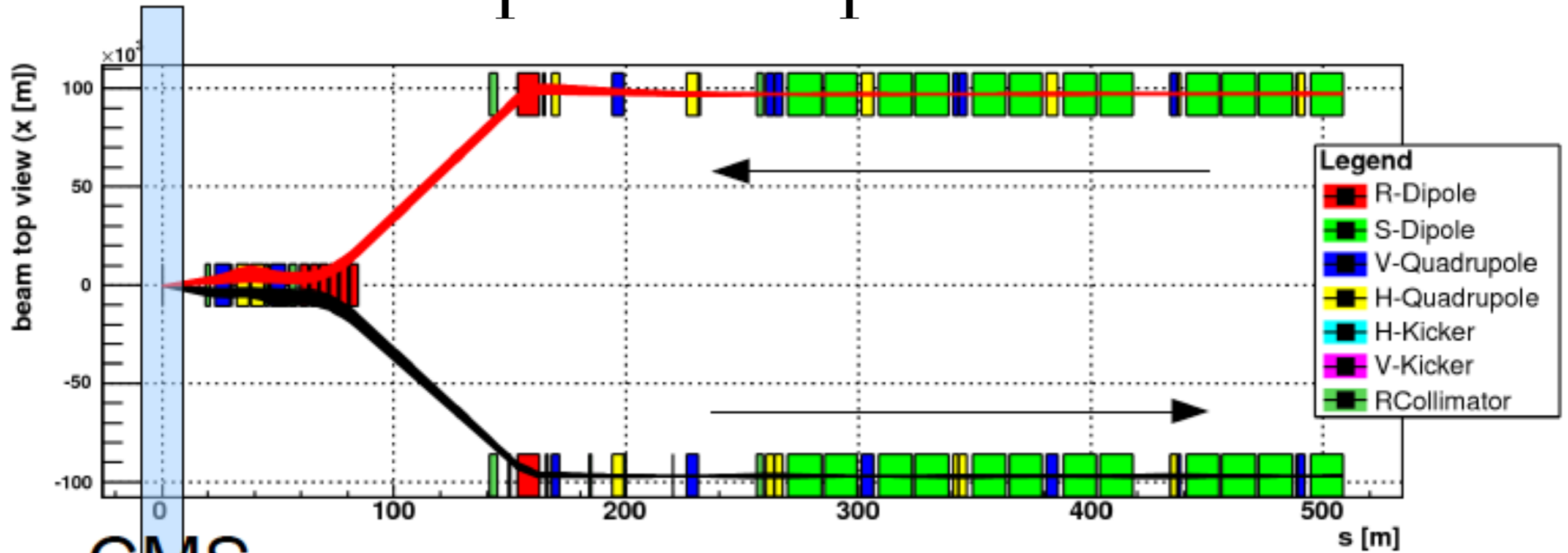
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

si on choisit : $f_1 = -f_2 \Rightarrow f > 0$

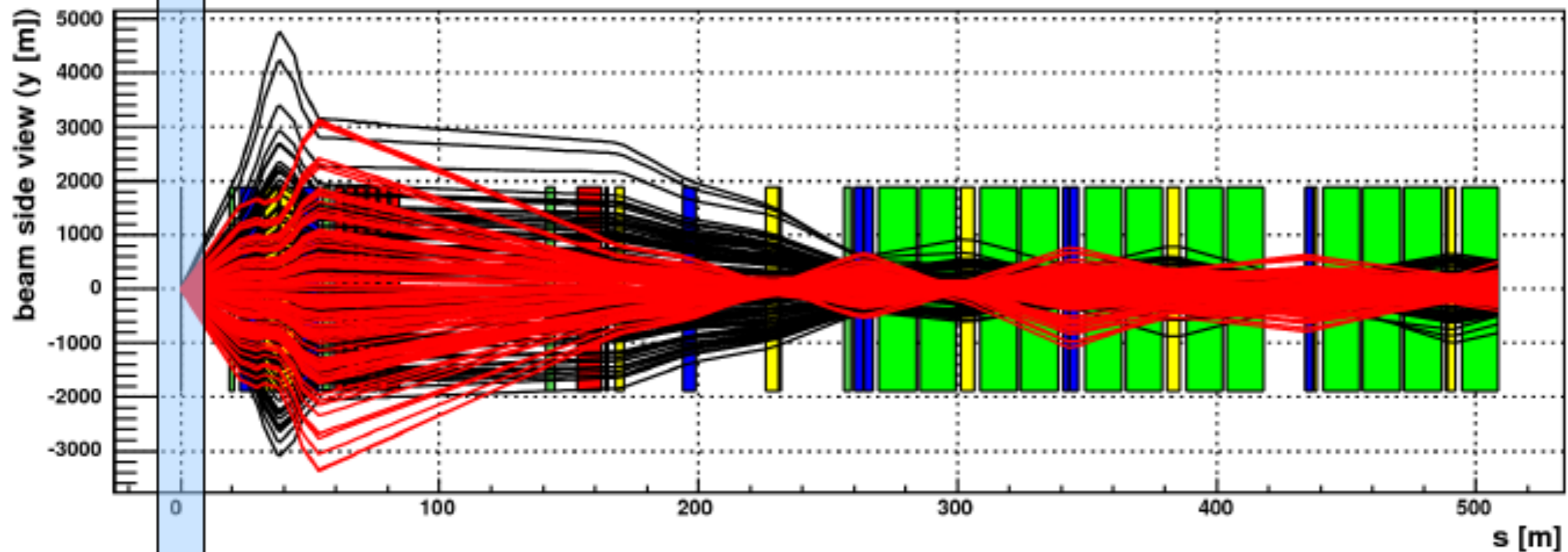
Exemple: LHC près de CMS



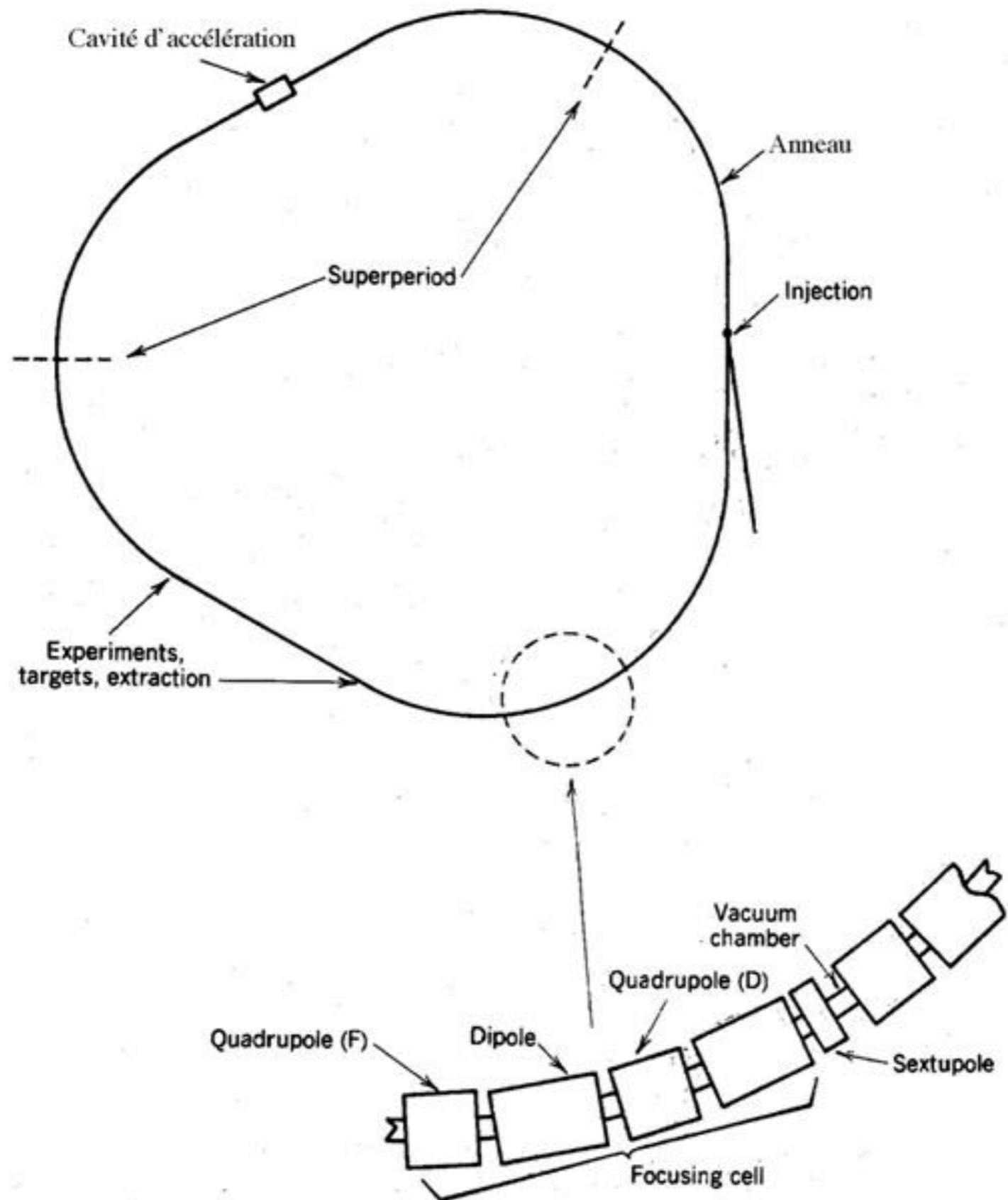
Exemple: LHC près de CMS



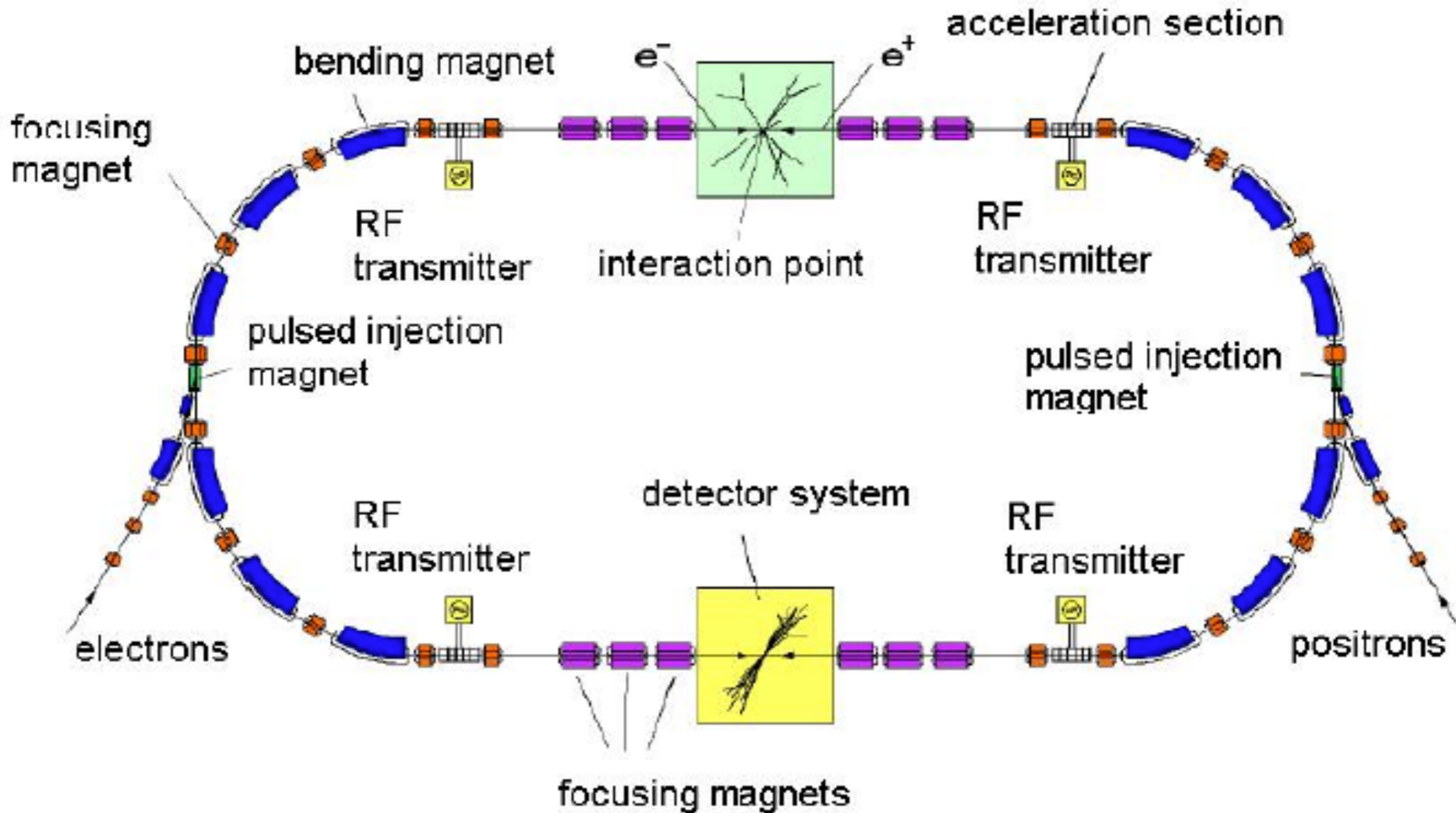
CMS



Les accélérateurs circulaires



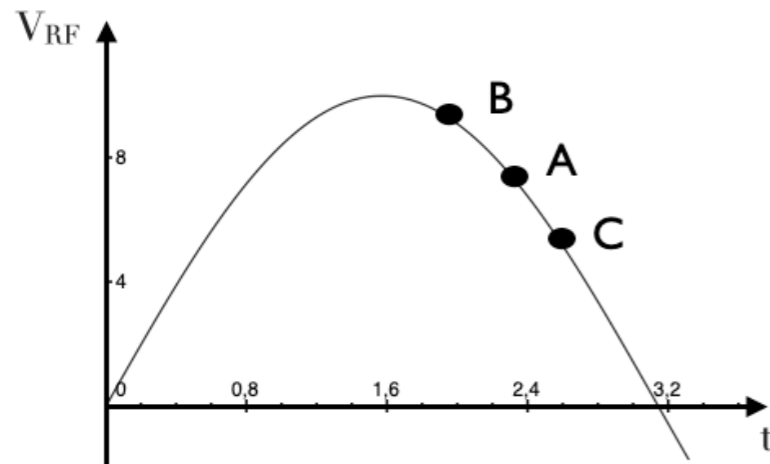
Accélérateurs circulaires: synchrotron



Synchrotron :

- B croissant avec le temps pour maintenir l'orbite lorsque son énergie augmente ;
- une fréquence d'accélération croissant la vitesse de la particule ;
- une injection de particules à une certaine énergie, (B rémanent sur l'orbite à l'injection).

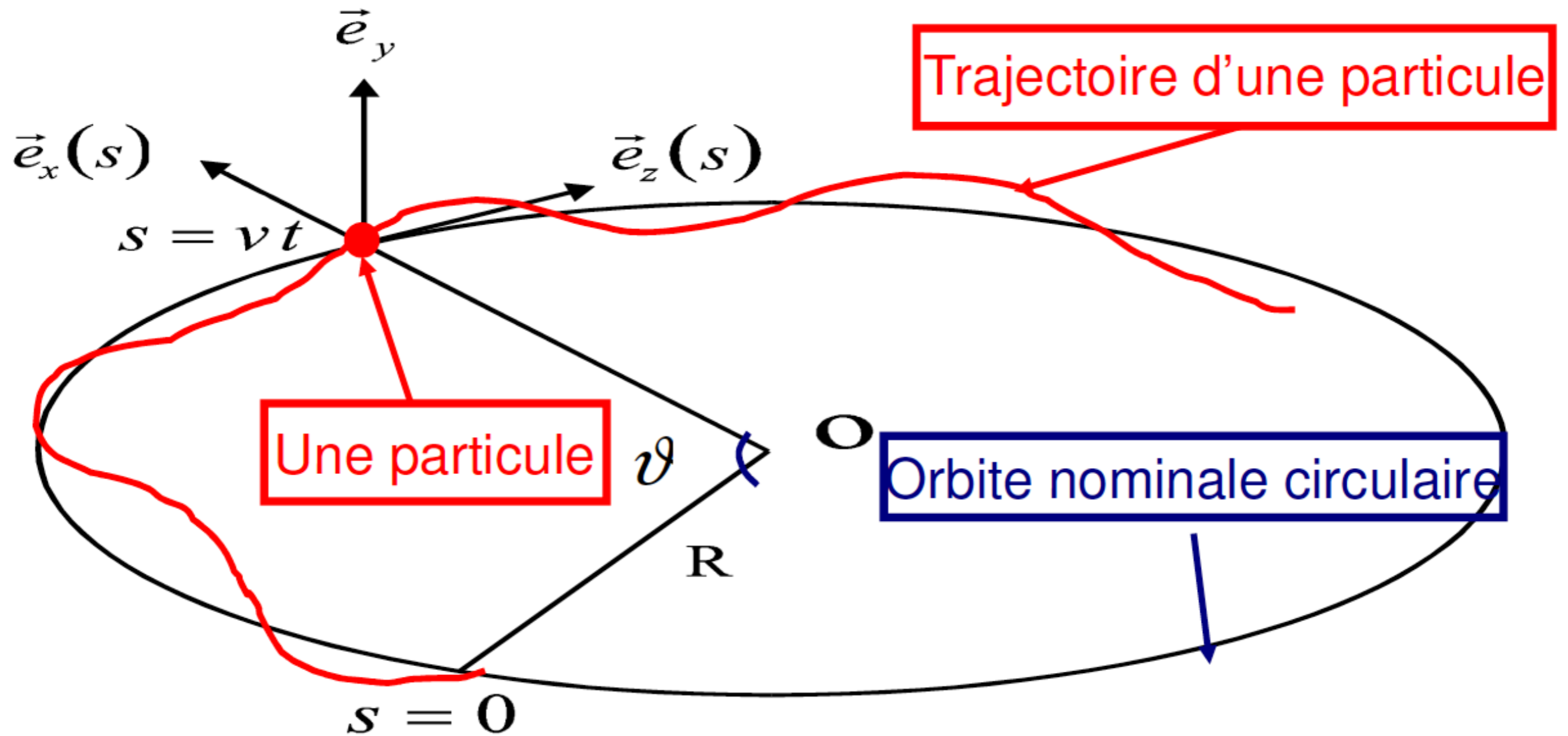
Synchronisation



- 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

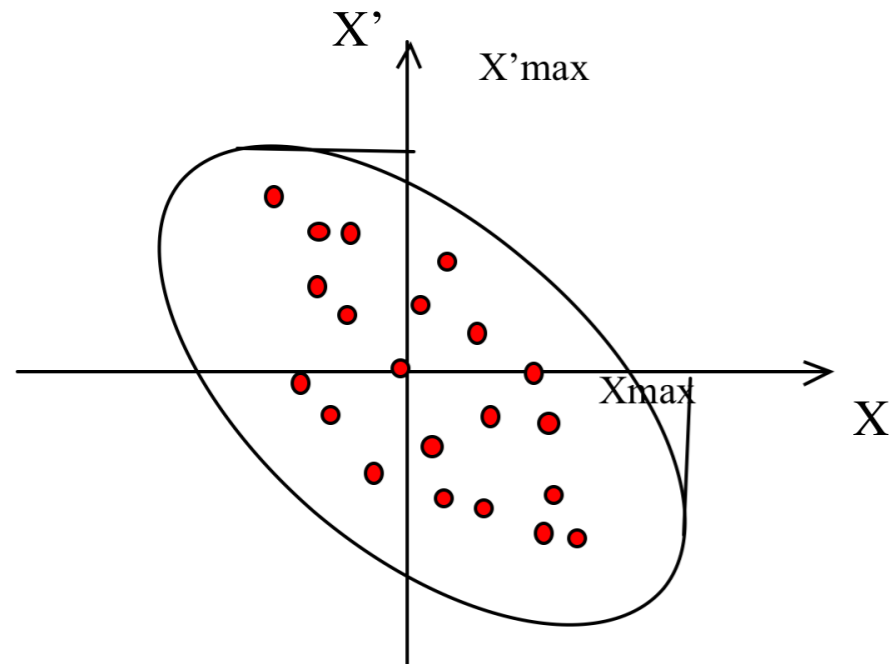
Trajectoires des particules



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

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

Emittance d'un faisceau

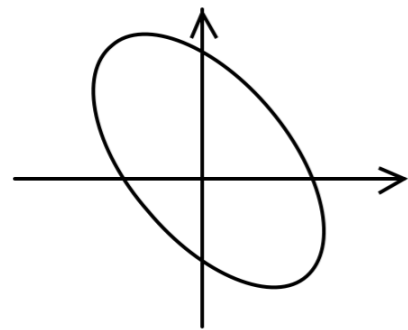


$\epsilon = A/\pi$, où A est l'aire de l'ellipse.

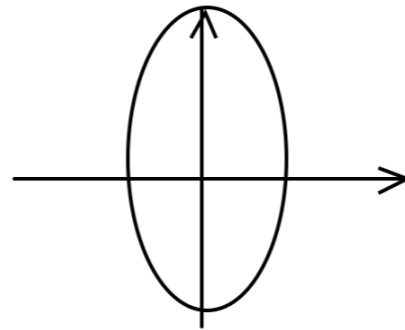
α, β, γ et ϵ telles que : $x_{max} = \sqrt{\beta \epsilon}$

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

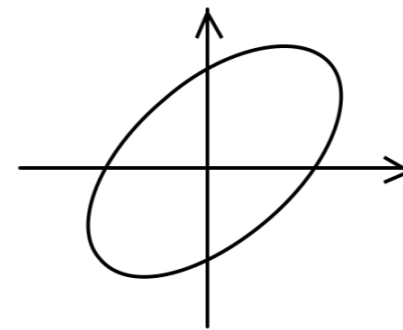
$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$



$\alpha > 0$ (convergent)



$\alpha = 0$ (waist ou col)



$\alpha < 0$ (divergent)

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

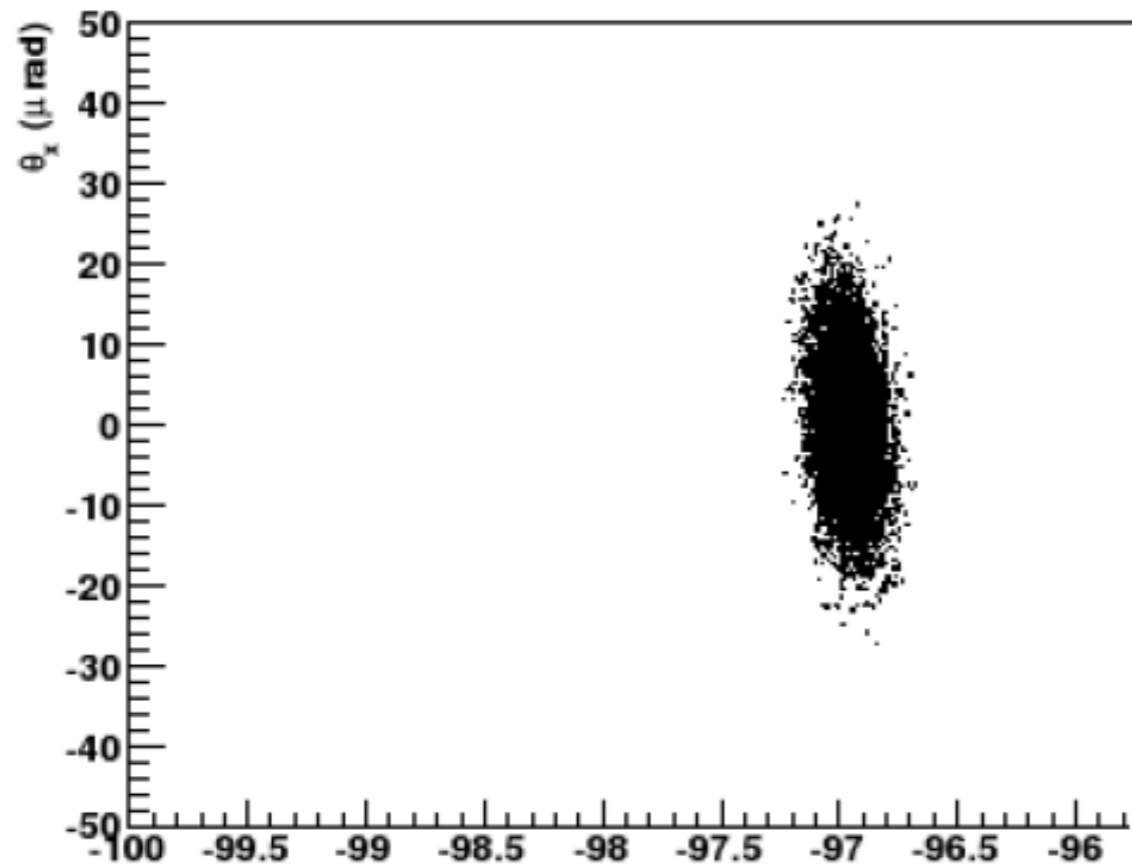
taille du faisceau

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

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

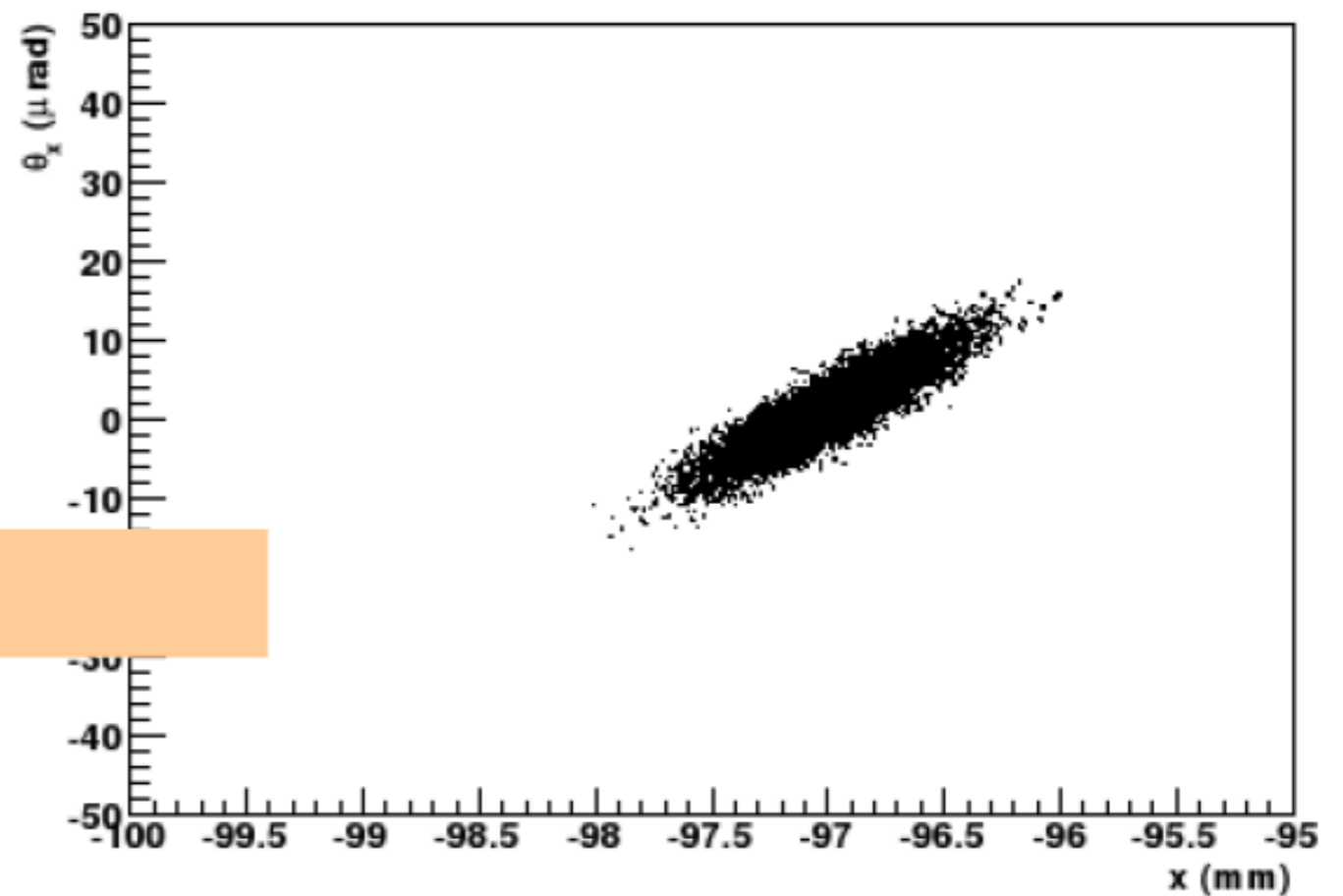
si $\beta_x^* \gg \sigma_x$ et $\beta_y^* \gg \sigma_y$:

Beam 1 profile at 220m



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

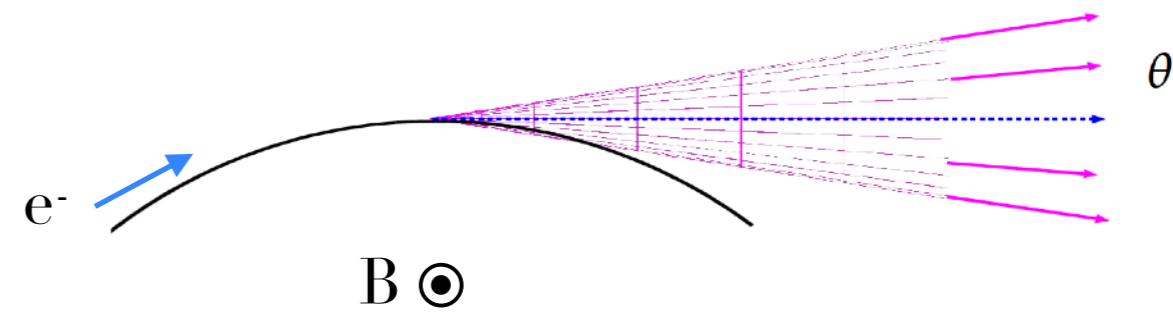
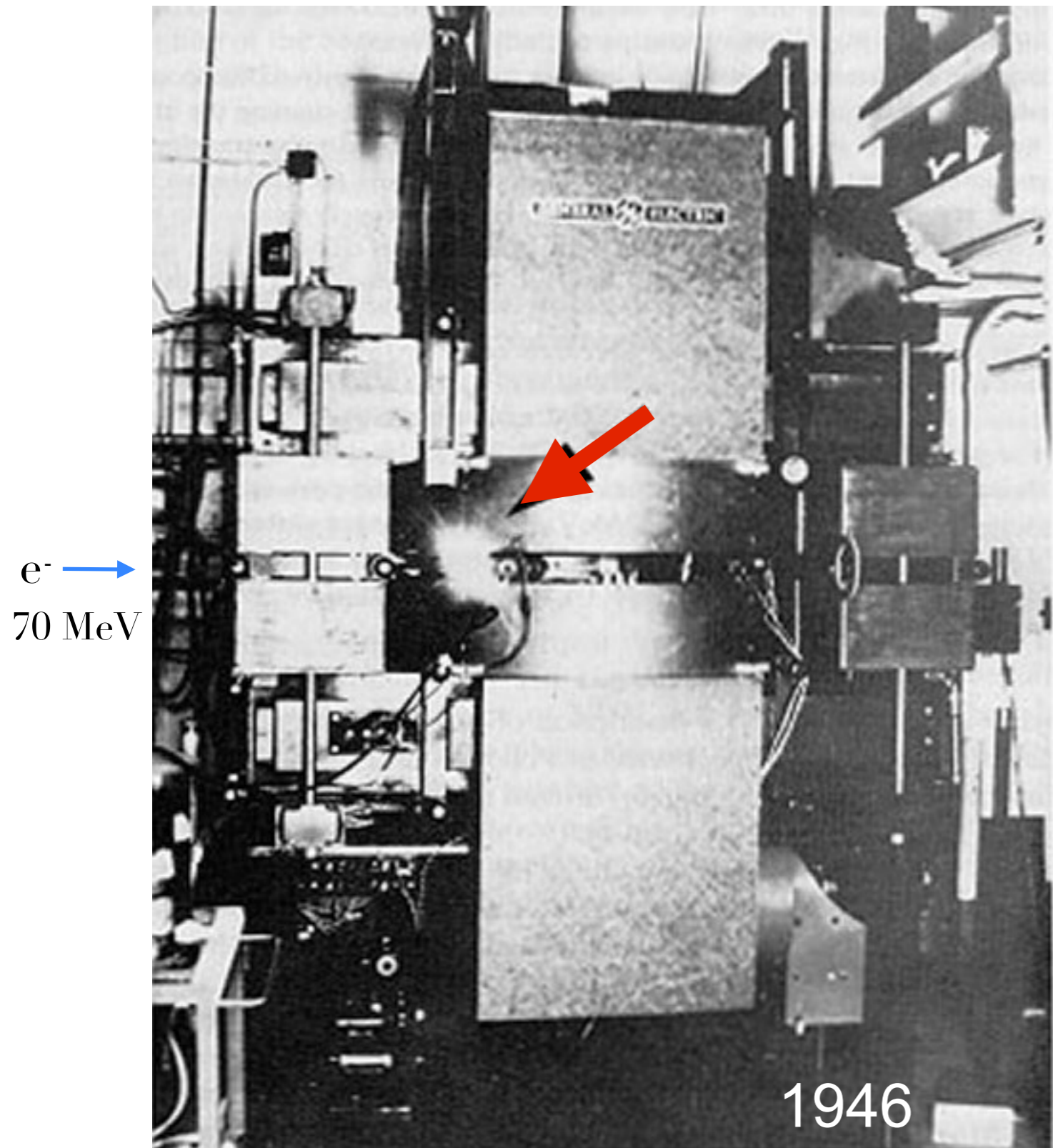
Beam 1 profile at 420m



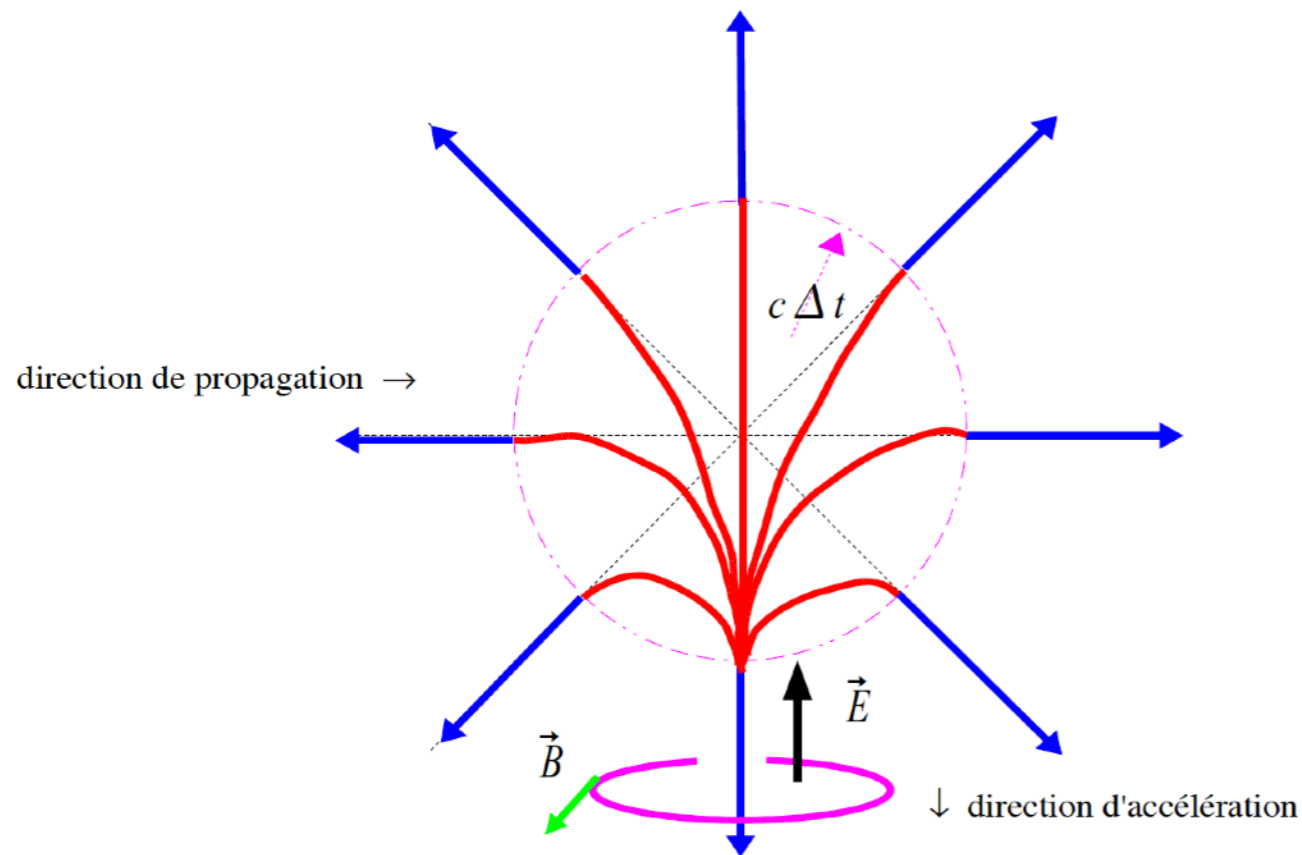
L'émittance du faisceau reste constante

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 :

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

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

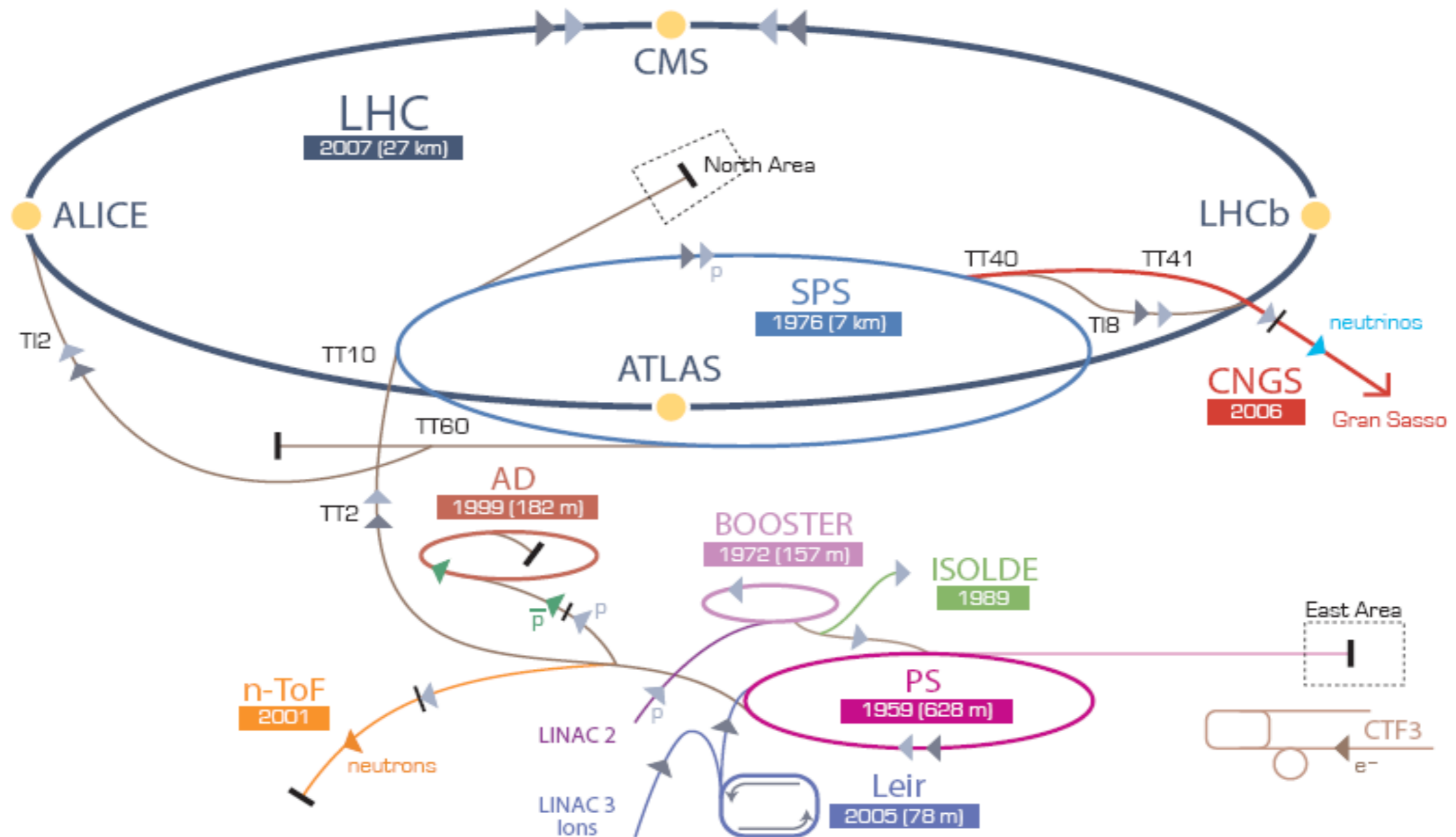
perte d'E par tour :

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

	$E[\text{GeV}]$	$R[\text{m}]$	$I[\text{mA}]$	$B[\text{T}]$	$\Delta E[\text{GeV}/\text{tour}]$	$\mathcal{P}[\text{MW}]$	
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

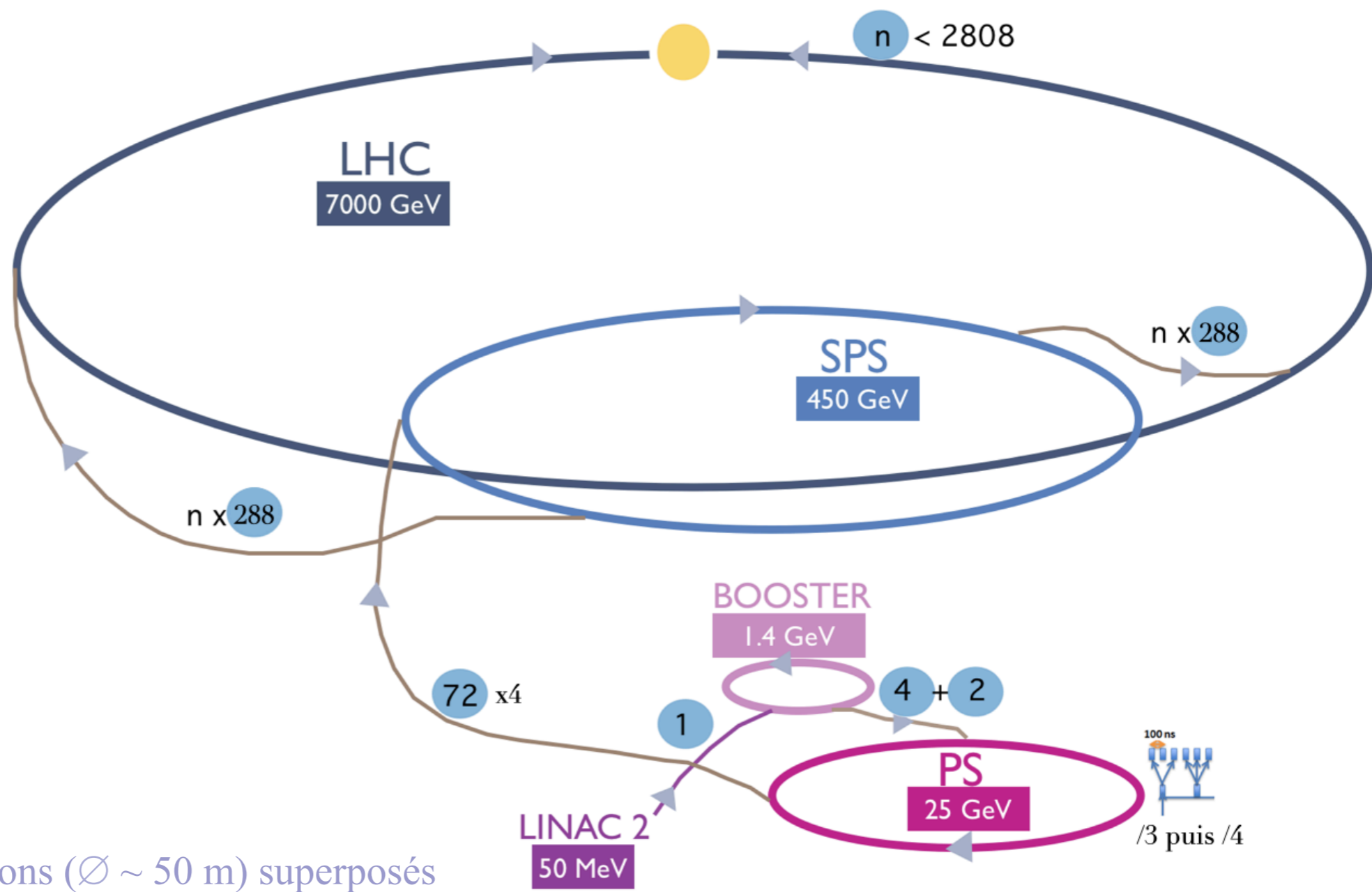


▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ▶ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

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



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

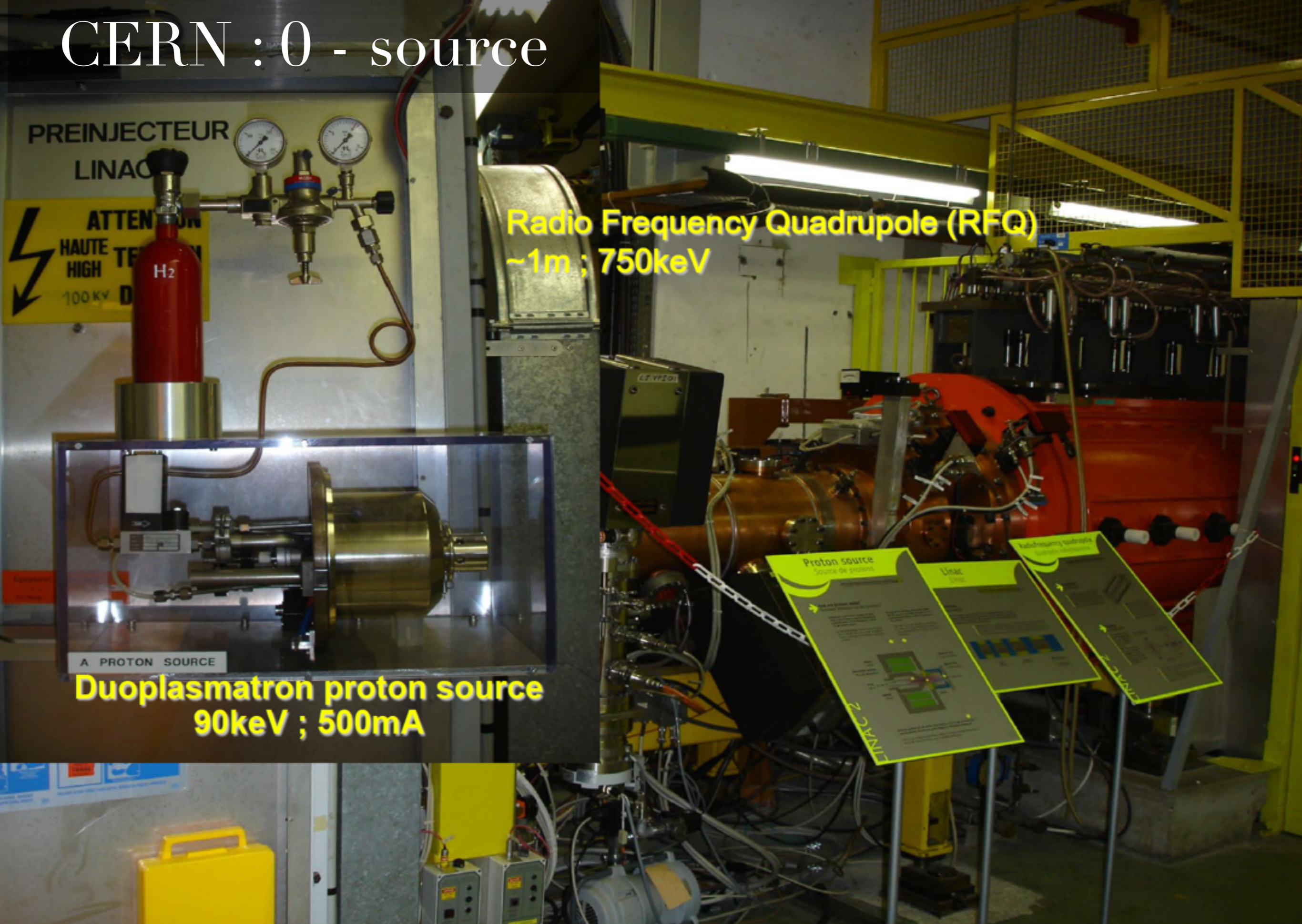
2. BOOSTER : 4 Synchrotrons ($\varnothing \sim 50 \text{ m}$) superposés
 accumuler p et accélérer $\rightarrow 1.4 \text{ GeV}$

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



PREINJECTEUR
LINAC

ATTENTION
HAUTE TENSION
HIGH TENSION
100 kV

H₂

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

A PROTON SOURCE

Duoplasmatron proton source
90keV ; 500mA

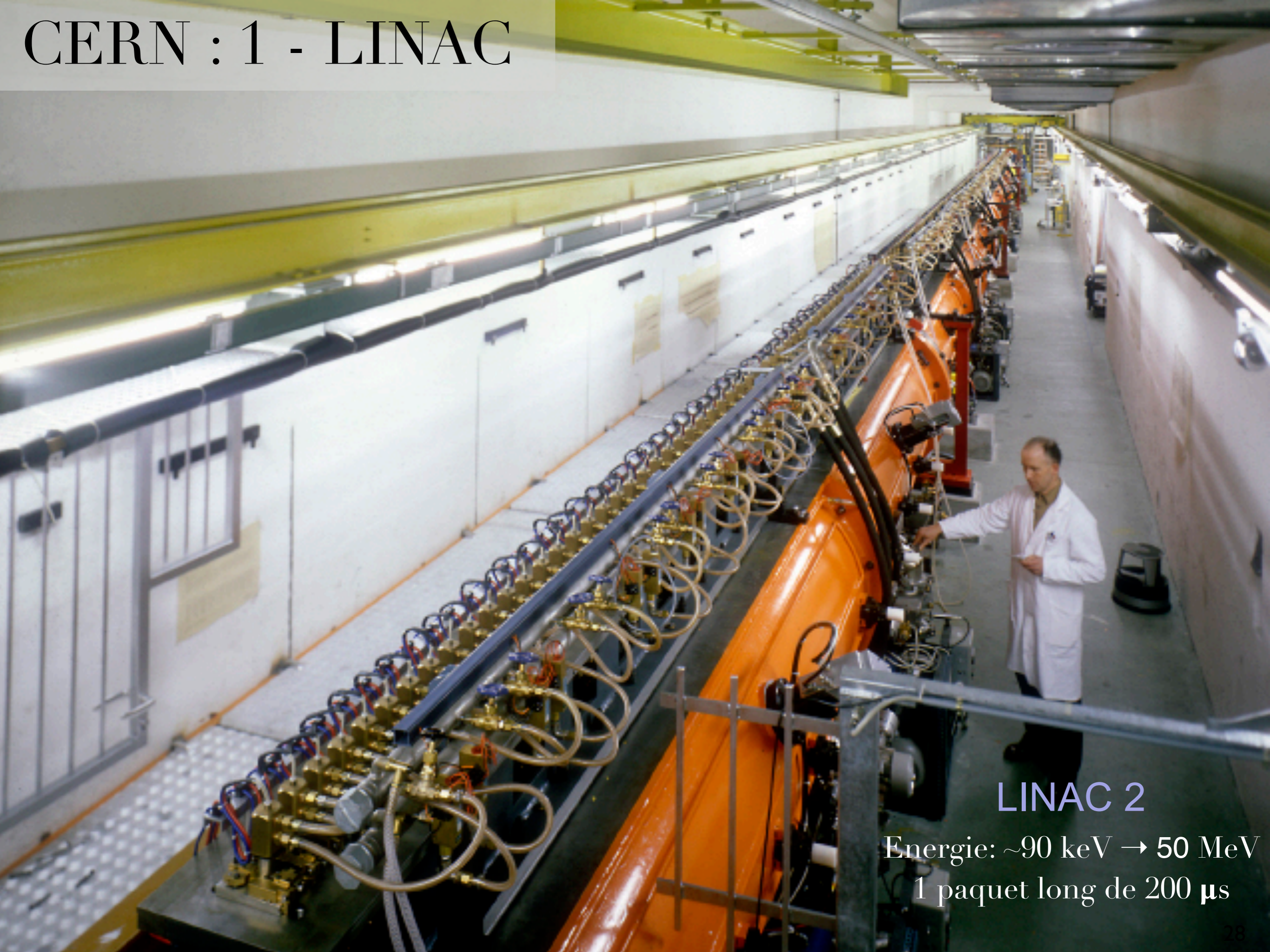
Proton source
Source de protons

Linac

Radiofréquence quadrupole

LINAC 2

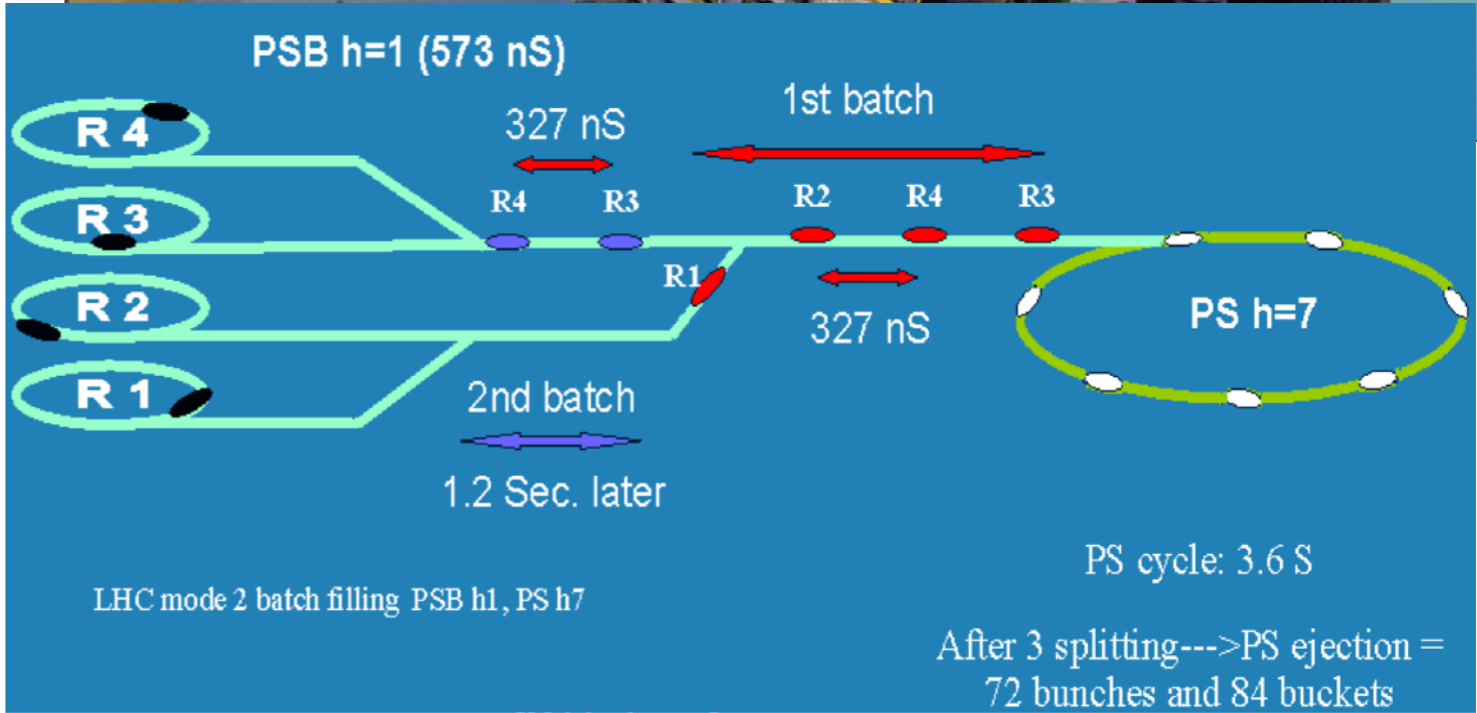
CERN : 1 - LINAC



LINAC 2

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

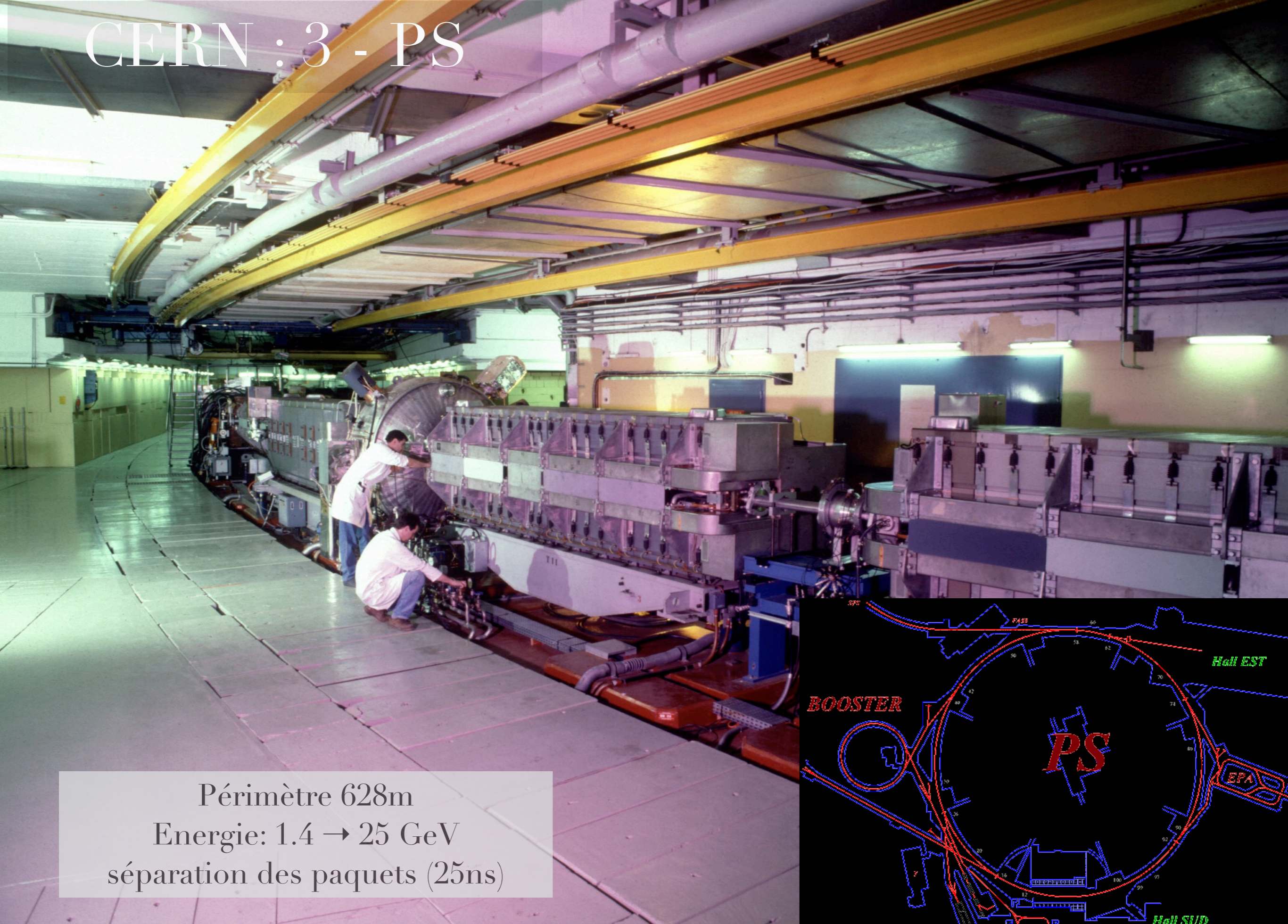
CERN : 2 - Booster PSB



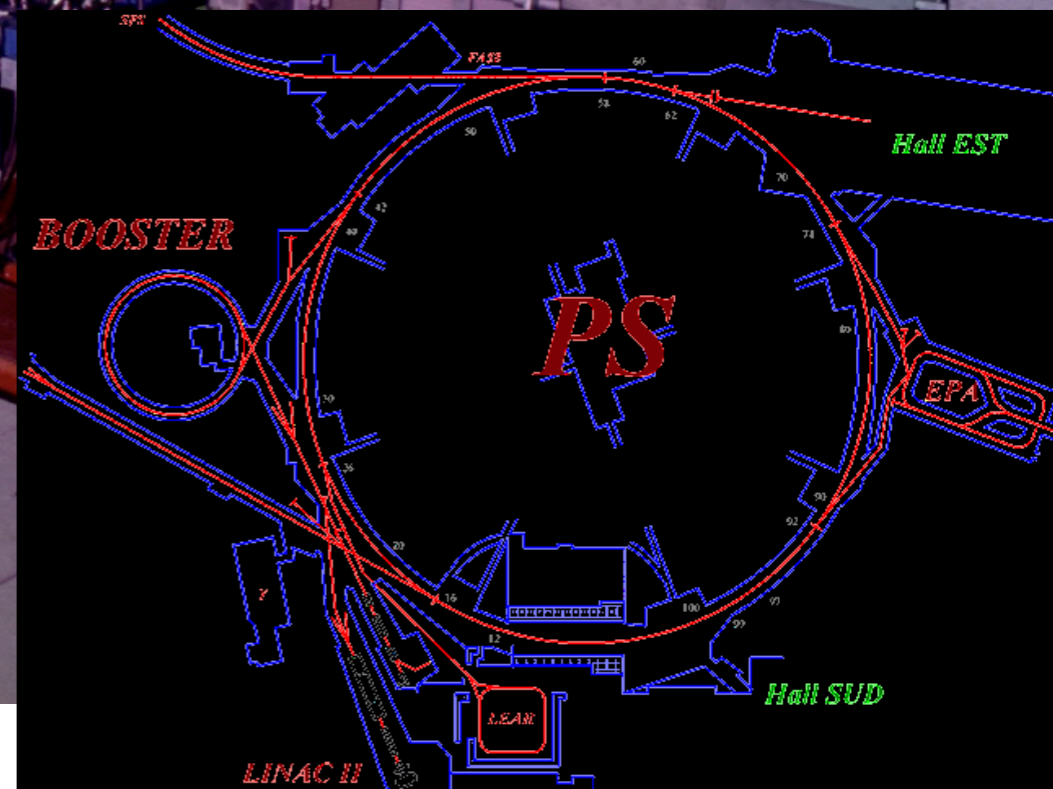
Energie: 0.05 → 1.4 GeV

4+2 paquets

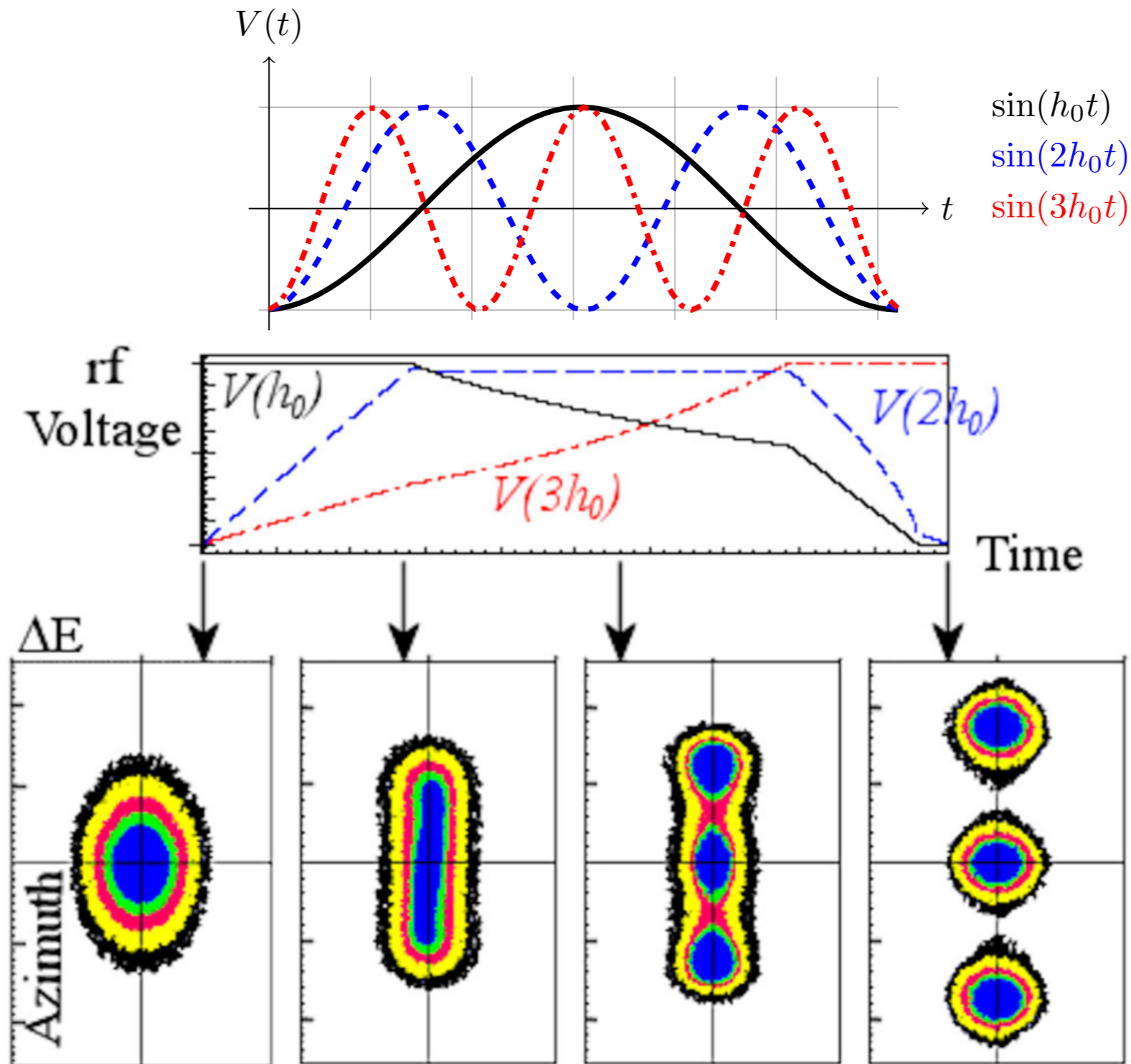
CERN : 3 - PS



Périmètre 628m
Energie: 1.4 → 25 GeV
séparation des paquets (25ns)

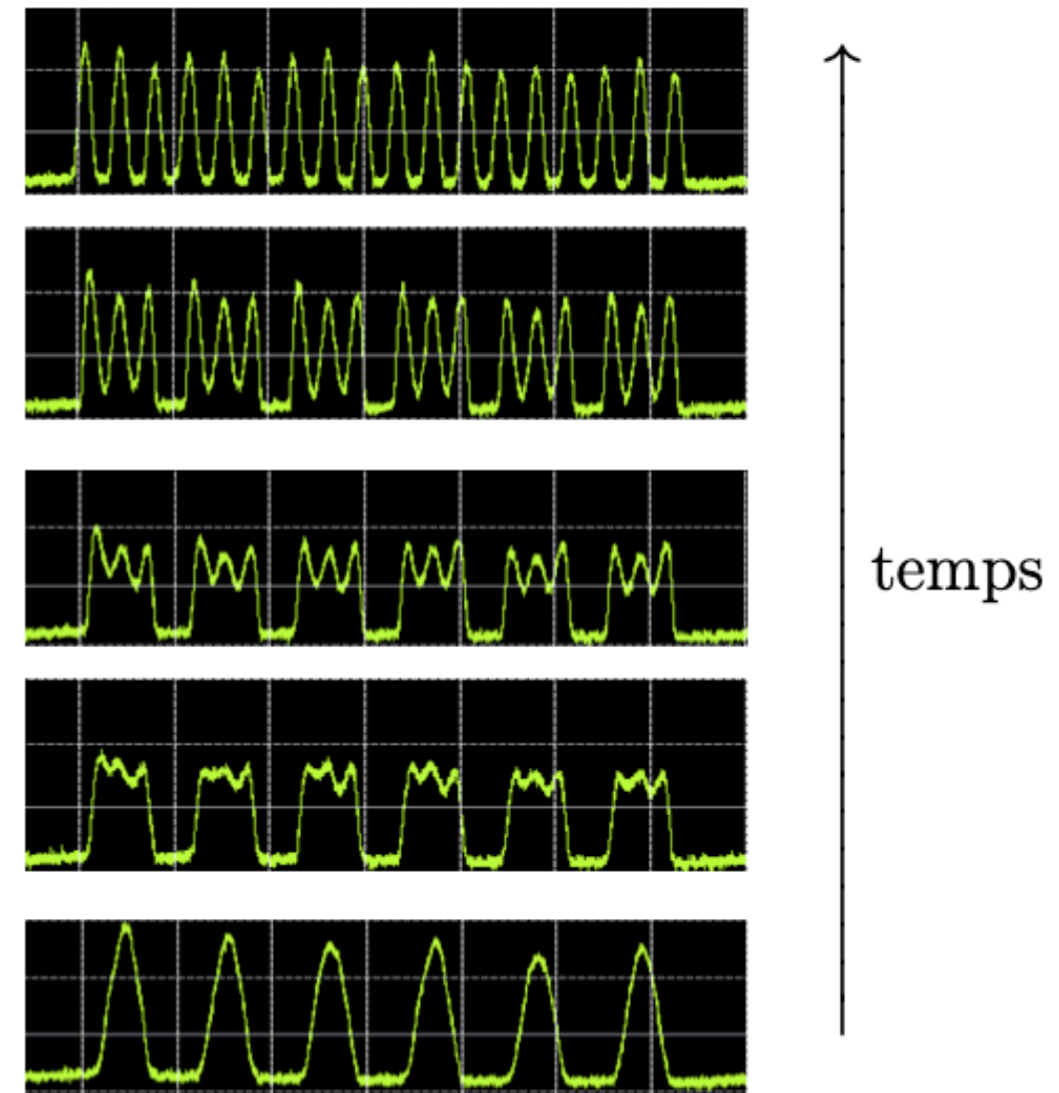
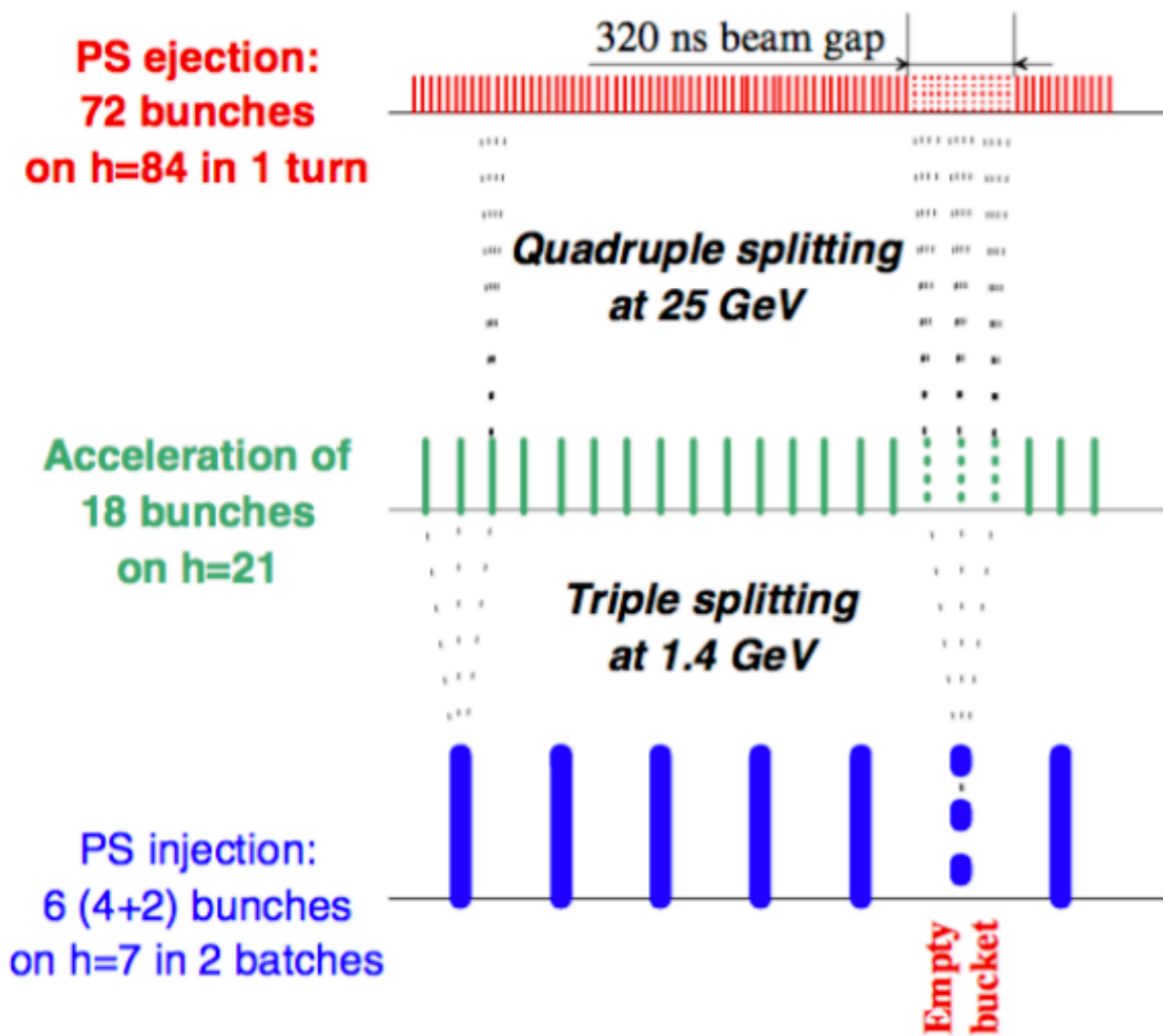


CERN : 3 - PS - séparation des paquets



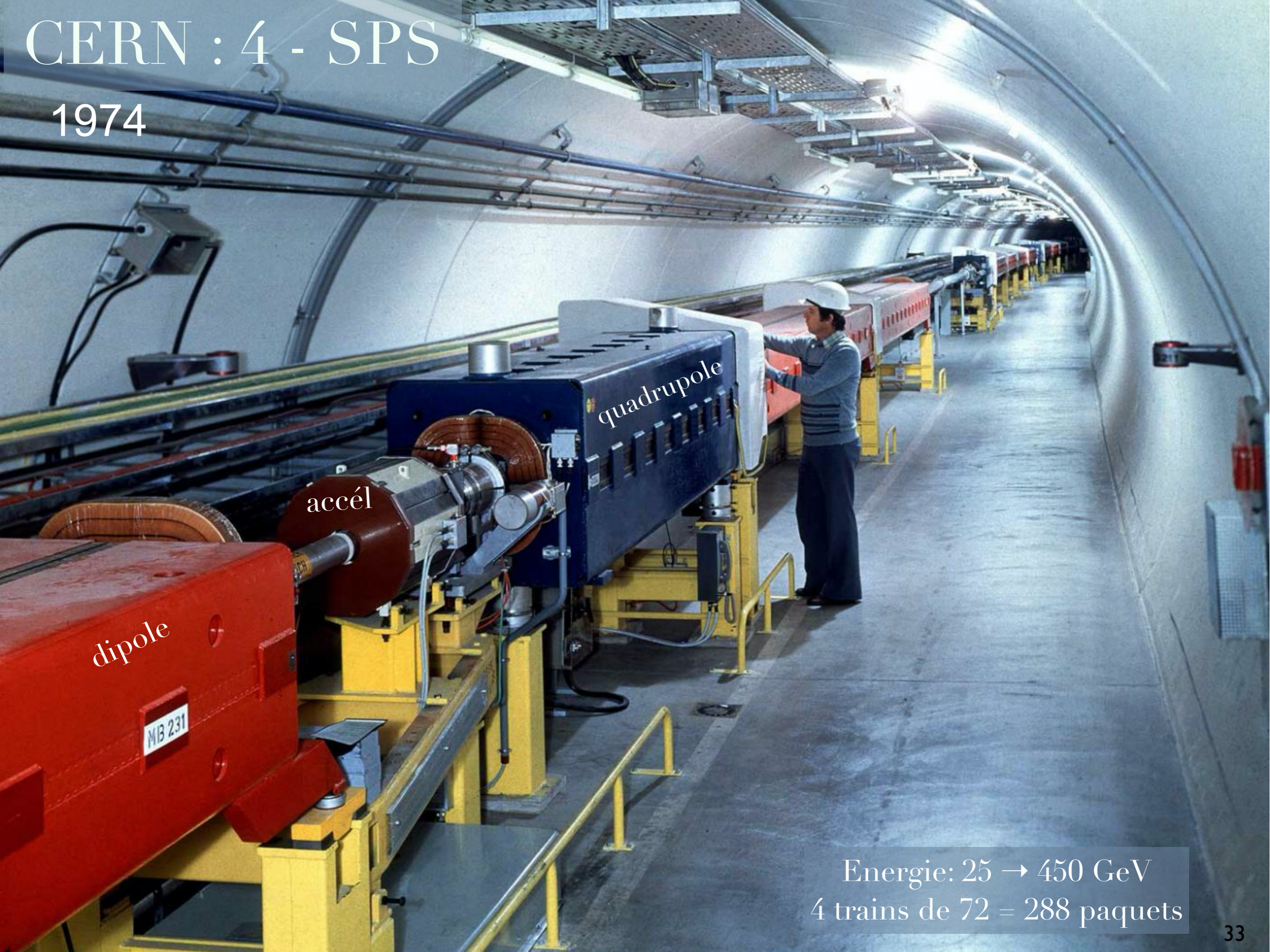
à 1.4 GeV : séparation des (6+1 vide) paquets en 3

CERN : 4 - PS - séparation des paquets



CERN : 4 - SPS

1974



dipole

MB 231

accél

quadrupole

Energie: 25 → 450 GeV
4 trains de 72 = 288 paquets

CERN : 5 - LHC

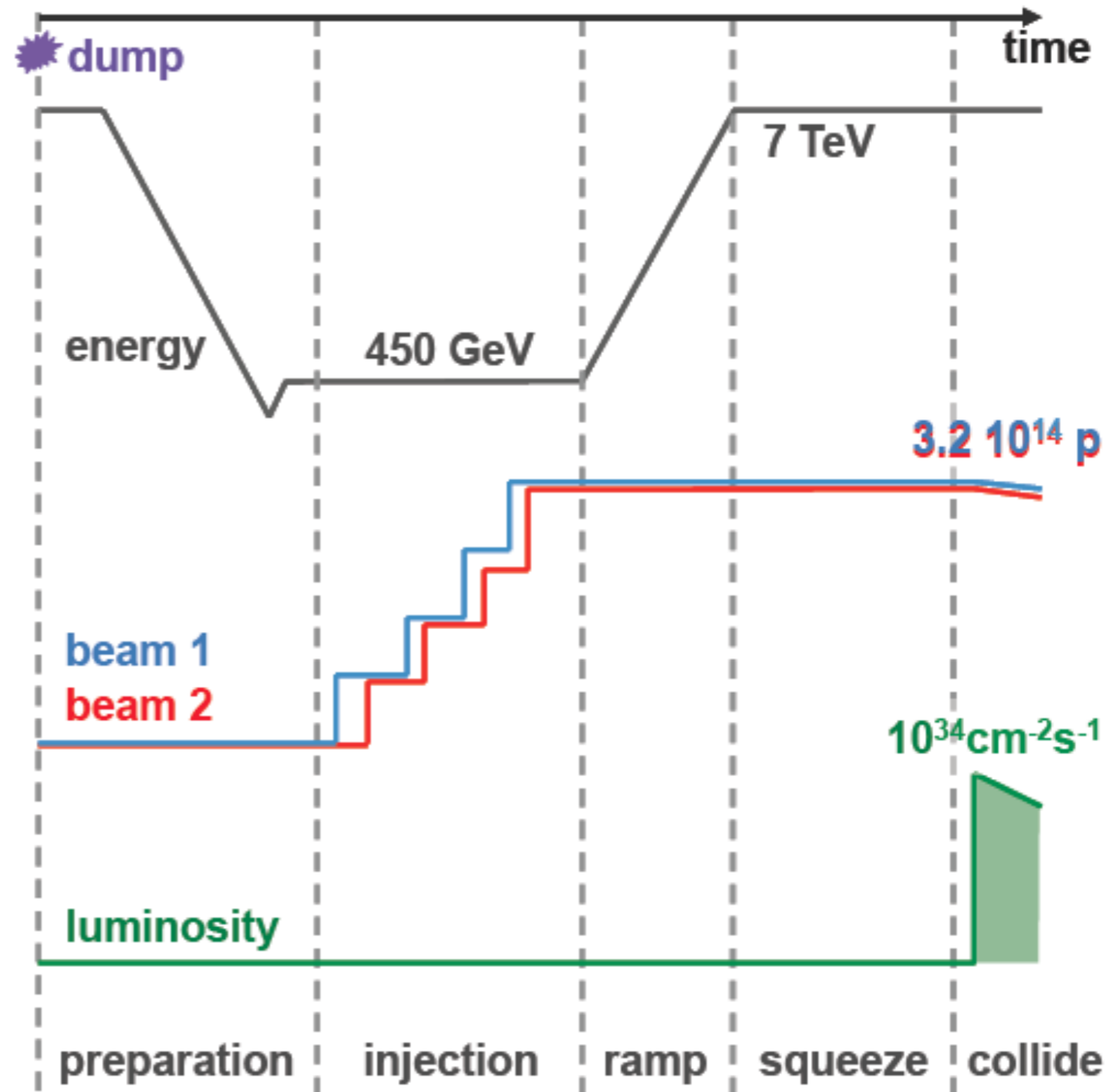


Energie: 450 → 7000 GeV
n x 288 → 2 x 2808 paquets

1232 dipoles - $B_z=8.3$ Tesla

LHC : remplissage et accélération

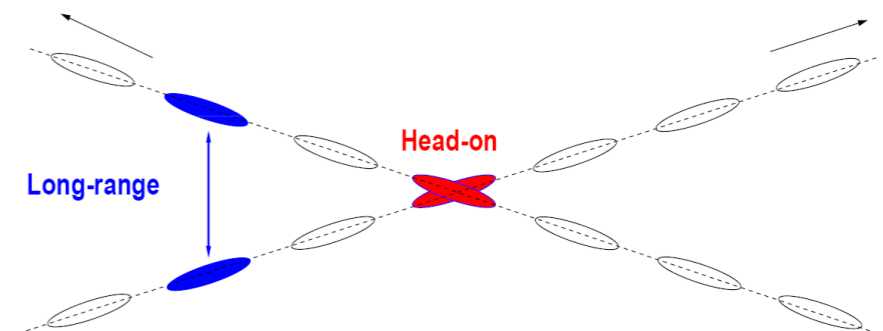
2012	typ. time
prep	>50 min.
inj	~60 min.
ramp	~15 min.
squ.	~20 min.
coll.	0-20 h



LHC : paramètres

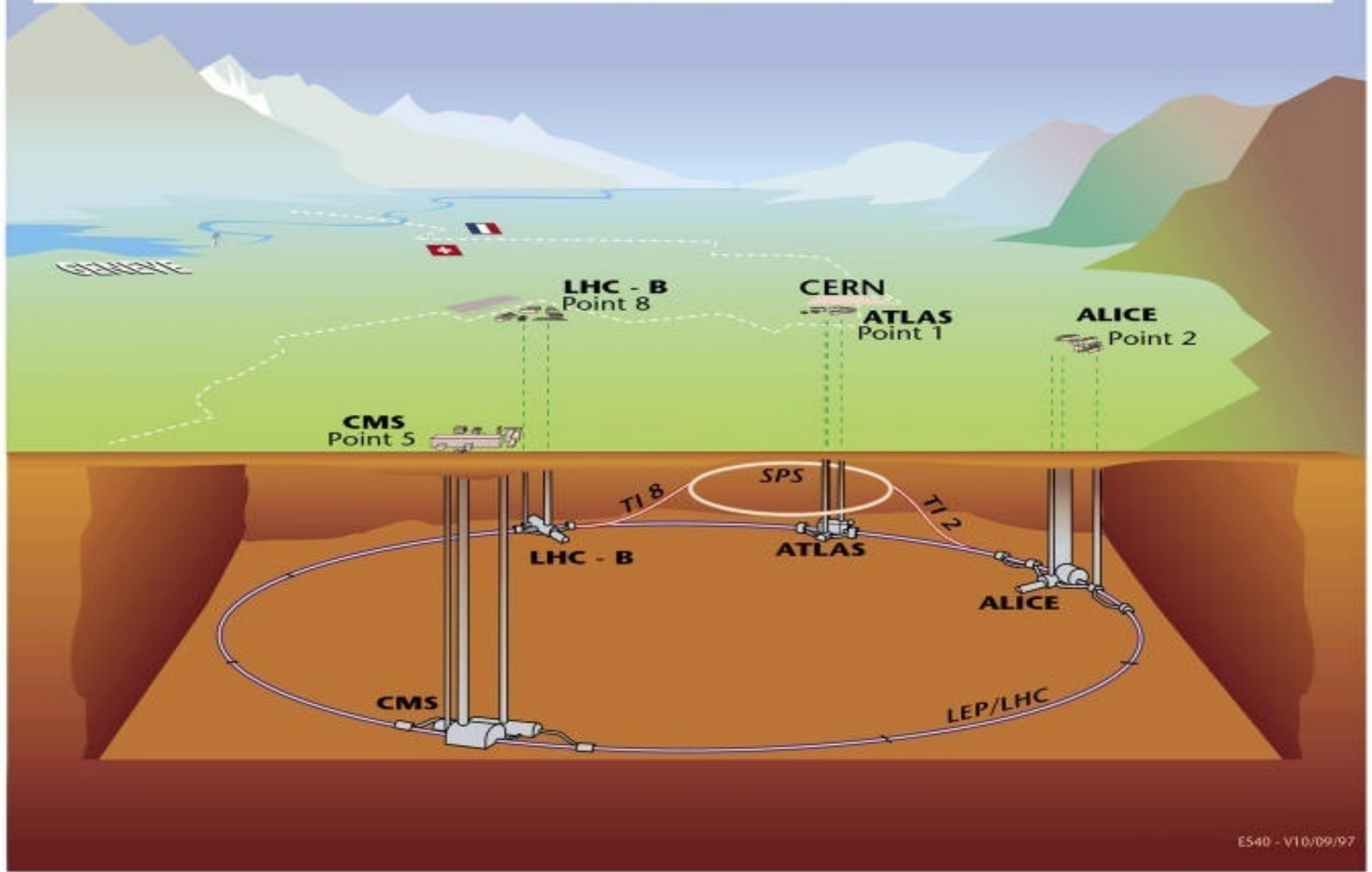
Parameter	Nominal
beam energy [TeV]	7.0
bunch spacing [ns]	25
k [no. bunches]	2808
N_b [10^{11} p/bunch]	1.15
ε [mm mrad]	3.75
β^* [m]	0.55
half crossing angle [μ rad]	142.5
L reduction factor	~ 0.84
L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	10^{34}

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



collisions non purement frontales

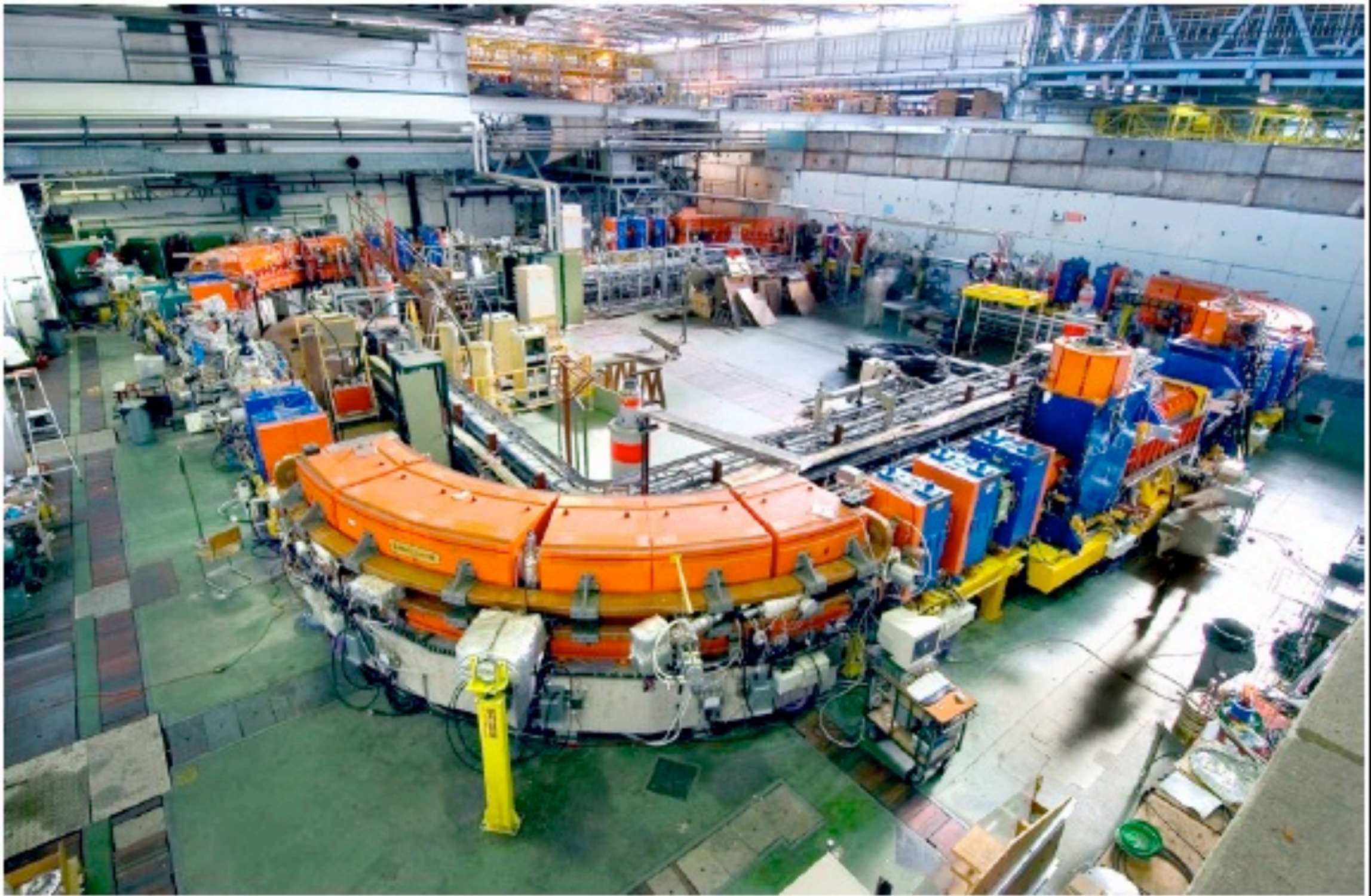
Overall view of the LHC experiments.



ES40 - V10/09/97

Animation CERN - LHC

Synchrotron : LEIR

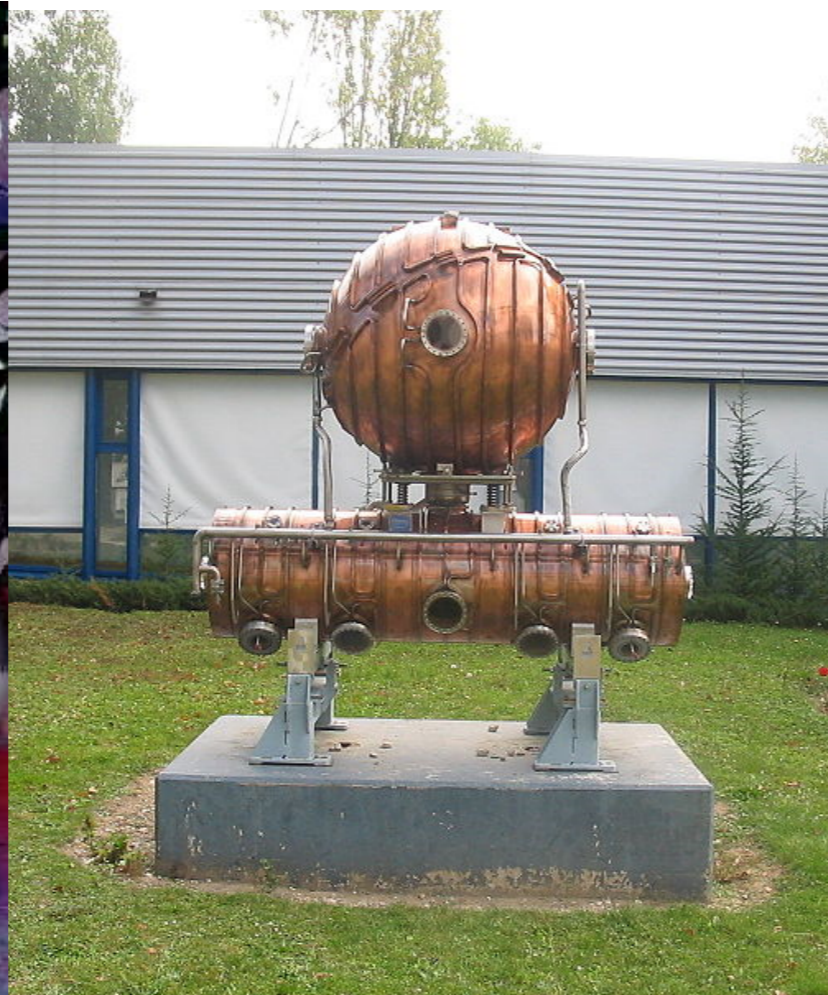


LEIR: Low Energy Ion Ring - CERN

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 10^{30}	4 10^5	60/30	≈ 10 10^{10}
Tevatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	100 10^{30}	7 10^6	30/30	$\approx 30/8$ 10^{10}
HERA (e^+p)	30x920	40 10^{30}	40	250/50	$\approx 3/7$ 10^{10}
LHC (pp)	7000x7000	10000 10^{30}	10^9	17/17	≈ 11 10^{10}
LEP (e^+e^-)	105x105	100 10^{30}	≤ 1	200/2	≈ 50 10^{10}
PEP (e^+e^-)	9x3	8000 10^{30}	NA	150/5	$\approx 2/6$ 10^{10}

Collisionneurs : LEP



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

$$N_b = 4$$

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

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

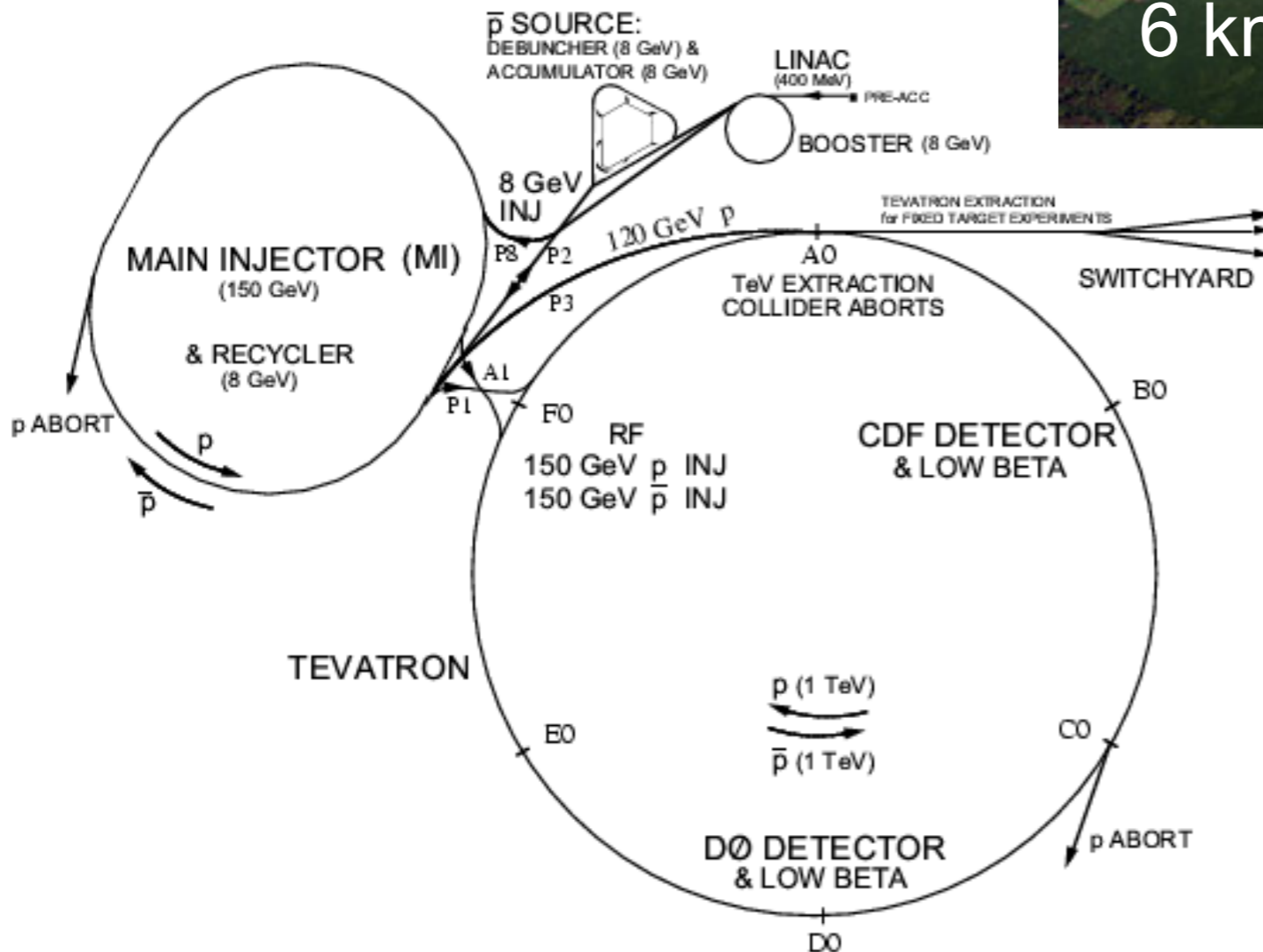
$$\rightarrow L \sim 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

LEP (1989-2001) - CERN

Collisionneurs p - \bar{p} : TeVatron

FermiLab (Chicago)

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

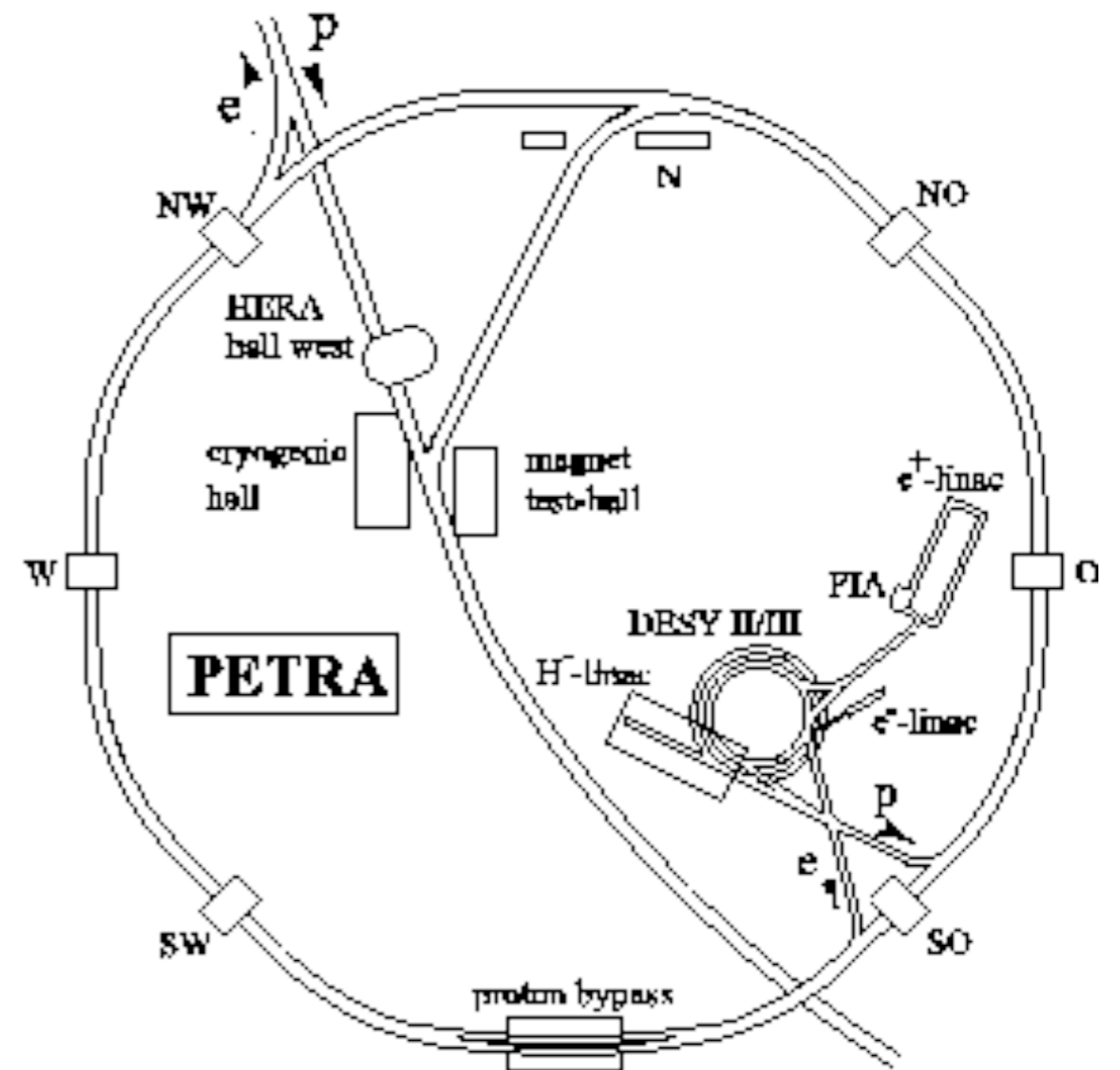
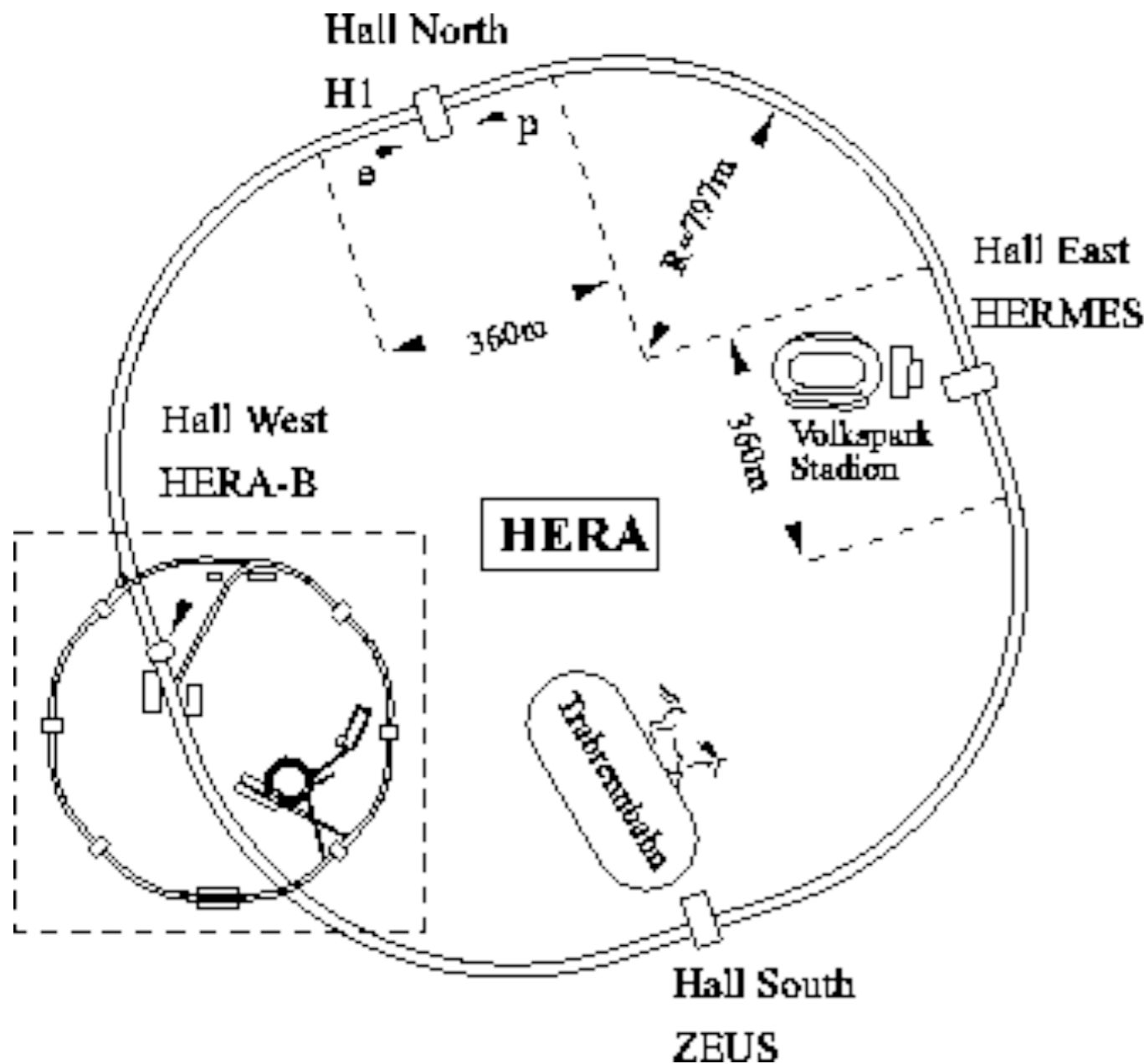


arrêté en 2011

Collisionneurs e-p HERA

DESY (Hambourg)

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

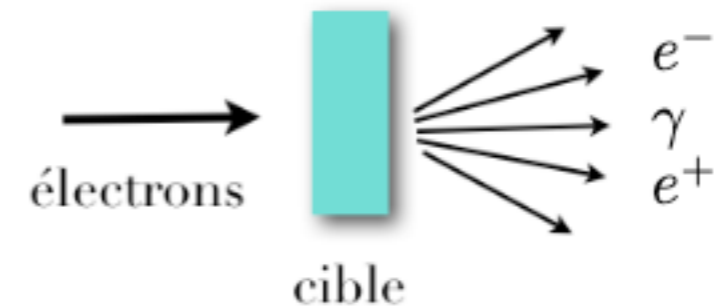
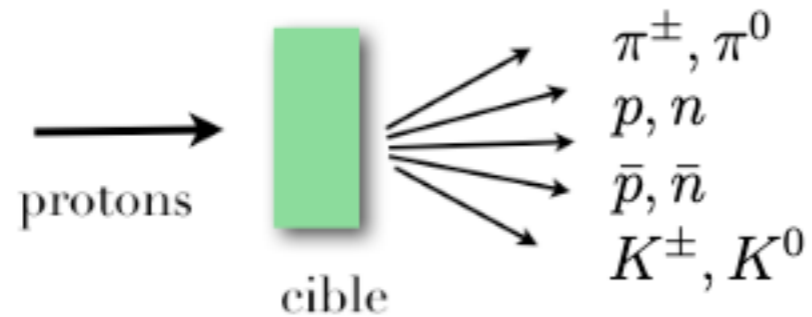


premier faisceau de p supraconducteur

fonctionnement 1992-2007

Faisceaux secondaires

Sources secondaires :

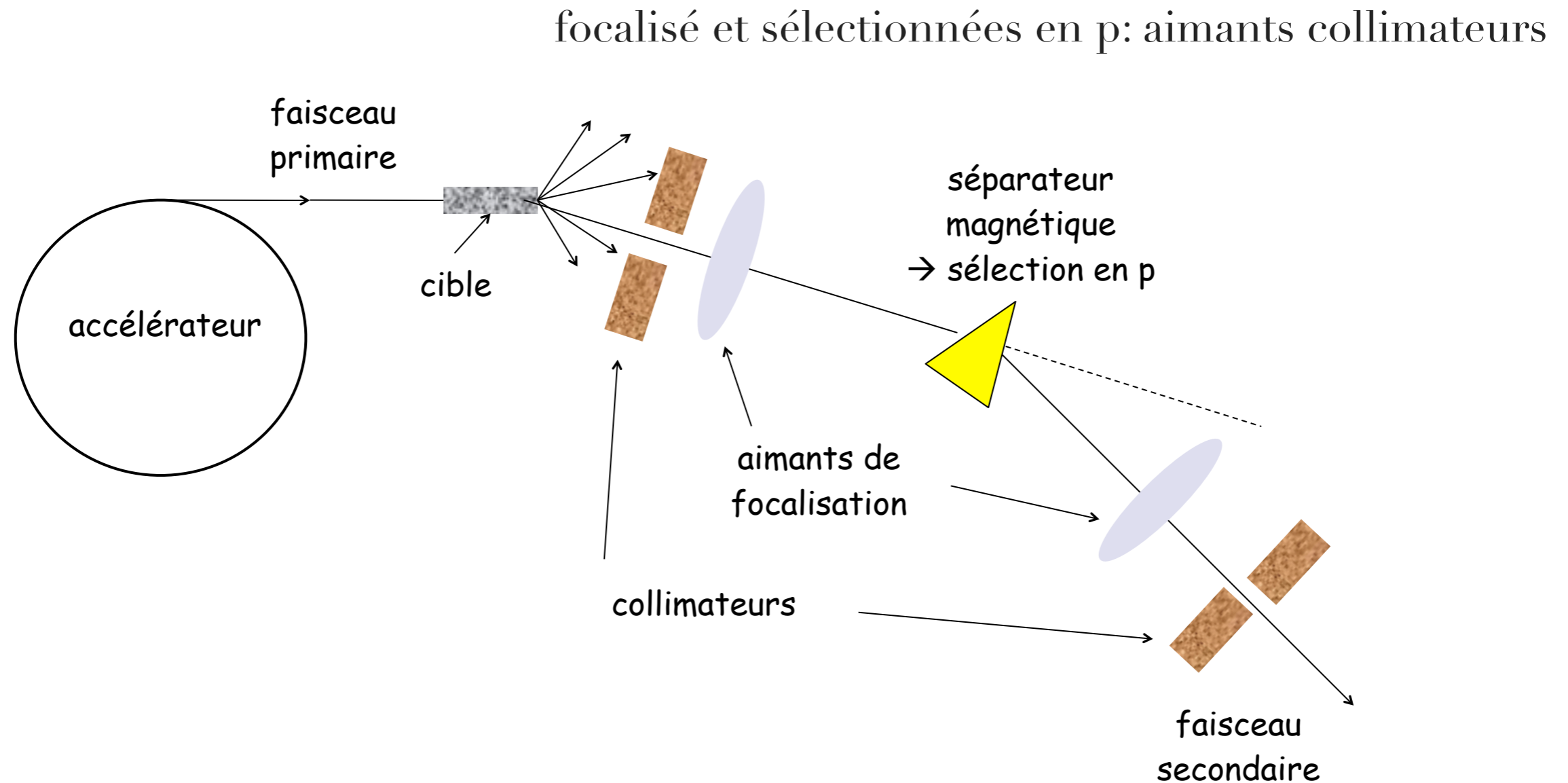


plus loin de la cible, suivi de :

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

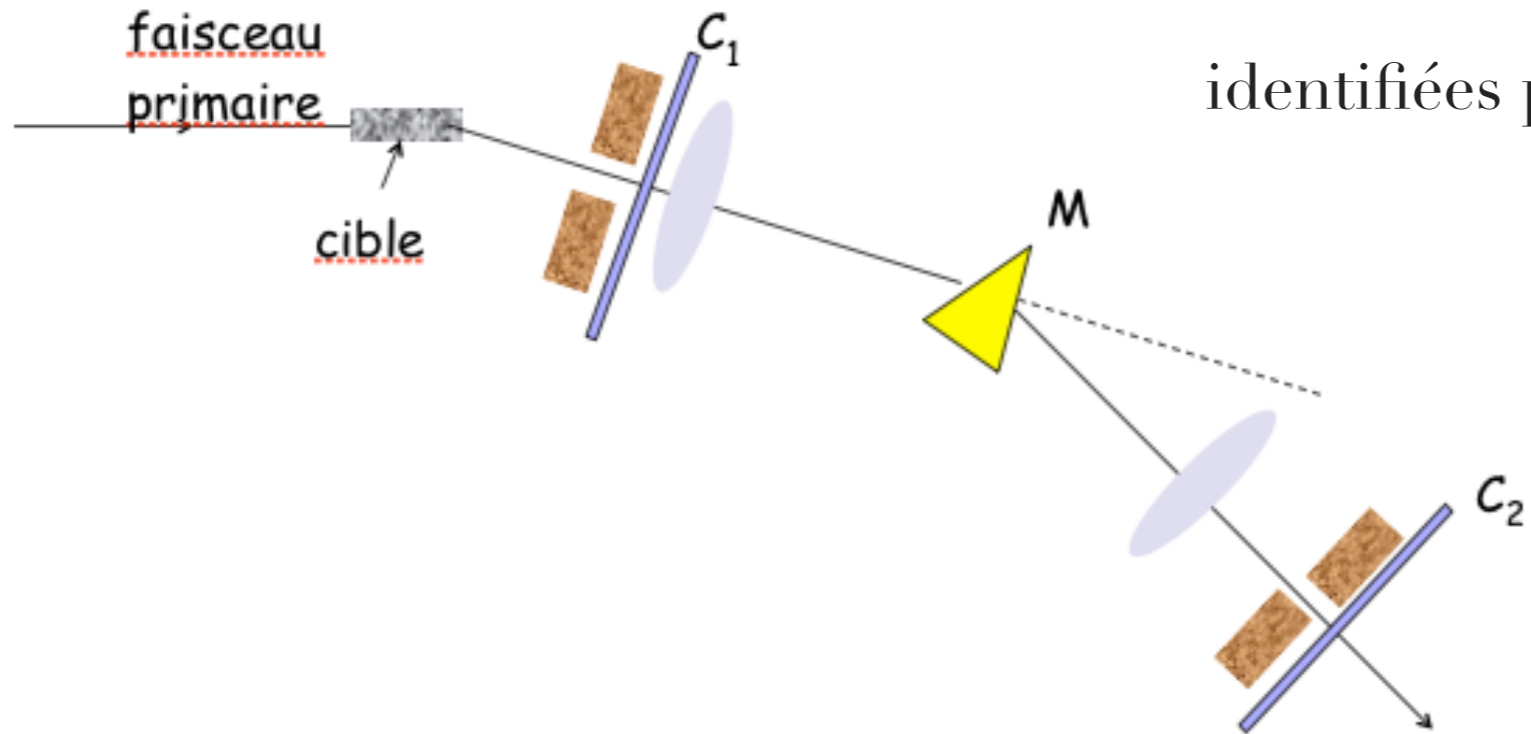
Faisceaux secondaires

Particules chargées



(dessin pas à l'échelle)

Faisceaux secondaires

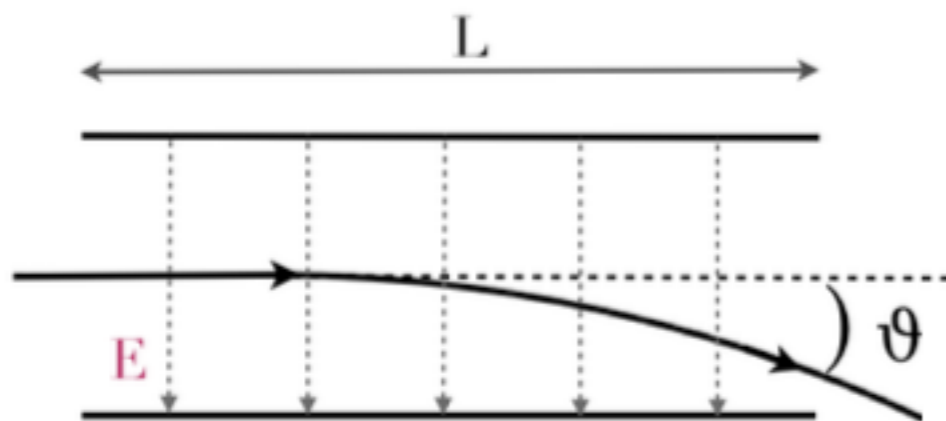


identifiées par leur temps de vol

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

⇒ information sur la masse

sélection en impulsion :



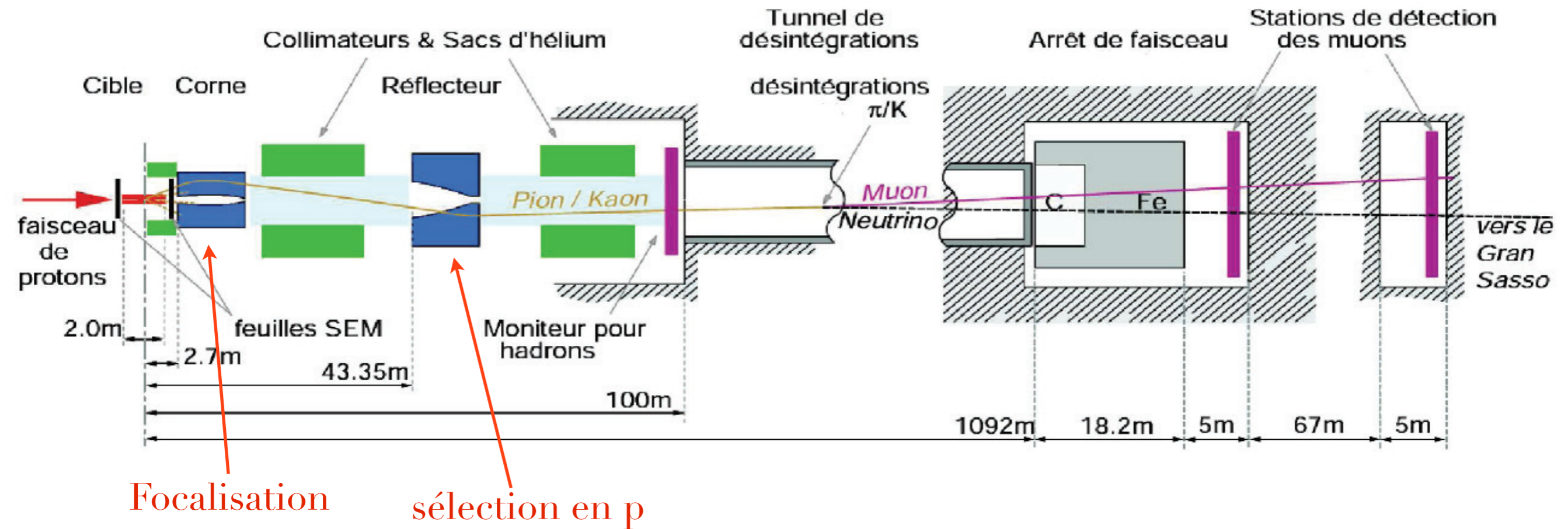
$$\theta \simeq \frac{p_T}{p} = \frac{\int qE dt}{p} = \frac{1}{v} \frac{\int_0^L qE dl}{p} = \frac{qEL}{c\beta p}$$

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

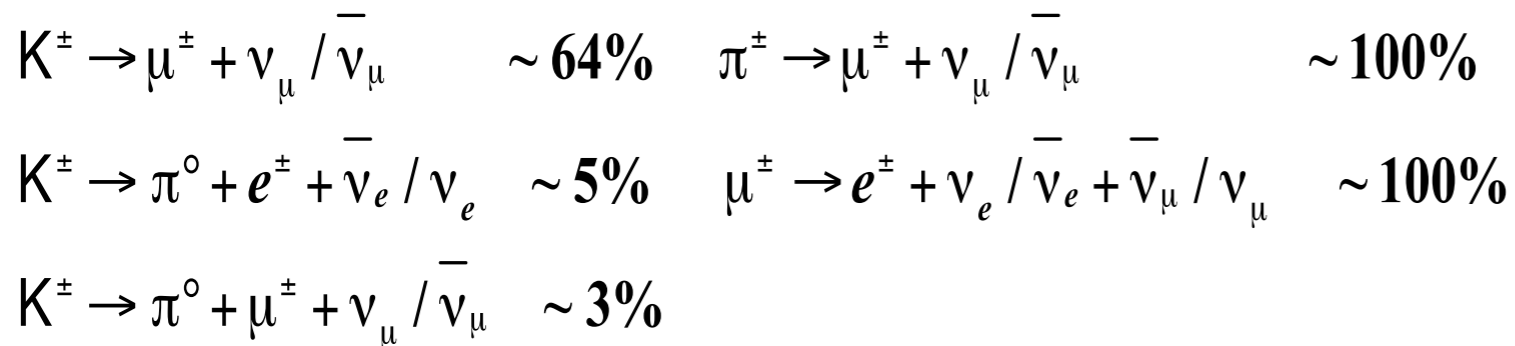
$$\Delta\theta = \theta_K - \theta_{\pi^\pm} = 0.1 \text{ mrad (soit environ } 0.005^\circ)$$

Faisceaux secondaires : neutrinos

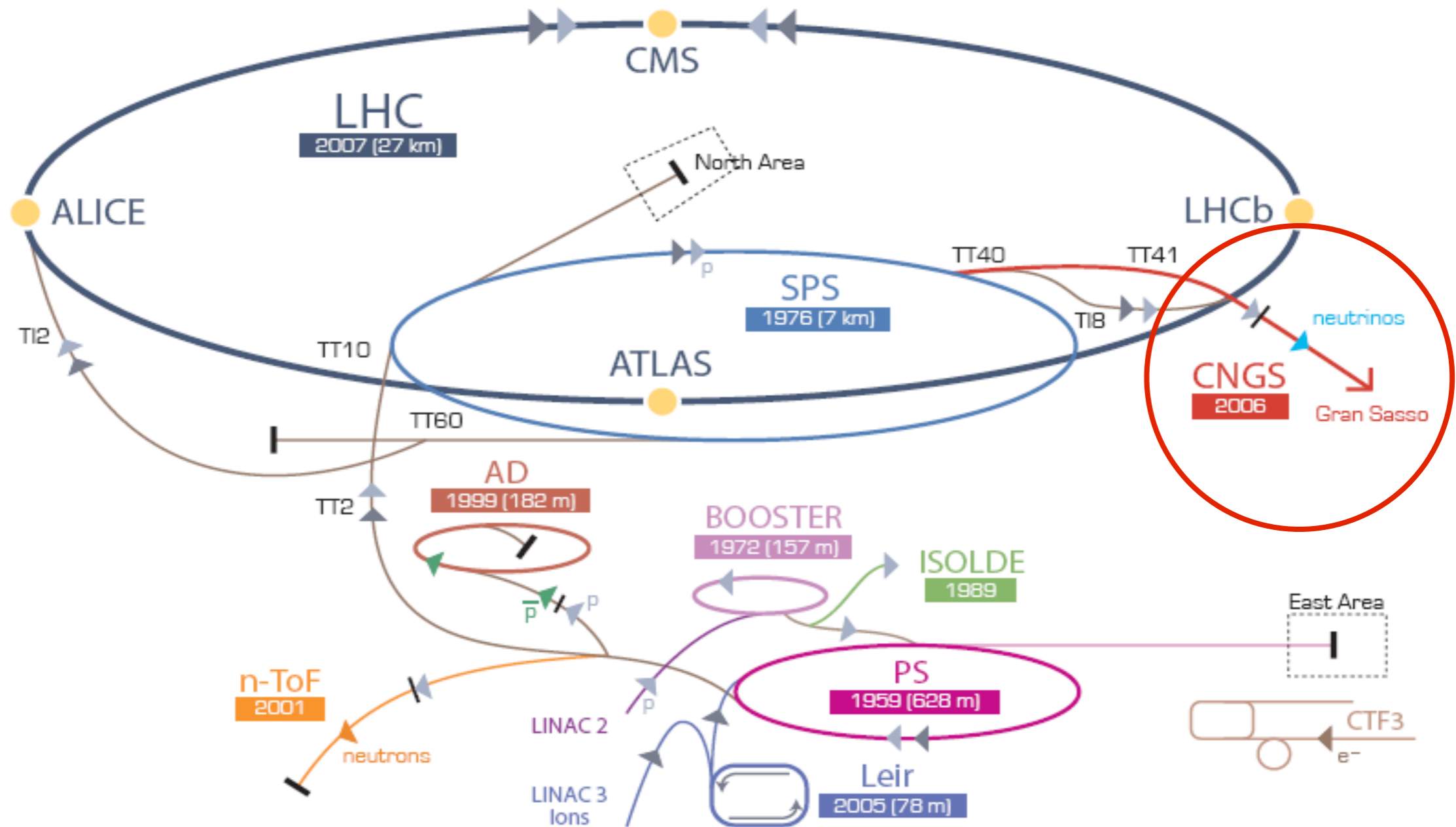
CERN → Gran Sasso



Production :



CERN: CNGS



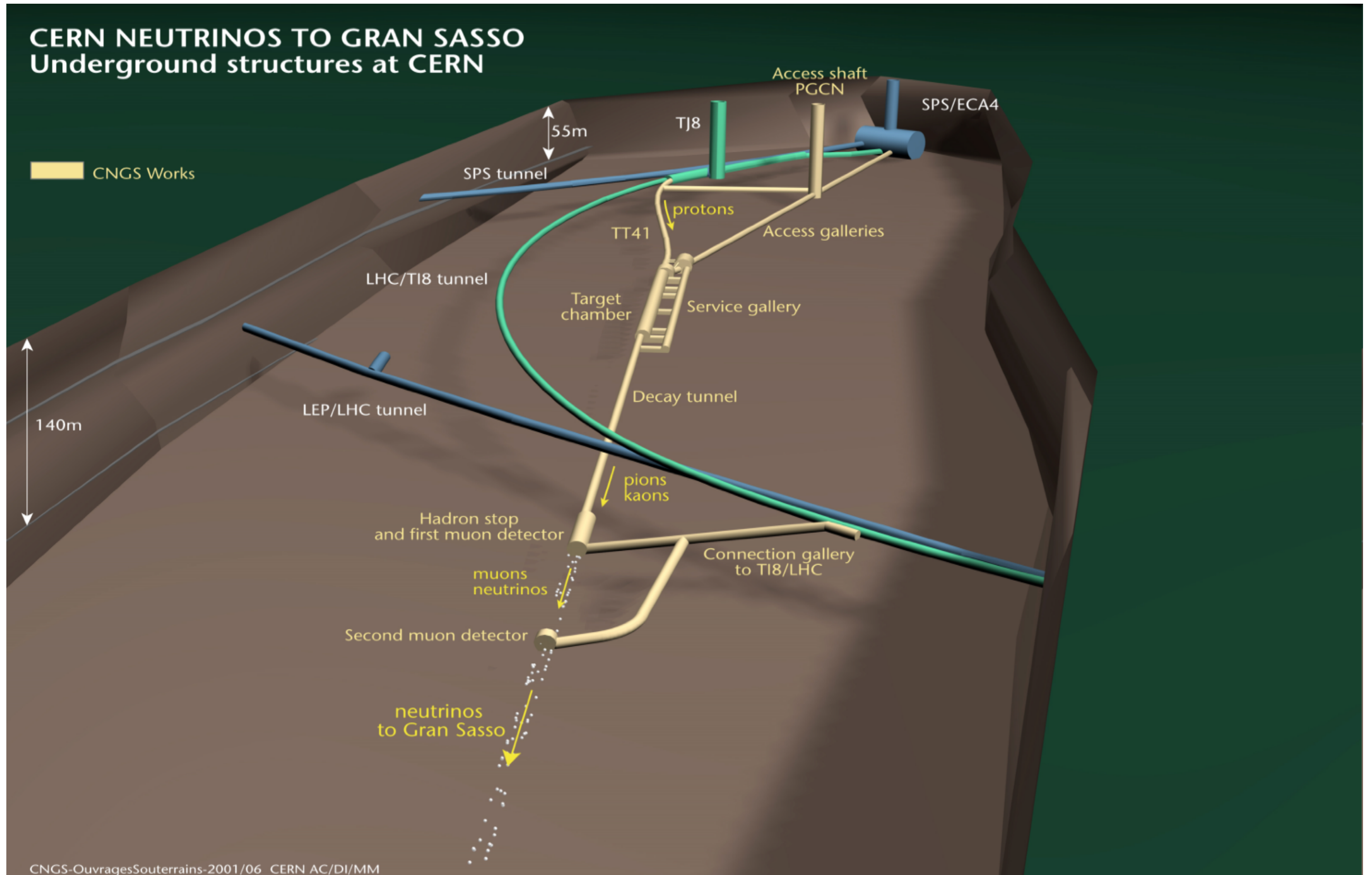
▶ p [proton] ▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ▶ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

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

CERN: CNGS



CERN: CNGS → LNGS

