

Alex C. MUELLER
Directeur Adjoint Scientifique



IN2P3

Institut national de **physique nucléaire**
et de **physique des particules**

*Utilité des accélérateurs, types de machines,
physiques nucléaire et des particules associées*

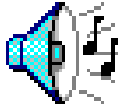
Pour démarrer: un clin d'œil à la région: Komz a rit Brezhoneg ?



Degemer mad e skol buanaer a Institut
Broadel e Fizik Nucleel ha Fizik ar
Partikulennoù !

(Bienvenue à l'école accélérateur de l'IN2P3!)

Le Gwenn ha Du



pen:	tête
bed:	monde
departament:	département
Pen-ar-bed:	Finistère
mor, vor:	mer
bihan:	petit
Kemper	Quimper
Benoded	Bénodet
Sant Voran	Sainte Marine
du:	noir
coz:	vieux
ker:	ville

karreg:	roche
ty:	maison
steredenn:	étoile
deiz mad:	bonjour
kenavo:	au revoir
hent:	chemin
yec'hed mad:	santé !
braz:	grand
gwenn:	blanc
hent:	chemin
kroaz:	croix
coat:	bois

L'IN2P3, quelques chiffres

Plus que 2500 personnes, dont :

417 Chercheurs CNRS de la section 03

90 Chercheurs CNRS des autres sections

351 Enseignants-chercheurs et chercheurs non CNRS

250 Personnels techniques et administratifs non CNRS

1477 Personnels techniques et administratifs CNRS

Repartition Géographique :

1058 Ile de France

504 Rhône Alpes

313 Normandie

261 Alsace

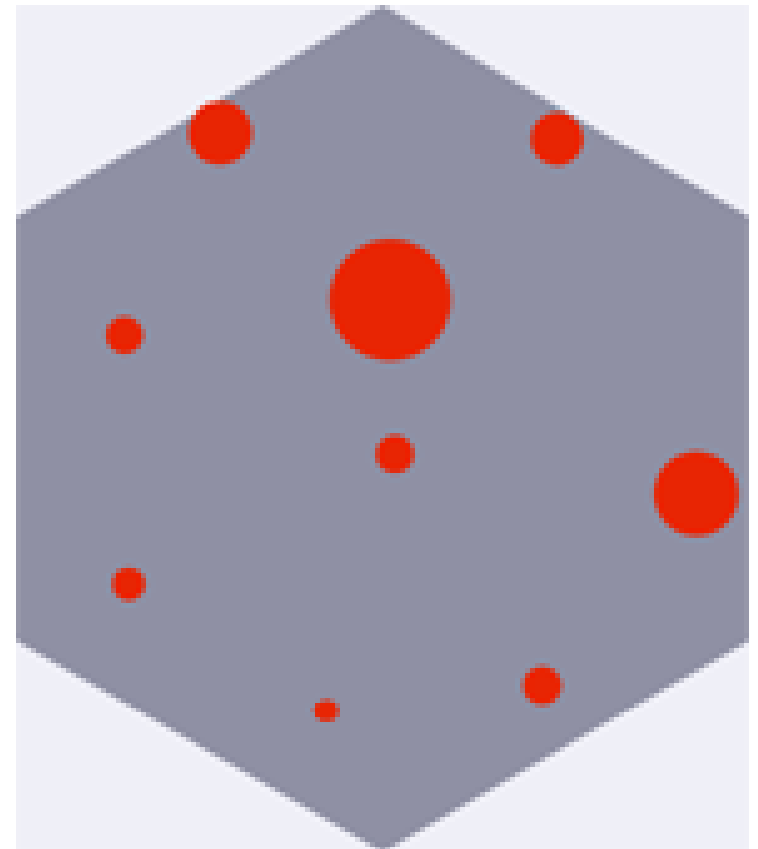
111 Provence

99 Centre

97 Bretagne - Pays de Loire

78 Aquitaine - Limousin

44 Languedoc Roussillon



Priorités Scientifiques de l'IN2P3

Focus HEP activities at CERN, based on LHC and its developments

Further develop GANIL as *the* European Research Center with the most intense exotic nuclear beams based on new SPIRAL2 project

Be a major player for (initial, conceptual) R&D in the field of nuclear energy based on our PACEN programme (e.g. ADS, Th-fuel technology..)

Further consolidate our presence in and our relations

- to the fields of Astrophysics and Cosmology ("astroparticles"),
- to the field of computing and other applications based on the "grid" (LCG et EGEE)

Further amplify our commitments to forefront accelerator R&D

Research in instrumentation in general and associated technology transfer (includes e.g. proton/hadron-therapy, radioisotope production, imaging)

Stratégie IN2P3 en matière d' Accélérateurs

Etre un **acteur majeur** sur la scène **internationale**

Relever les **3 défis**:

- Repousser la **frontière en énergie**
- Repousser la **frontière en intensité/luminosité**
- Rendre les accélérateurs disponibles pour
un **bénéfice direct à la société**

Accélération de Particules

- l'accélération \mathbf{a} d'une particule de masse m nécessite une force \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$$

(Newton)

- des 4 forces fondamentales, la **seule** que nous pouvons maîtriser de **manière technologique** est la force électromagnétique
- des **4 équations de Maxwell** qui décrivent les champs électromagnétiques (électrique: \mathbf{E} , magnétique: \mathbf{B}), on obtient la force de Lorentz qui agit sur une charge q en mouvement avec une vitesse \mathbf{v} :

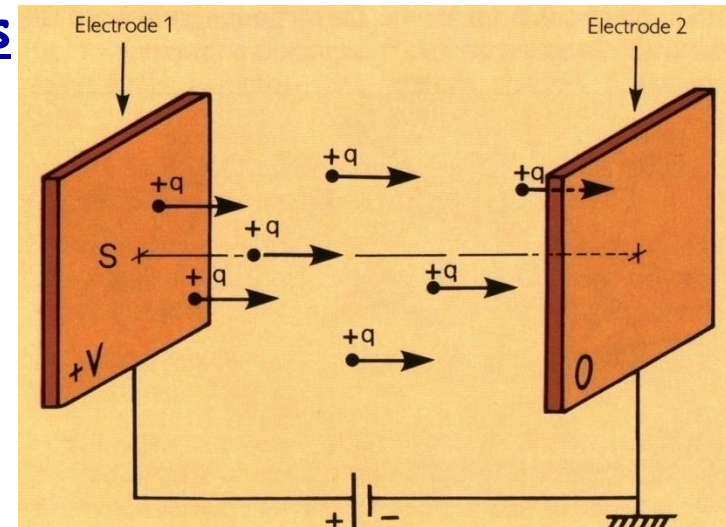
$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- nota bene: seules des particules chargées peuvent être accélérées
- le gain en énergie W de q dans un champ électrique généré par un potentiel V

est:

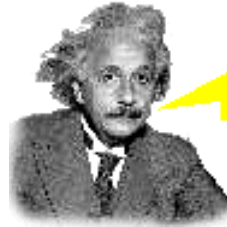
$$W = q V$$

- (unité utilisée : électron Volt [eV])



Masse et Energie, quelques relations utiles

$$E = m \cdot c^2$$



Mass is just a form of energy!

- E = énergie totale
- m = masse
- c = vitesse de la lumière

Formules importantes:

- Masse (relativiste), m $m = \gamma \cdot m_0$ $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$ $\beta = v/c$ • v = vitesse
- Energie cinétique, E_{cin} $E_{cin} = E - E_0$ $E_0 = m_0 \cdot c^2$ • m_0 = masse au repos
- Energie d'un photon $E = h \cdot \nu = (h \cdot c)/\lambda$ $\lambda = c/\nu$ • h = constante de Planck
- Long. d'onde de Broglie $\lambda_{dB} = h/(p) = h/(\beta \gamma \cdot m_0 \cdot c)$ • ν = fréquence d'une onde
- λ = longueur d'onde

$c = 2.9979 \cdot 10^8$ mètres/seconde 1 Joule = 1 Watt seconde = 1 kilogram metre²/seconde²

charge élémentaire : $e = 1.021 \cdot 10^{-19}$ Ampère seconde 1 Ampère seconde = 1 Coulomb

1 eV = $1.6021 \cdot 10^{-19}$ Joule 1 MeV = 10^6 eV 1 GeV = 10^9 eV 1 TeV = 10^{12} eV

Masse au repos: électron: $m_e = 0.511$ MeV proton: $m_p = 938.272$ MeV

Constante de Planck $h = 6.6261 \cdot 10^{-34}$ Joule seconde = $4.1357 \cdot 10^{-15}$ eV seconde

Accélérateurs & Physique Fondamentale

- Les accélérateurs sont devenus les outils les plus importants pour la physique de la matière élémentaire: étude de ses **Constituants** et de leurs **Interactions**. Un aspect interdisciplinaire important est l'histoire de l'Univers (Big-Bang, Nucléosynthèse)
- L'**échelle** étudiée est corrélée à l'énergie du faisceau (ou à son impulsion **p**):

$$\lambda = h/p$$

(longueur d'onde de "de Broglie"),
nota bene : parallèlement, la production des particules subatomiques et subnucléaires demande de plus en plus d'énergie en accord avec la loi de Einstein

$$E = m c^2$$

Dimensions utiles

• Quark	10^{-19} m	• Terre	10^7 m
• Proton & Neutron	10^{-15} m	• Soleil	10^9 m
• Atome	10^{-10} m	• Système Solaire	10^{13} m
• Cellule	10^{-8} - 10^{-3} m	• Voie Lactée	10^{21} m
• Homme	10^0 m	• Univers	10^{26} m

Éléments d'un Accélérateur (I)



Un accélérateur possède les composants principaux suivants :

- une source de particules chargées
électrons, protons, ions lourds, cas particulier: positrons & anti-protons
- éléments d'accélération
colonnes ou cavités de radiofréquence créant le champ électrique qui confère l'énergie aux particules qui constituent le faisceau
- éléments de guidage du faisceau
surtout magnétiques, pour maintenir (focaliser) le faisceau sur la trajectoire voulue et pour définir l'orbite (fermée pour un synchrotron) dans les machines circulaires
- systèmes auxiliaires, en particulier "vide" et "diagnostics"
un vide de bonne qualité est nécessaire afin d'éviter les collisions faisceau - gaz résiduel, les diagnostics assurent la surveillance des trajectoires du faisceau
- l'installation utilisateur
dispositifs expérimentaux (souvent complexes) qui incluent notamment les cibles, spectromètres, détecteurs
cas particulier: faisceaux secondaires produits par une réaction nucléaire (exemple : neutrons) ou par un processus électromagnétique (exemple.: photons créés par Bremsstrahlung ou par le Rayonnement Synchrotron)

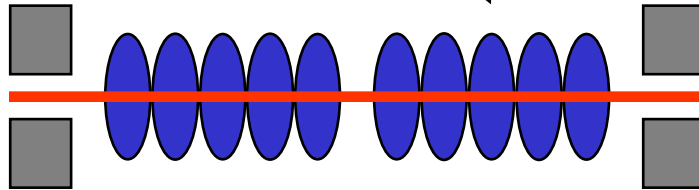
Elements d'un Accélérateur (II)

Photos: LEP (CERN)



cavités **accélératrices**

dipole magnétique
de **dévi**ation



quadrupole
magnétique de
focalisation

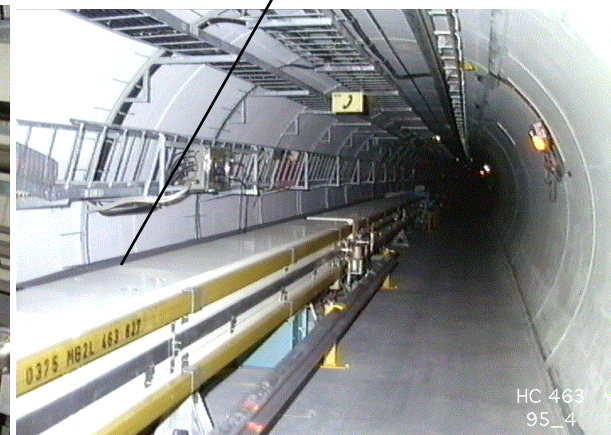
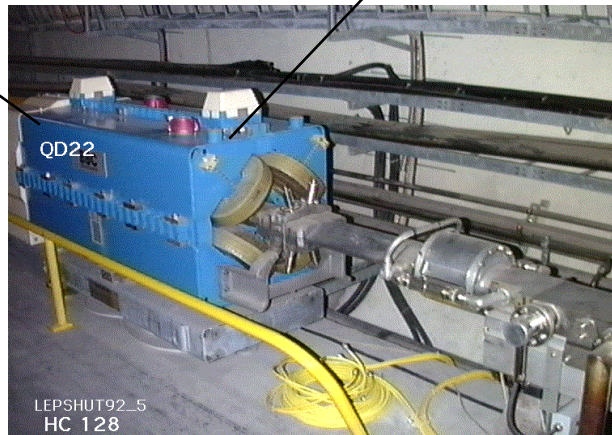
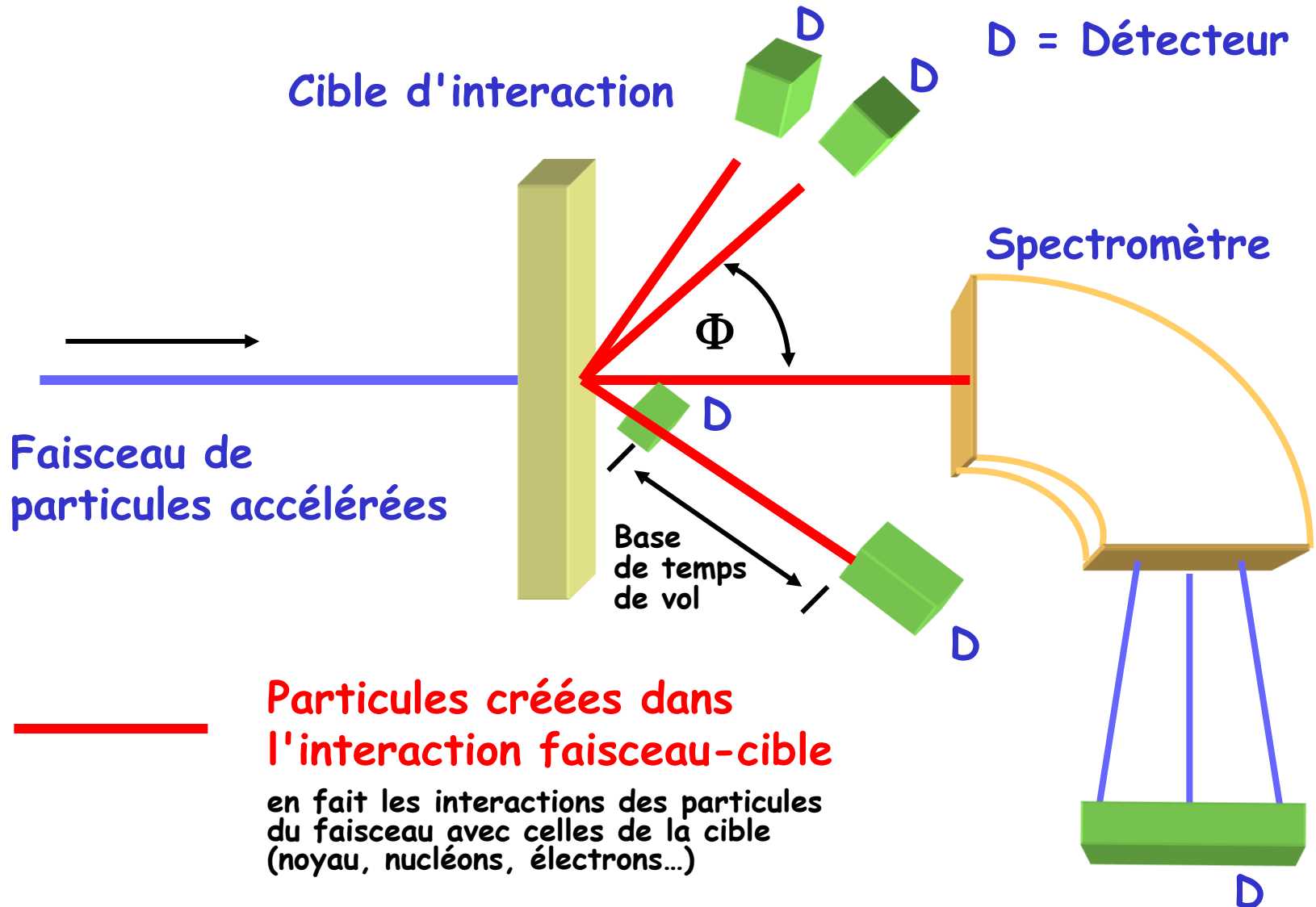
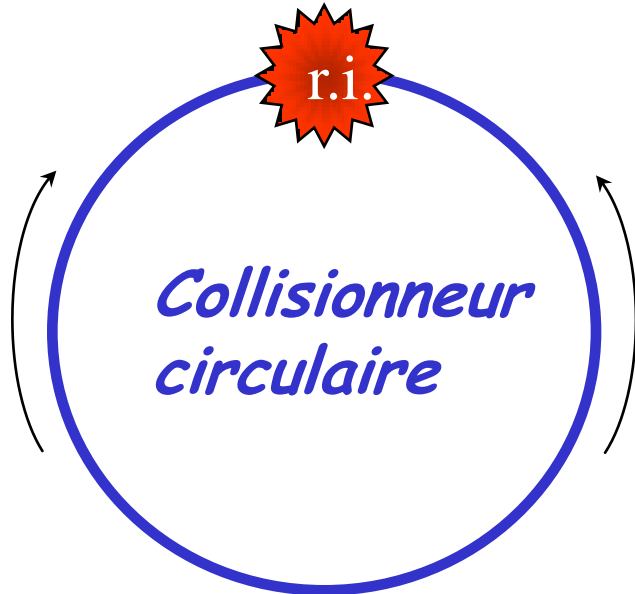
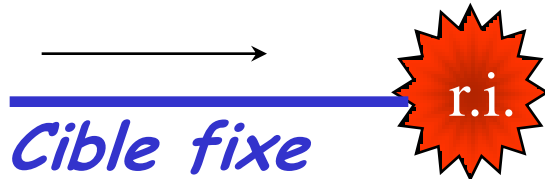


Schéma typique d'une expérience



Deux grandes classes d'expériences: le mode "cible fixe" et le mode "collisionneur"

r.i: région d'interaction



- ce qui intéresse l'utilisateur c'est l'énergie disponible dans le centre de masse **projectile noyau cible**
- en mode "cible fixe" une partie de l'énergie est "gaspillée" en **énergie cinétique des produits de réaction**



- de manière évidente, l'énergie utile est **plus grande** en mode "collisionneur", d'autant plus si les projectiles ont la **même masse et la même énergie** (**collisionneur symétrique**)

La Détection (I) :

Interaction Particule Matière

1) Remarque

Matière = noyau + électrons

tout petit \Rightarrow en traversant la matière, on ne "voit quasiment" que les électrons

2) Force de Coulomb

entre charges q et q'
distantes de r

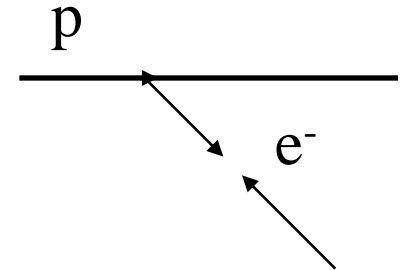
$$F = 1/(4\pi\epsilon_0) \times q q'/r^2$$

mise en mouvement de l'électron \Rightarrow ionisation

ralentissement du projectile

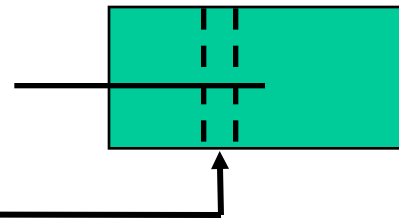
notion de parcours dE/dx

$$\epsilon_0 = 9 \times 10^{-12} \text{ [As/Vm]}$$



3) Formule de Bethe

$$-dE/dx = Z^2 m/E f(E)$$



Détermination du nombre Z de protons par mesure de "perte d'énergie"

La Détection (II): l'Ionisation

Remarque essentielle:

L'ionisation est un phénomène linéaire

n = nombre d'électrons arrachés

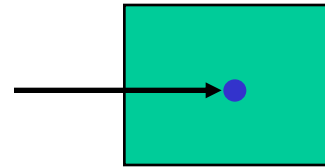
énergie perdue / n = constante

const = 30 eV (gaz)
= 3 eV (Si)

exemples:

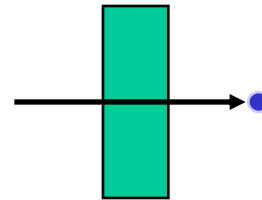
1) arrêt total dans le détecteur

$$n = E_{\text{cin}} / \text{const}$$



2) ralentissement

$$n = \Delta E_{\text{cin}} / \text{const}$$



ordres de grandeur:

arrêt d'une particule α de 5MeV:

gaz: $n = 5 \times 10^6 / 30 \cong 1.7 \times 10^5$

Si: $n = 5 \times 10^6 / 3 \cong 1.7 \times 10^6$

La Détection (III) : Comment détecter différents types de particules

Une particule ne peut être **détectée** que si elle est **chargée** ou met en **mouvement des particules chargées!**

- Cas des particules chargées: ***trivial***
- Cas des particules neutres:
mise en mouvement d'un noyau chargé (du détecteur)
par collision
exemple: neutrons rapides
*ou **par réaction** avec les noyaux du détecteur*
exemple :neutrons lents
(meilleure efficacité si $m_{\text{projectile}} > m_{\text{noyau}}$)
- Cas des photons:
mise en mouvement d'électrons
(par trois effets)

La Détection (IV): Cas des Photons

Interaction Rayonnement-Matière

mise en mouvement d'électrons par 3 effets

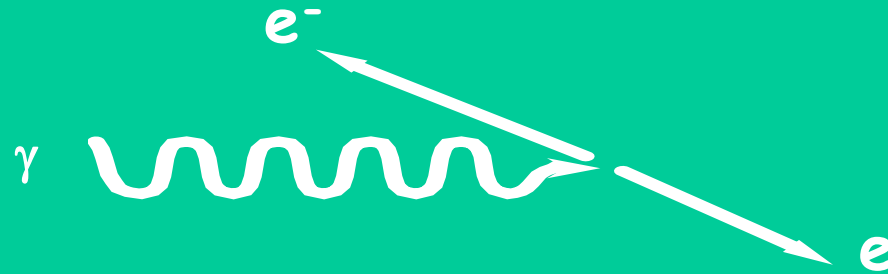
effet photoélectrique :



effet Compton :



création de paires



La Détection (V) : Principes de détecteurs

1) Détecteurs d'ionisation:

objectif: collecter les n électrons
(et éventuellement les n charges positives) libérées par
le processus d'ionisation

charge collectée $q = n \cdot e$

ordre de grandeur pour une particule " α " de 5 MeV

$$\begin{aligned} 1 \text{ C (Coulomb)} &= 1 \text{ A}\cdot\text{s} & \text{gaz } q &= 1.7 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ & & &= 2.7 \times 10^{-14} \text{ C} \\ \text{Si } q &= 2.7 \times 10^{-13} \text{ C} \end{aligned}$$

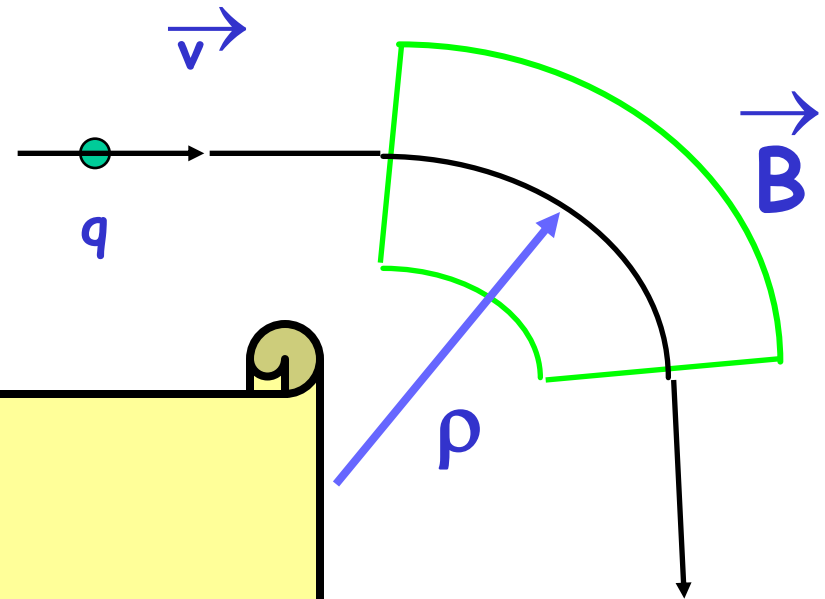
2) Scintillateurs:

Principe: le retour à l'équilibre du milieu peut se faire par
émission de lumière
- on **collecte** cette **lumière**
- on la **transforme** en **signal électrique**
(typiquement avec un photomultiplicateur)

La Détection (VI):

Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique

Particule de masse m
et de charge q
traversant un champ \vec{B}
avec une vitesse \vec{v}



Force de Lorentz
= Force centrifuge

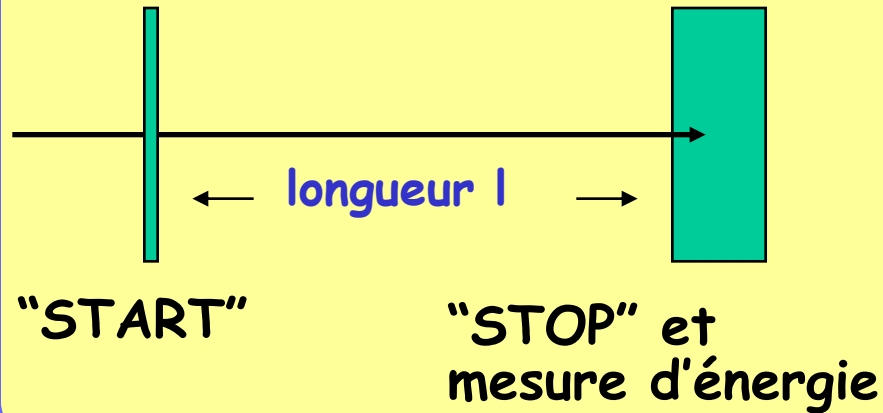
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = m v^2 / \rho$$

$$\text{si } \vec{B} \perp \vec{v} \Rightarrow B\rho = mv/q$$

$B\rho$: rigidité magnétique

Détermination du nombre de masse A d'un ion lourd composé de Z protons et N neutrons, avec $A = Z + N$

1) par Energie et Temps de Vol

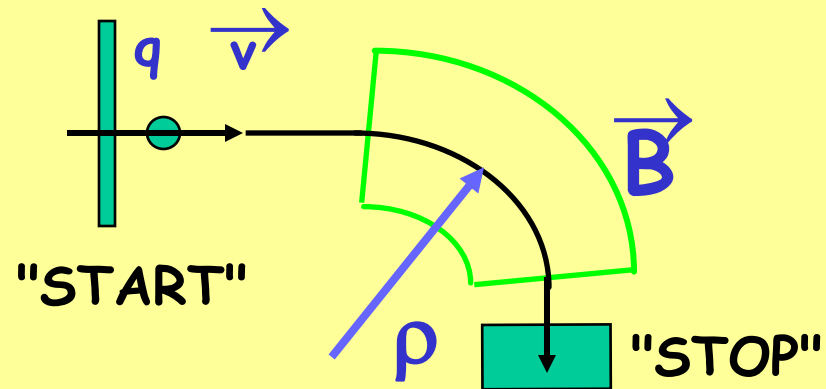


$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow m = 2 E_{\text{cin}} / v^2$$

$$m = A m_{\text{nucléon}} \quad v = l/t$$

$$\Rightarrow A = 2/m_{\text{nucléon}} E_{\text{cin}} t^2 / l^2$$

2) par Temps de Vol et Rigidité Magnétique $B\rho$



$$B\rho = m/q \cdot v = m/q \cdot l/t$$

$$\text{si } q = Z e \text{ (ions épluchés)}$$

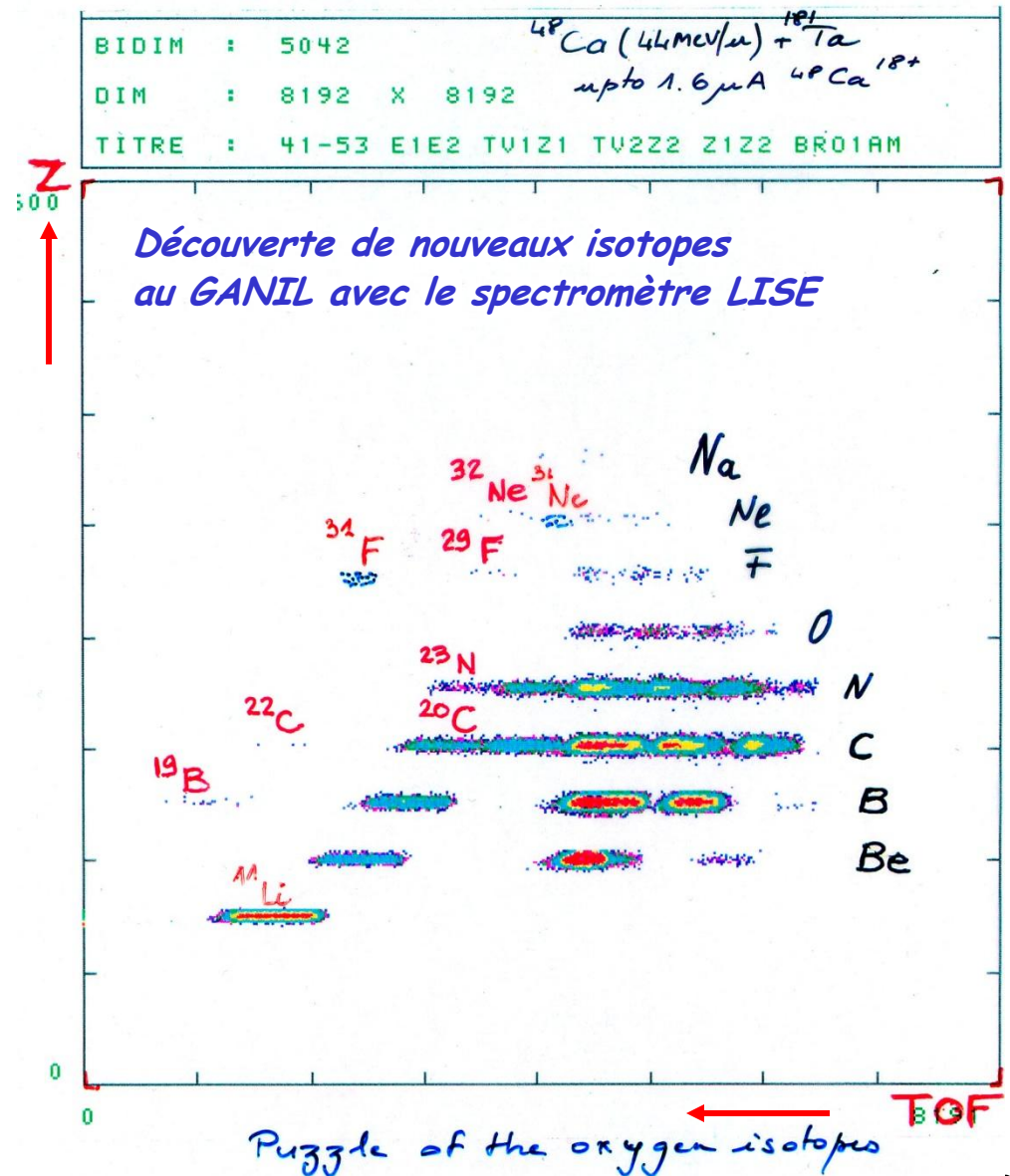
$$\Rightarrow A/Z = t e B / (l \cdot m_{\text{nucléon}})$$

vitesse typique des ions lourds du GANIL: $v/c = 0.3 \Rightarrow v = 10^8 \text{ m/s} = 10 \text{ cm/ns}$
pour $\Delta A/A = 1/200 \Rightarrow \Delta v/v = 1/400$
 $t = 400 \times 200 \text{ ps} = 80 \text{ ns} \Rightarrow$ $l = \text{longueur} = 8 \text{ mètres}$

Matrice bi-dimensionnelle d'identification après un spectromètre (ici LISE/GANIL)

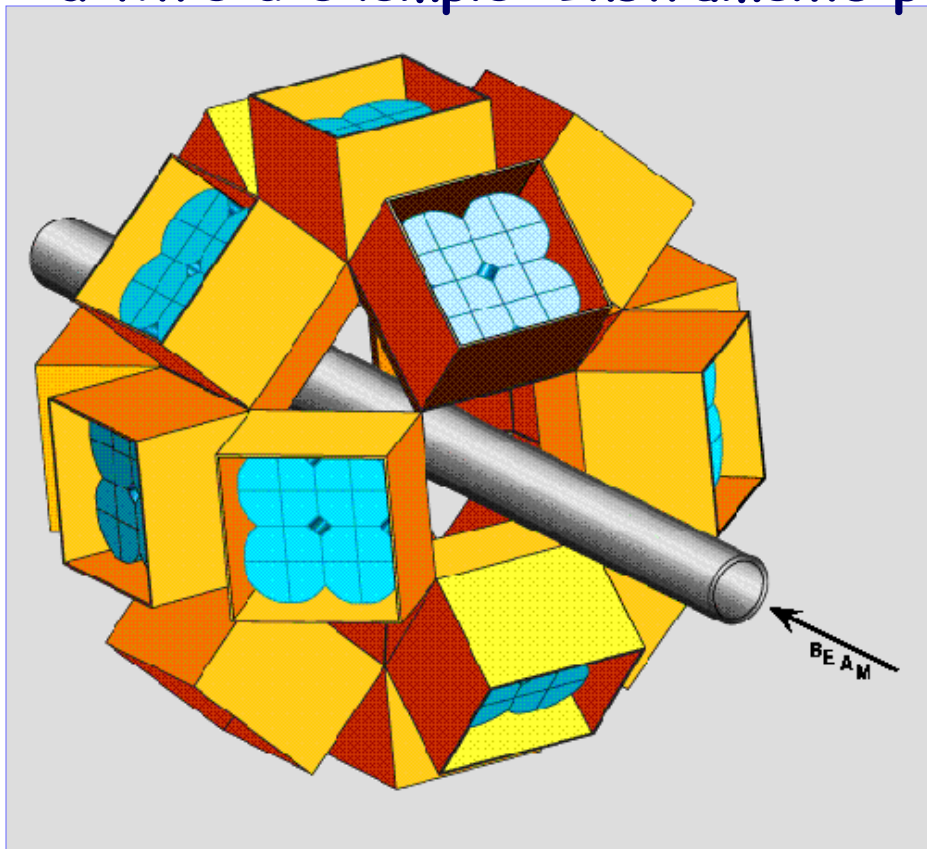
Ci-contre une matrice ΔE -TdV

- selon la formule de Bethe **le ΔE est proportionnel au Z** (au carré) des particules détectées
- selon le transparent précédant, pour un B_p choisi ou mesuré (par le spectromètre) **le temps de vol est proportionnel au A/Z**
- les différents isotopes (Z, A) sont donc **triés** dans cette matrice et **identifiables**
- Remarque: si les ions ne sont pas complètement épluchés ($q \neq Z \cdot e$), il faut construire des matrices un peu plus complexes à l'aide de **$\Delta E, E, TdV, B_p$**



Détection en "cible fixe"

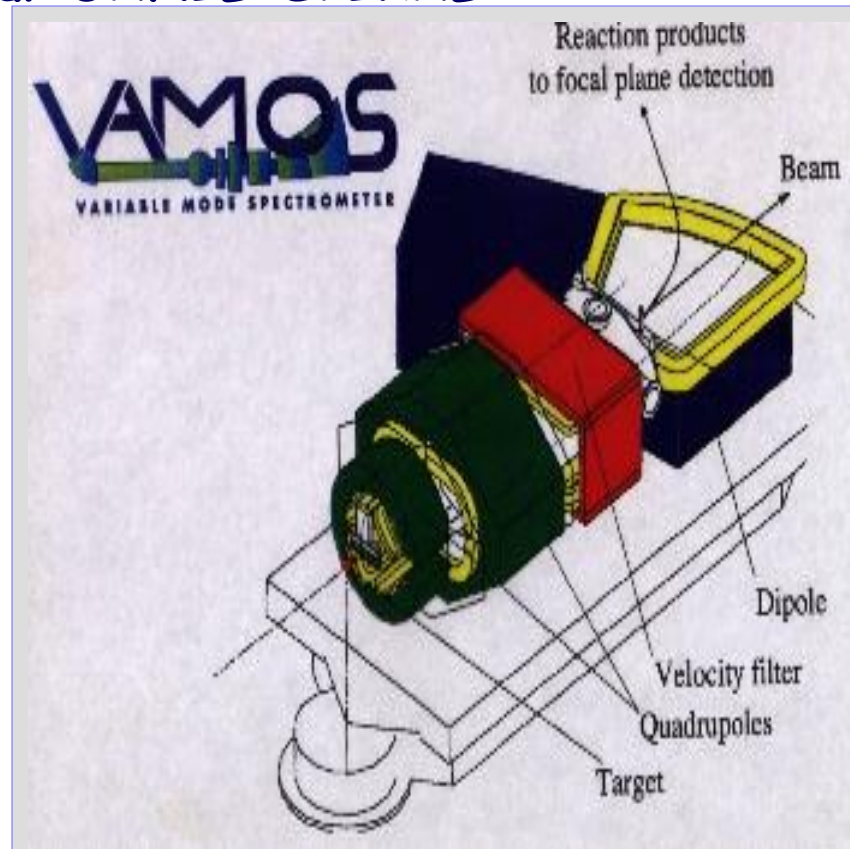
à titre d'exemple: Instruments pour GANIL-SPIRAL



Le Détecteur EXOGAM

Spectromètre " $4\pi-\gamma$ " à haute résolution (emploi de détecteurs GeHP) et à large couverture angulaire (" 4π ")

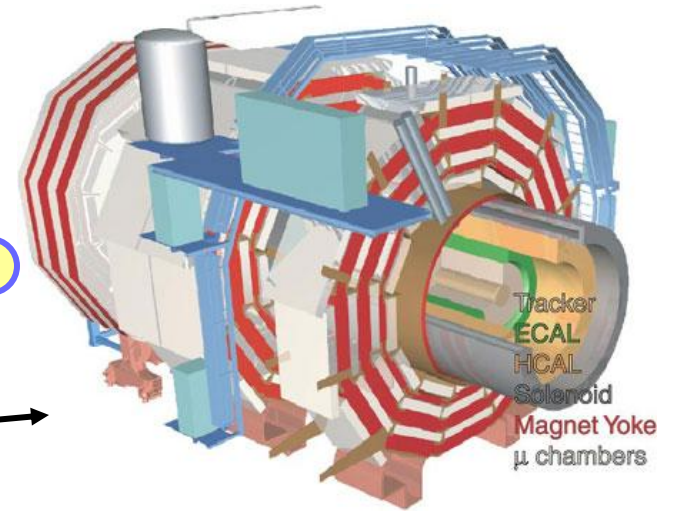
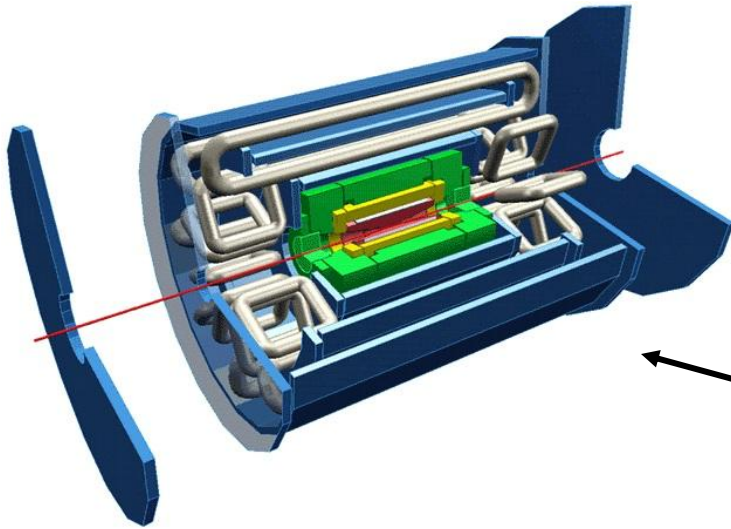
n.B.: VAMOS et EXOGAM peuvent être combinés !



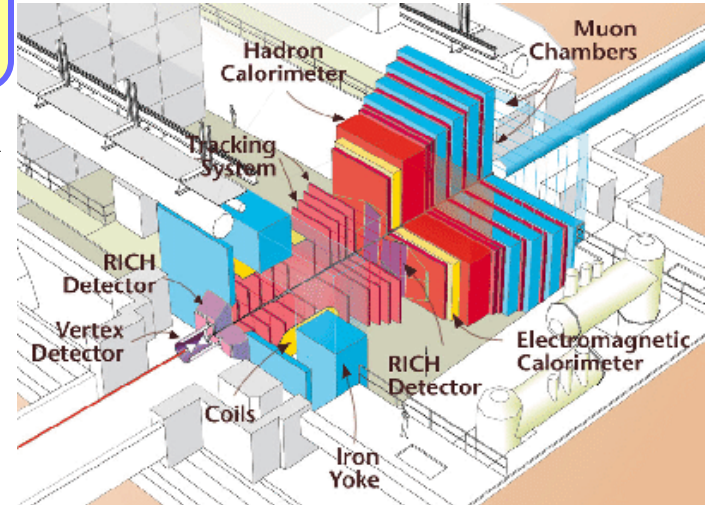
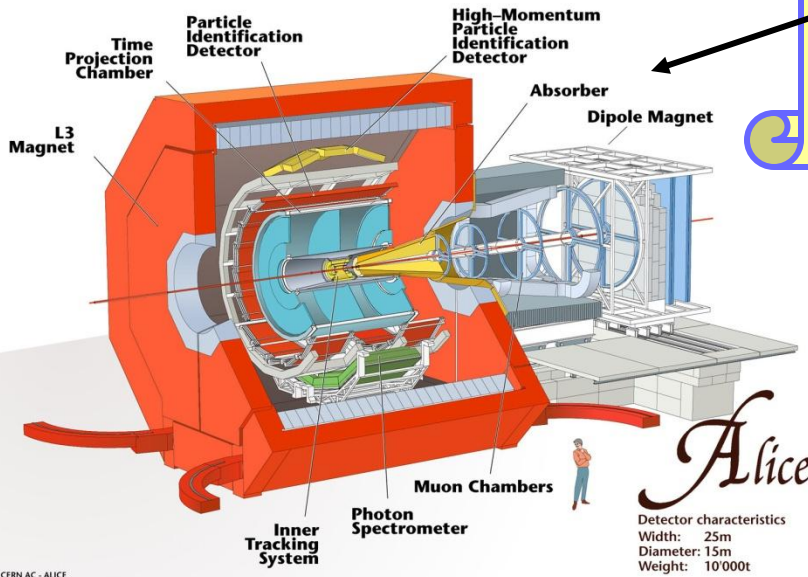
VAMOS (VARIABLE MODE Spectrometer)

Spectromètre magnétique pouvant opérer en différents modes (filtre de vitesse associé)

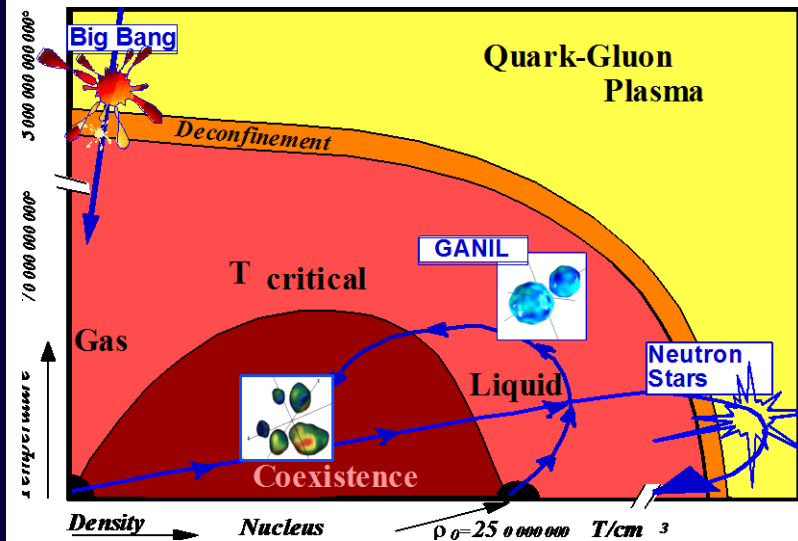
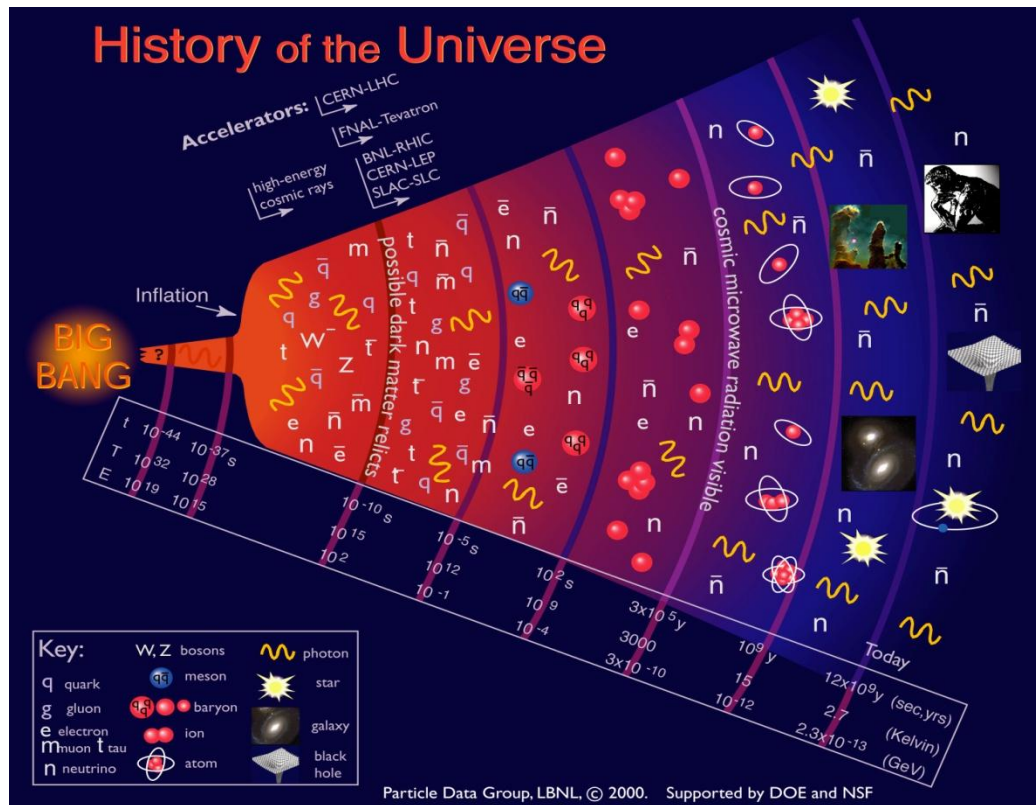
Les quatre détecteurs du LHC



ATLAS
CMS
ALICE
LHC-B



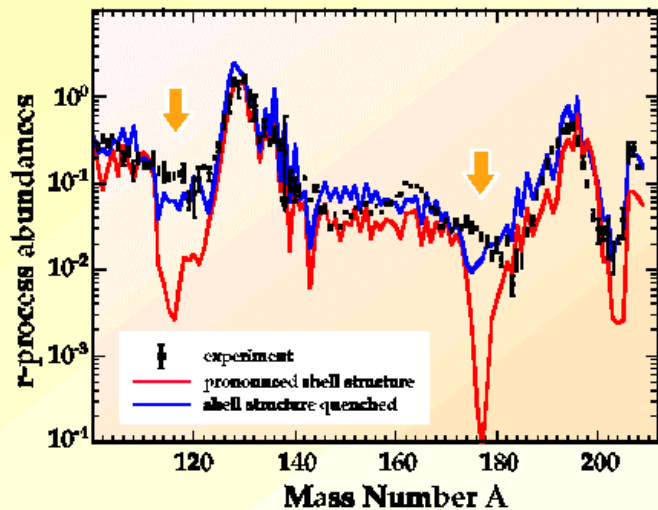
les Accélérateurs et l'Univers (1)



- On pense, que le monde d'aujourd'hui a eu son origine dans le **Big Bang**
- Au tout début, l'univers était si **petit** qu'il tenait à l'intérieur d'une main!

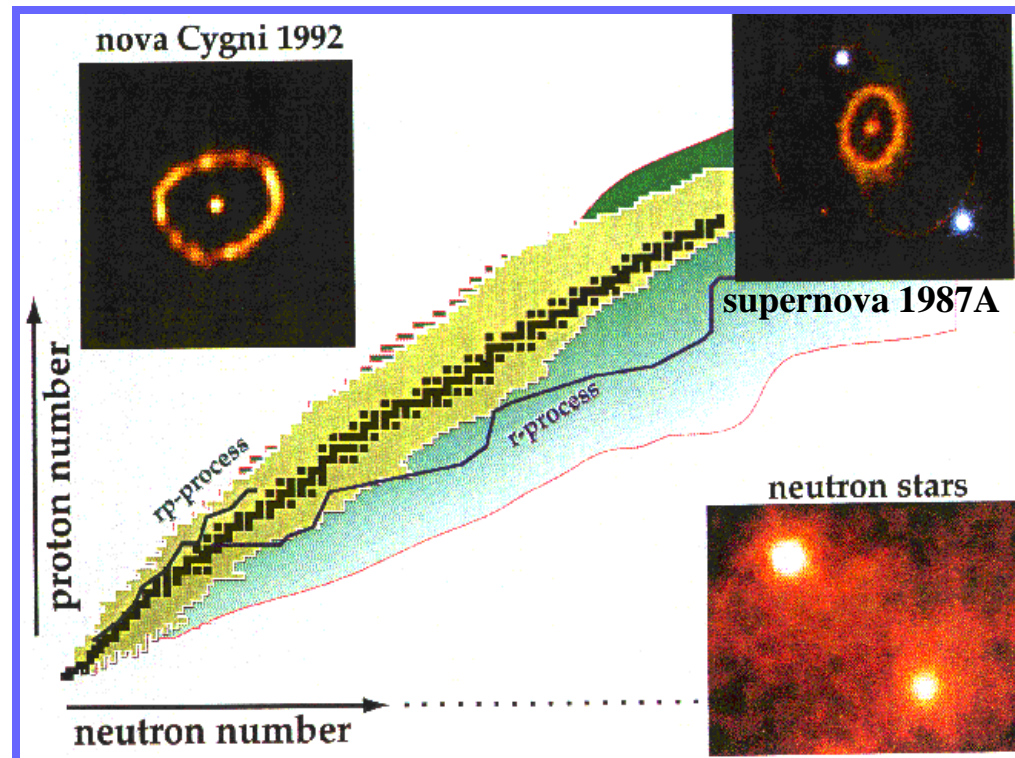
- Toutes les **particules** qui constituent la matière du monde présent **n'étaient pas encore formées**, mais depuis, l'univers a connu une expansion correspondant à des **milliards d'années lumières**.
- Les **Quarks et Gluons**, aujourd'hui enfermés dans les protons et neutrons, étaient **trop chauds** à cette époque pour "coller" ensemble. On appelle la matière dans cet état le **Plasma Quark Gluon**.
- Afin de créer le **Plasma Quark Gluon** en laboratoire, les physiciens doivent collisionner des **ions lourds** entre eux à **très haute énergie**, en comprimant les protons et neutrons jusqu'à fusion.
- Le but de l'expérience **ALICE** auprès du LHC sera de recréer ces conditions et de les étudier.

les Accélérateurs et l'Univers (II)



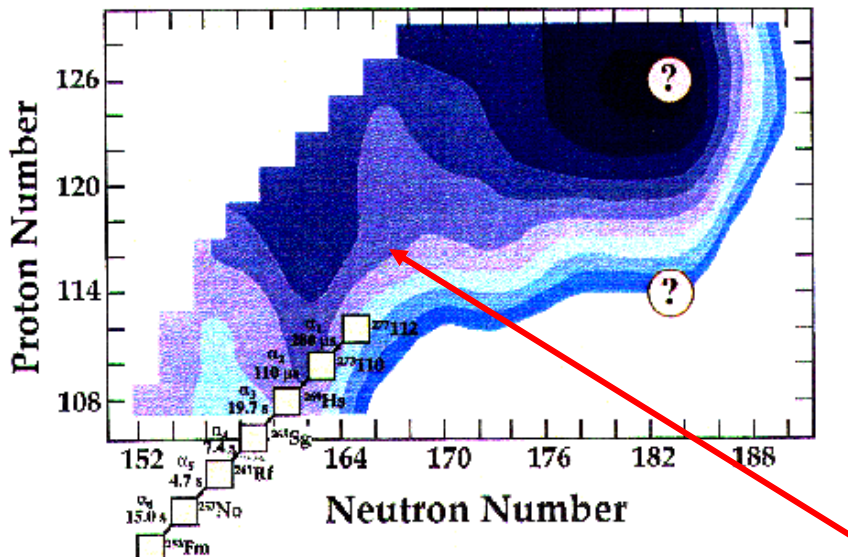
- l'astrophysique nucléaire étudie les **réactions nucléaires** qui ont lieu dans les **étoiles**
- ces réactions produisent de l'énergie et synthétisent les éléments chimiques ("abondance isotopique"), dont notre monde est constitué
- à titre d'exemple, la figure ci-contre montre les abondances produites dans le processus r, dont on pense que les lieux soient les **explosions de supernovae** (noir = abondance mesurée)

- la capture rapide proton (rp) et neutron produit des **noyaux de très courte vie**
- les propriétés de ces "noyaux exotiques" sont largement **inconnues**.
- pourtant, leur masse, décroissance, section efficace de réaction déterminent, de **façon critique**, les abondances (on note dans la figure la différence entre structure en couches **normale** et "**quenchée**")
- cette physique motive des accélérateurs comme **GANIL-SPIRAL, GSI...** ou les projets futurs comme **EURISOL**
- l'accélérateur de haute intensité d'EURISOL possède des **spécifications** très similaires que celles du XADS!



Physique Nucléaire et Chimie: La synthèse des éléments les plus lourds

- Les Accélérateurs d'ions lourds ont permis dans des réactions de fusion la **synthèse des nouveaux éléments** qui ont été baptisés récemment.
- Rutherfordium
- Dubnium
- Seaborgium
- Bohrium
- Hassium
- Meitnerium
- Darmstadtium
- Roentgenium
- ces expériences se font à GSI, Dubna et Berkeley
- Récemment, on a pu pousser jusqu'au **Z=112 (GSI, Dubna)**, voire **Z=118 (Dubna)**



La classification des éléments chimiques selon Mendelejev

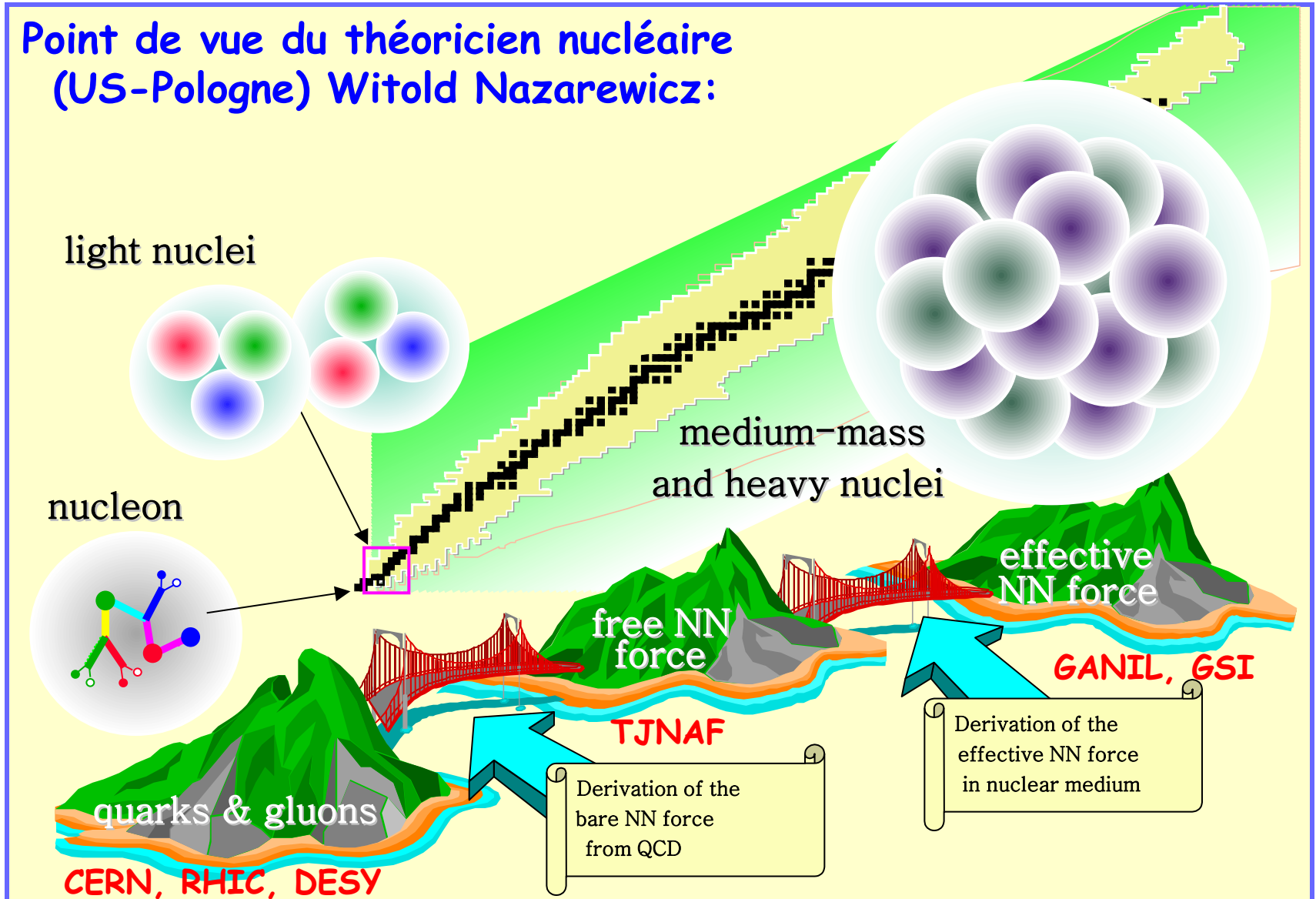
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period 1	1	H																	2
Period 2	3	Li	4	Be									5	6	7	8	9	10	
Period 3	11	Na	12	Mg									13	14	15	16	17	18	
Period 4	19	K	20	Ca									21	22	23	24	25	26	
Period 5	37	Rb	38	Sr									39	40	41	42	43	44	
Period 6	55	Cs	56	Ba	*								71	72	73	74	75	76	
Period 7	87	Fr	88	Ra	**								103	104	105	106	107	108	
Lanthanides	*				57	58	59	60											69
Actinides	**				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	

.....et le futur?

- Selon les prédictions théoriques, on devrait trouver un îlot de stabilité pour des Z encore plus élevés.
- La figure ci-contre montre de tels calculs où la force des couleurs correspond aux énergies de liaison, donc aussi aux temps de vie.
- Hélas, les sections efficaces de fusion s'écroulent en même temps, il faudrait donc des futurs accélérateurs d'ion lourds de forte intensité = **SPIRAL 2**
- les faisceaux radioactifs, riches en neutrons, comme le ^{132}Sn , pourraient donner accès à cette région et également aux isotopes de plus longue durée de vie des autres éléments = **SPIRAL 2**

Lien entre Physique Nucléaire et Physique des Particules et principales machines associées (pour les physiciens de l'IN2P3)

Point de vue du théoricien nucléaire
(US-Pologne) Witold Nazarewicz:

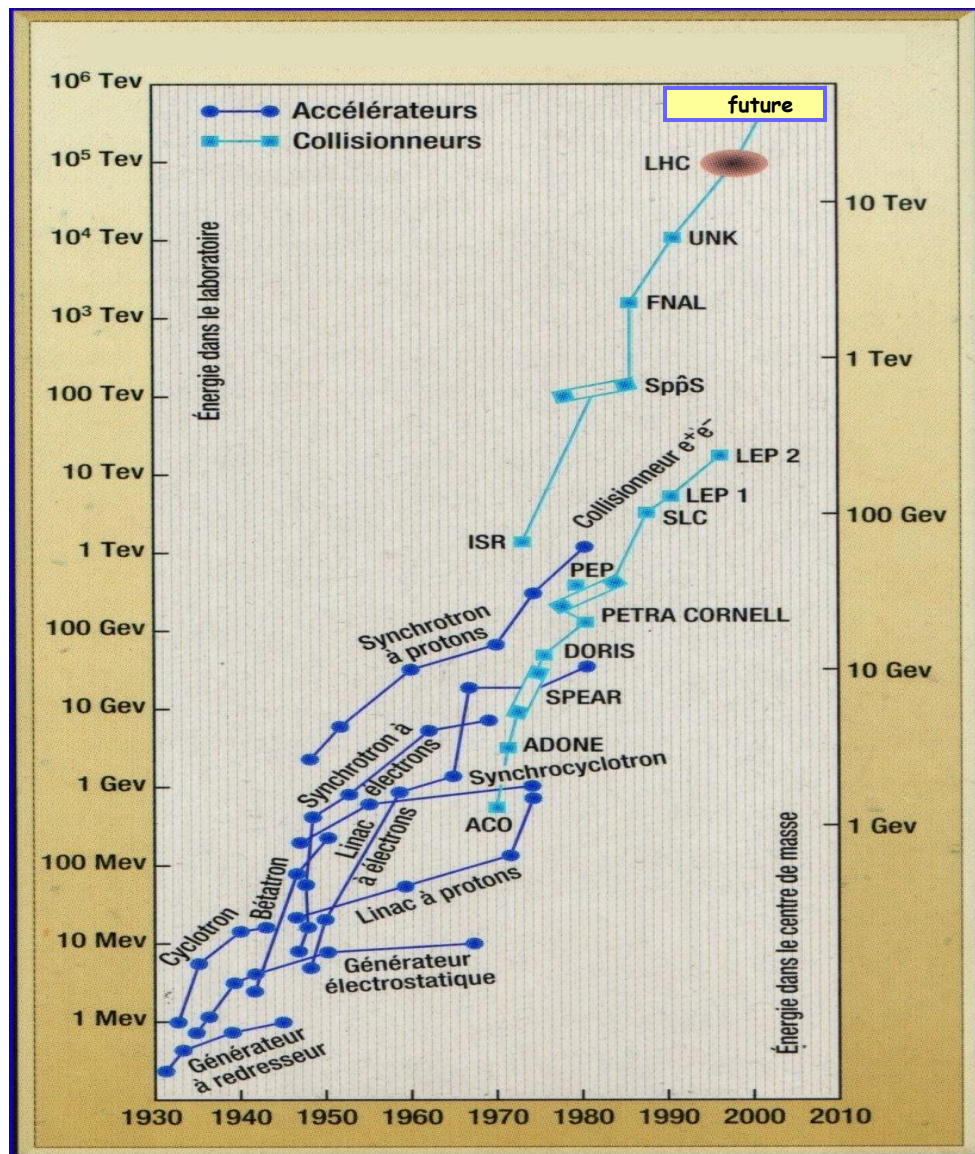


Accélérateurs: Dates Marquantes

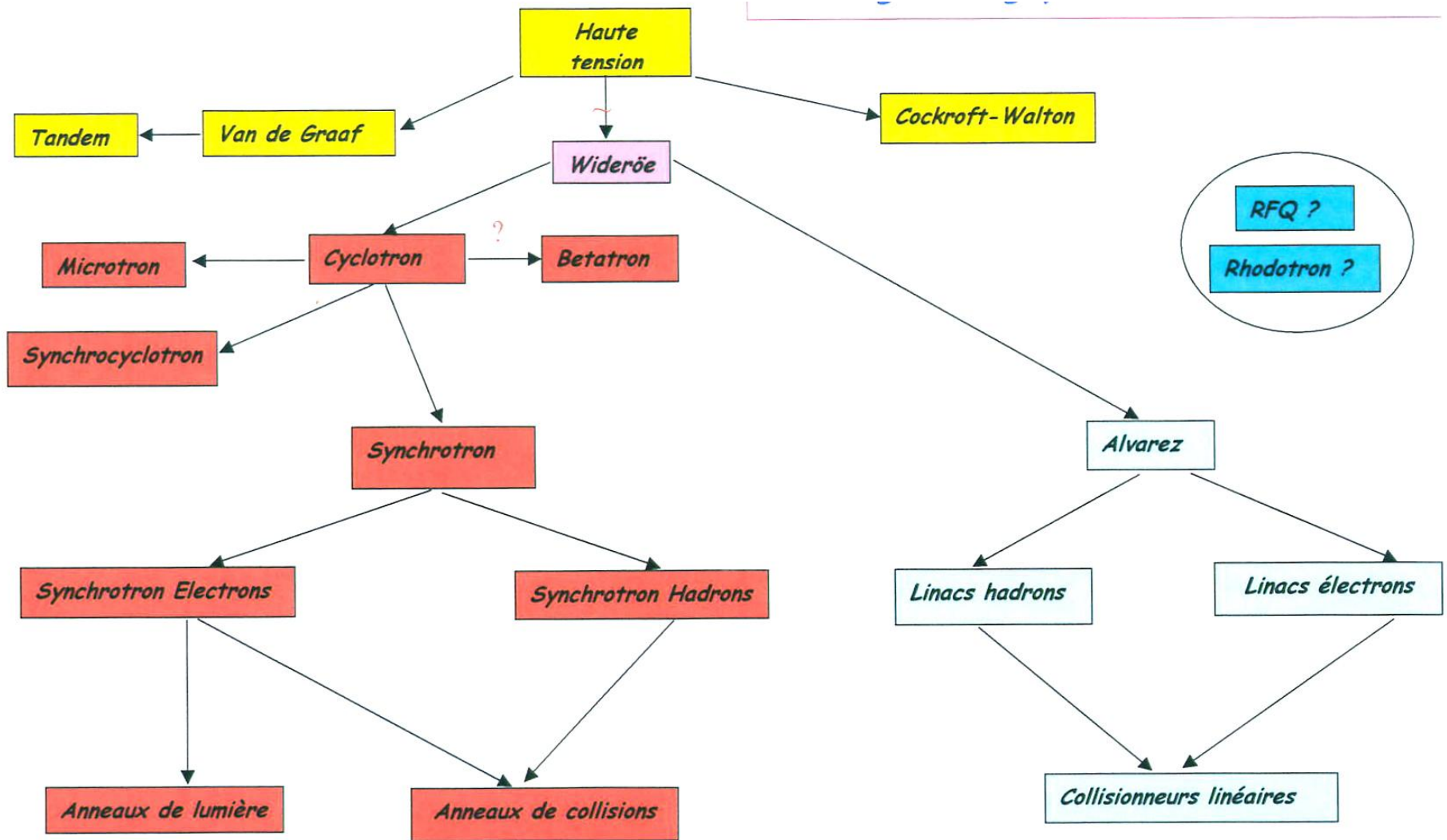
- 1er quart du 20ème siècle "Préhistoire": découvertes fondamentales avec "faisceaux" de sources radioactives (Rutherford!) déclenchent la **demande pour plus d'énergie**
- from 1928 to 1932 Cockcroft&Walton développent l'accélérateur **électrostatique de 700KV** (multiplicateur de tension), la courroie de Van de Graaff fait **1.2MV**.
- 1928 1er **Linac** par Wideroe sur le concept de Ising d'accélération résonante.
- 1929 Lawrence invente le **cyclotron**.
- 1944 MacMillan, Oliphant & Veksler développent le **synchrotron**
- 1946 Alvarez construit un **linac à protons** avec structures "Alvarez" (mode 2π)
- 1950 Christofilos brevète le concept de la **focalisation forte**
- 1951 Alvarez développe le **tandem**
- 1954 Courant, Livingston et Snyder implantent la **focalisation forte** auprès du Cosmotron Synchrotron de Brookhaven (et apprennent avec déception l'existence du brevet de Christofilos)
- 1956 Kerst propose dans une publication l'idée **du collisionneur**, mais l'obtention de taux d'évènements utiles plus tardif (cf. années 80 avec le SppS)
- 1970 Kapchinski & Telyakov inventent le **quadrupole à radio-fréquence** (RFQ).
- début 80 les **aimants supraconducteurs** augmentent considérablement la performance (énergie vs. taille), de cyclotrons, synchrotrons et collisionneurs
- mi 80 les **sources ECR** de Geller sont installées auprès des machines à ions où ils augmentent fortement l'énergie (q élevé) et disponibilité
- aujourd'hui la R&D sur les **cavités supraconductrices** aboutit à des grands gradients d'accélération, possibilité de mode CW et efficacité électrique

Le Diagramme de Livingston

- Vers 1950, Livingston fait une **observation très remarquable**:
- Si on porte l'énergie d'un accélérateur en fonction de son année de construction, sur une échelle semi-logarithmique, on obtient une **croissance linéaire**.
- 50 ans plus tard, **ceci reste toujours vrai**.
- Autrement dit, les concepteurs accélérateurs ont réussi une croissance exponentielle, tous les **dix ans**, on gagne environ un **facteur de 33**
- On note par ailleurs une **saturation de l'énergie maximale** pour une famille donnée d'accélérateurs après une certaine période de "maturation"



Arbre généalogique des accélérateurs



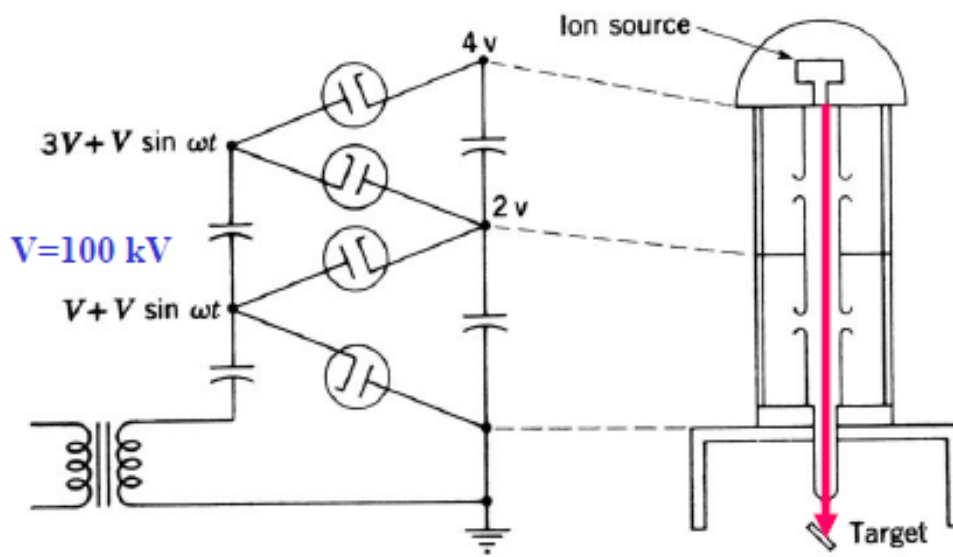
Le concept de base: accélération par haute tension statique (voir définition au début)

L'idée la plus simple :

fabriquer une tension continue la plus élevée possible et la répartir sur une série de tubes à l'intérieur desquels les ions se déplacent.

**Cockroft-Walton (1932) ,
Nobel 1951**

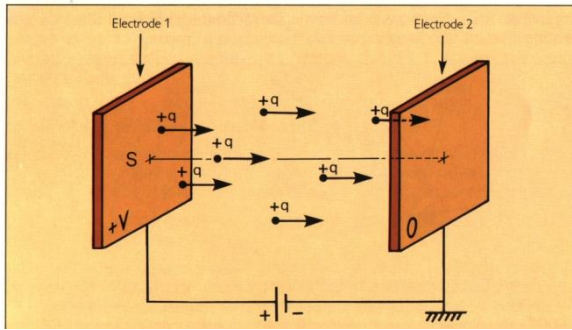
Protons accélérés à 400 keV
sur une cible de lithium →
2 noyaux d'hélium (α)



Limitation de la tension (claquages) : **maximum 1,25 MV** (Philips)

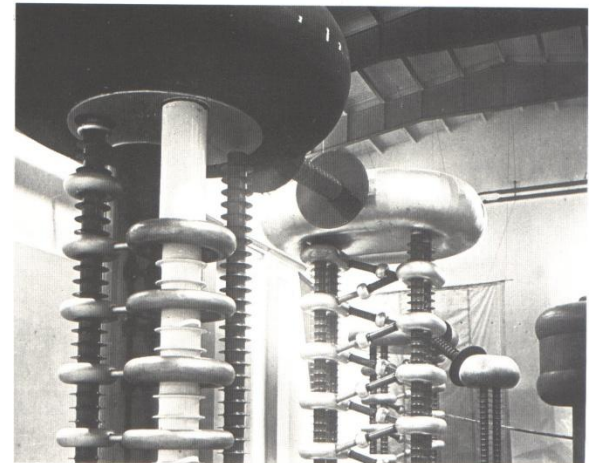
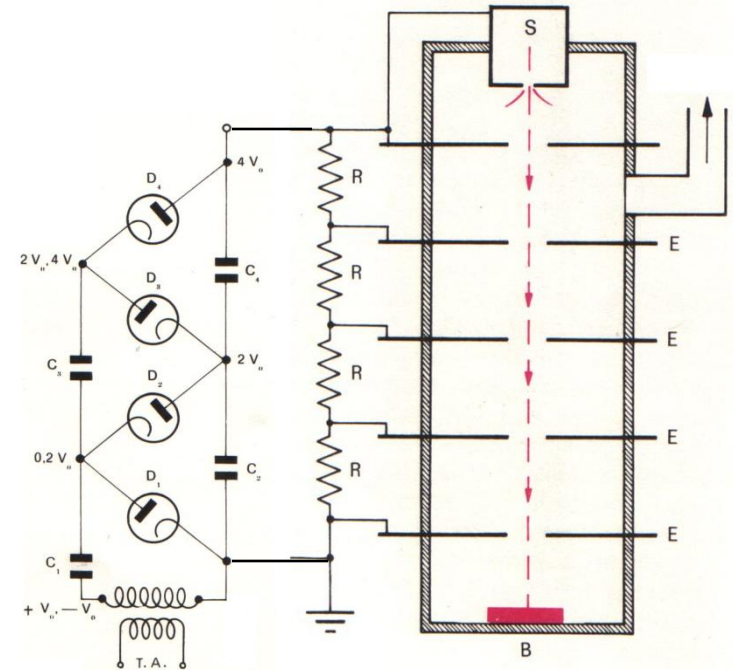
Mais le « Cockroft-Walton » est toujours utilisé comme injecteur pour d'autres accélérateurs : forts courants , $V \sim 800$ kV (PSI, LAMPF, Tevatron).

Electrostatic Accelerators (I)

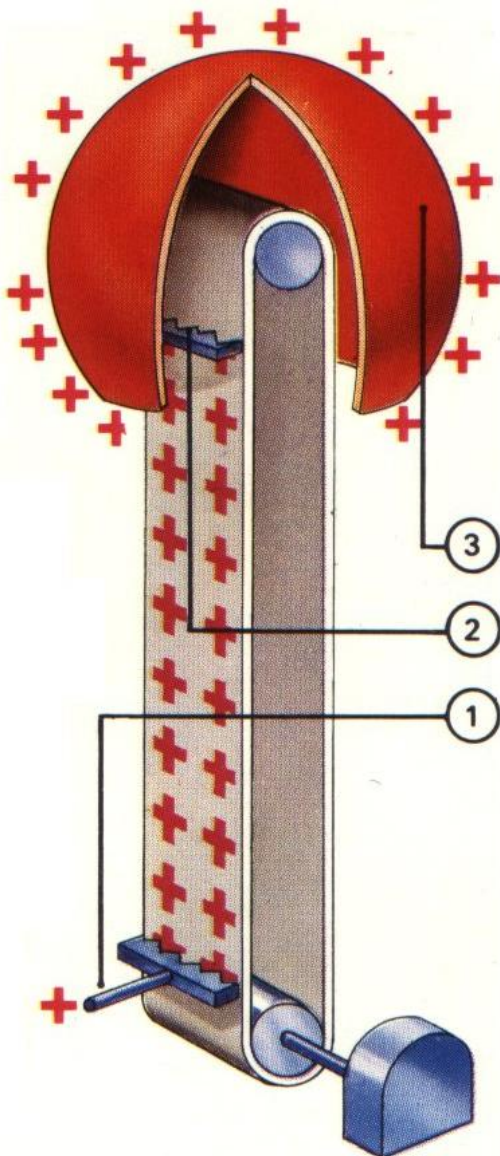


- Starting from the "elementary cell" of acceleration, (recalled left), an electrostatic accelerator is an **insulating column**

- At its entry side, an **ion source injects** the **charged particles**
- Between the entry and the exit, (here target B) a **continuous high voltage** is applied, mediated by **intermediate electrodes** for a smooth and **regular increase of the electric field**
- In a **Cockroft&Walton Accelerator**, a **rectifier-multiplier** produces the high-voltage applied to the column, see upper right figure.
- This allows to reach **high beam currents**, of interest for many applications, but the voltage is practically **limited** to somewhat above **1 MV**, because of **breakdown** of insulation. Such high voltage is quite a matter of technology knowledge, see lower right figure



Electrostatic Accelerators (II)

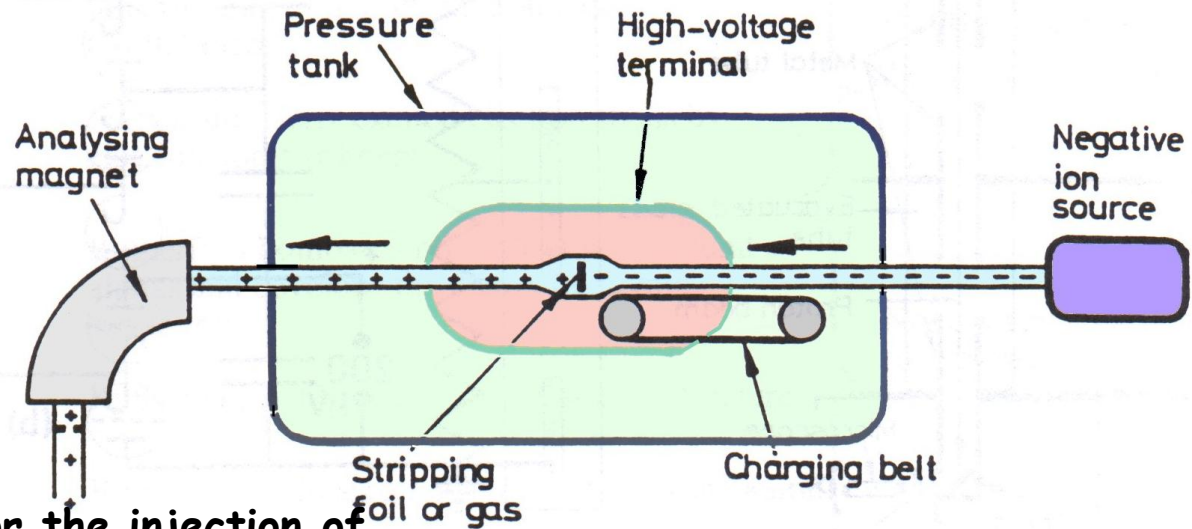


- how to increase the voltage for electrostatic acceleration?
- the concept of charge transport (see left) has been introduced by R. J. van de Graaff
- a comb-like electrode (1) sprays charges on an insulating conveyor belt (the high-voltage generator typically being again a rectifier multiplier)
- The conveyor transports the charges **inside** the sphere-shaped **terminal (3)**, which forms in fact a **Faraday cage**
- The charges are **collected** by a second comb like electrode (2) which is connected to the sphere
- consequently, the charges **accumulate** on the outside of the sphere and the **inside get charge free**, ready to accept **further charging**
- In practice, one can reach up to 25 MV, provided one uses (expensive) SF₆ gas for limiting breakdowns

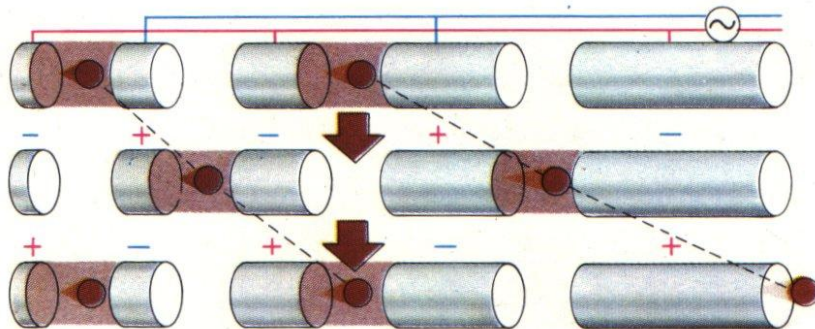
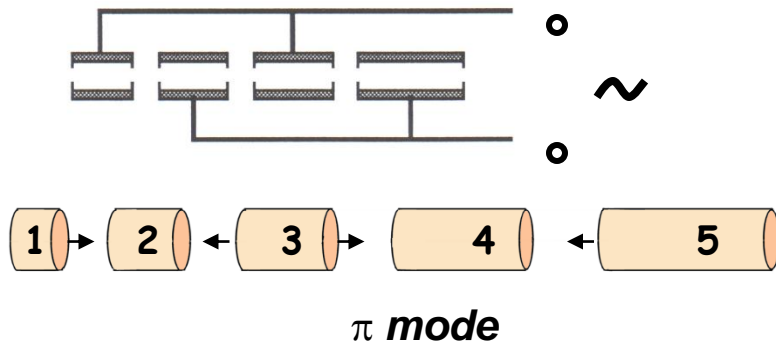
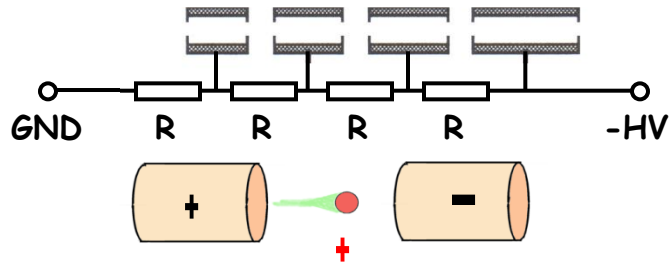
Electrostatic Accelerators (III)

the TANDEM:

- consecutive to the HV terminal, a second accelerator column is installed leading back to **ground potential**
- a stripper is installed at the terminal through which the beam particles have to pass
- this principle works only for the injection of **negative ions** because of the stripping process
- however, at typical terminal voltages, **several electrons can be stripped off**, considerably augmenting the **energy gain** of the second section
- Such a Tandem (see right the SF₆ pressure vessel of the machine at IPN Orsay containing conveyor and accelerating column), can continuously accelerate any charge-to-mass ratio with an excellent beam energy spread, but it is **limited in intensity**.
- The Orsay Tandem is presently much used for measuring fission and capture cross sections of actinides for Reactor Physics in the context of GEDEPEON activities.

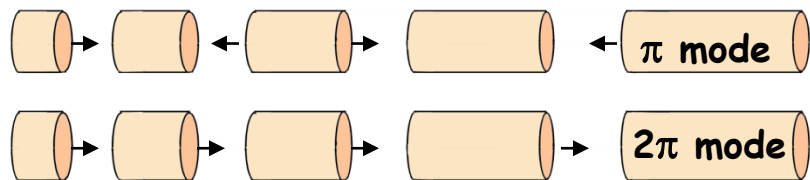


Des "électrostatiques" vers l'accélération RF



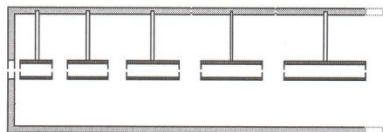
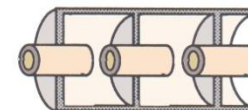
- consider an element of an accelerating column of an electrostatic accelerator
- at any moment, the electric field is in the **same direction**, allowing continuous acceleration
- consider now such a column, but driven with an alternating voltage, in such way that **consecutive electrodes** are connected to **opposite polarity** of the RF generator
- suppose now, that the RF frequency is such that it **accelerates** the particle between electrodes 1&2 (and also 3&4), whereas the field is **opposite**, at **that moment**, between accelerating gaps, 2&3 and 4&5, respectively
- if this particle arrives now at the gap between 2&3, precisely, when the RF has **changed to opposite phase**, **acceleration occurs again**, and so on.
- note, that while the polarity change occurs, the particle is in the **field-free space** of the drift tube of such a Wideroe linac. Further, to stay in phase with the RF, as the **speed** of the particle **increases**, the **length** of the drift tubes has to **increase**

Le concept du LINAC

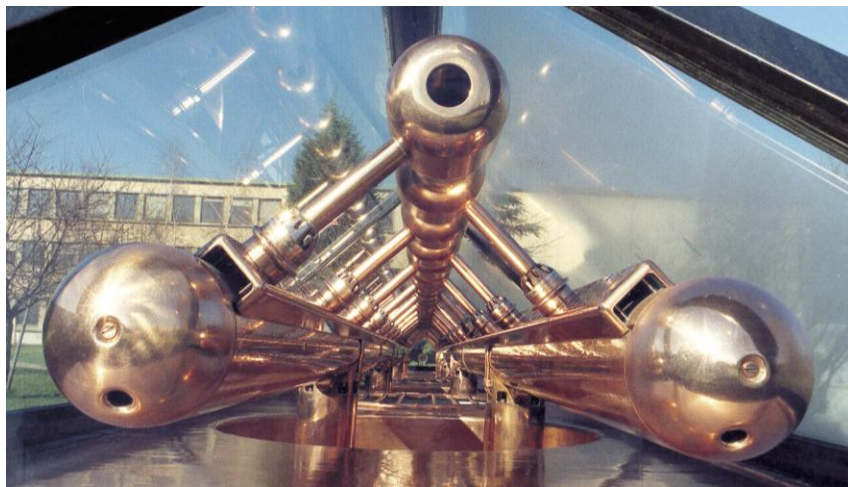


- on the preceding slide, the Wideroe linac operating in the π mode was introduced, but it is also possible to run at higher harmonic, e.g. in the 2π mode

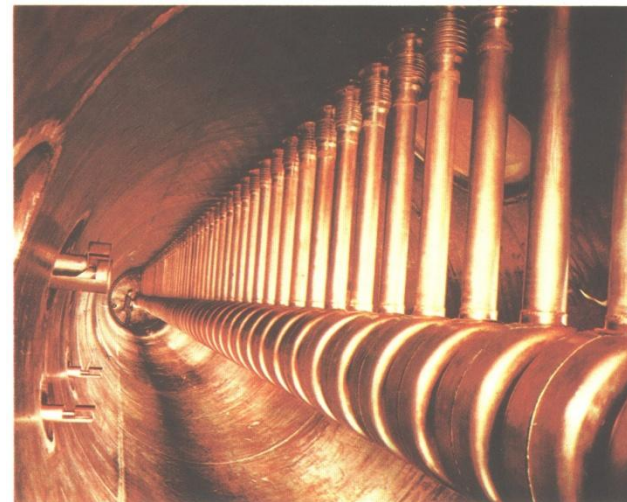
- in order to minimise the RF power deposited in the structures, the gaps and drift tubes form cavities resonant to the RF frequency



- in the 2π mode, the currents circulating in the wall separating two subsequent cavities cancel, hence one can suppress this wall. This gives the Alvarez-structure of the classical DTL

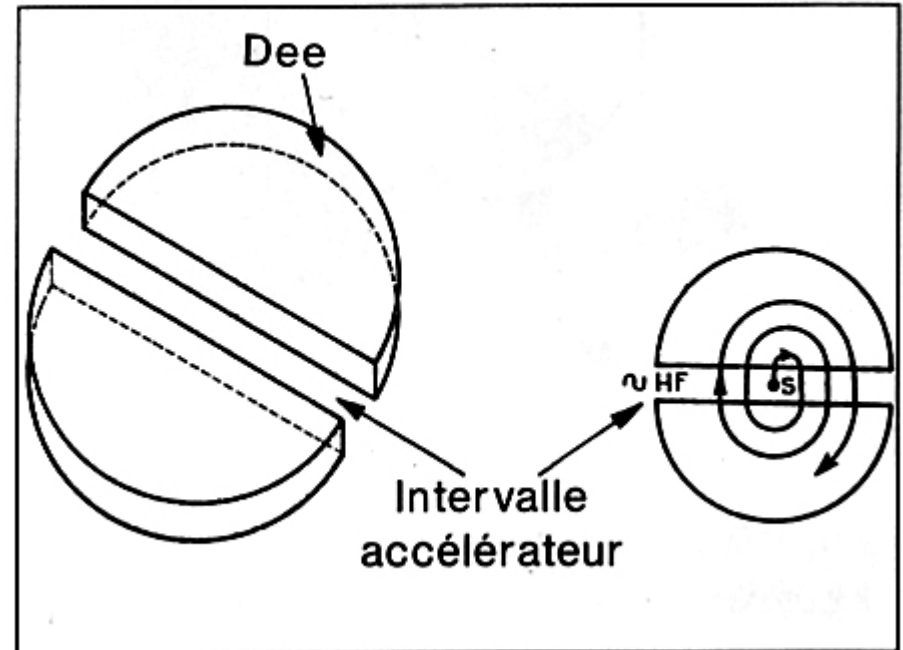
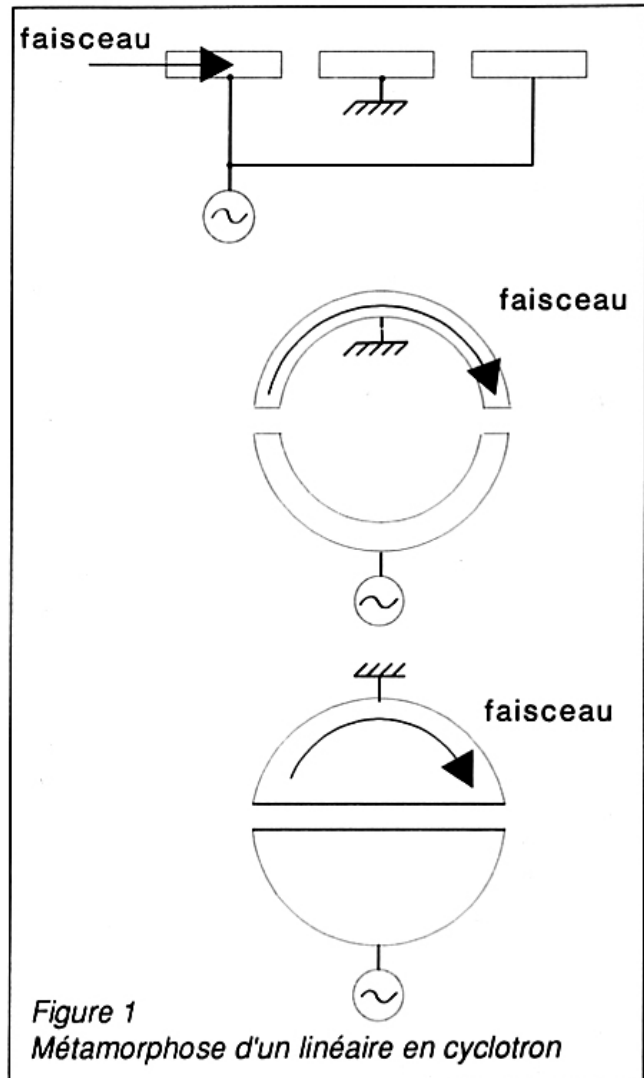


Historical examples: a Wideroe type structure (ALICE heavy ion injector, IPN Orsay)



a drift tube linac (DTL) (Saturne, Saclay)

Des accélérateurs linéaires vers les circulaires



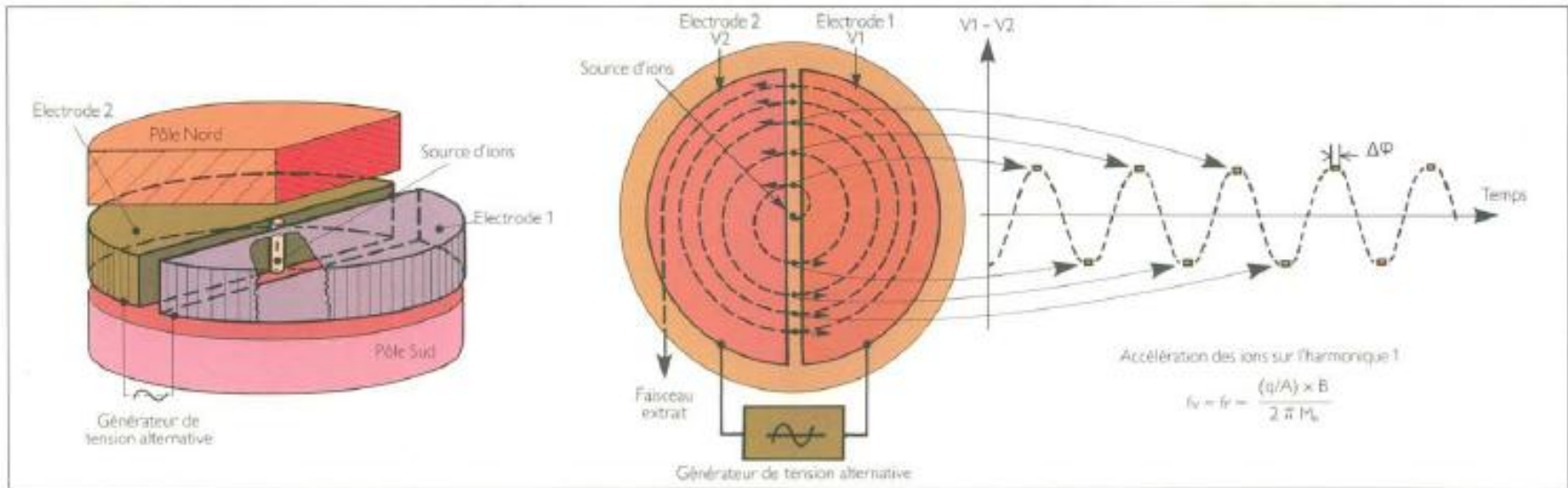
Principe du Cyclotron

Puisque le mouvement est isochrone, il suffit d'appliquer à l'électrode (« dee ») une tension sinusoïdale dont la fréquence est égale (ou un multiple de) la fréquence de rotation : $f_{HF} = h f_{rev}$.

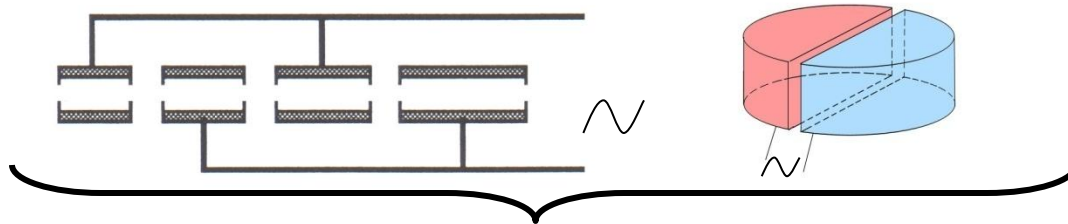
L'équation [2] s'écrit aussi :

$$v_{\theta} = QB_z r / m \quad [4]$$

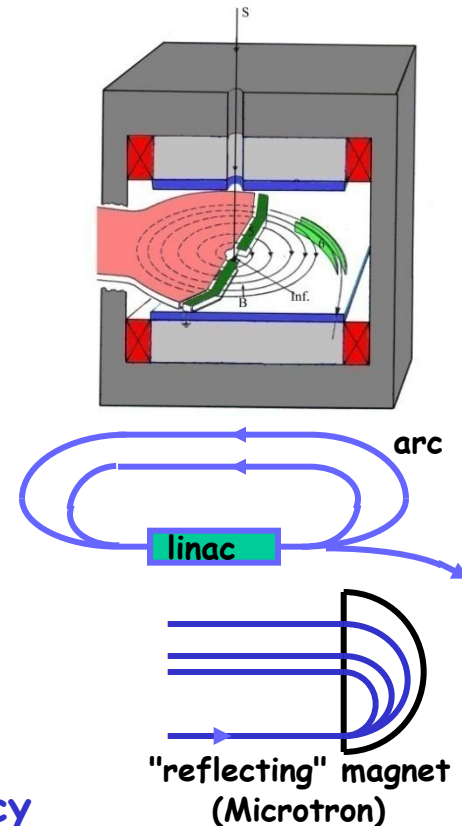
→ le rayon augmente avec la vitesse, l'ion décrit une sorte de spirale.



Properties of Cyclotrons (I)

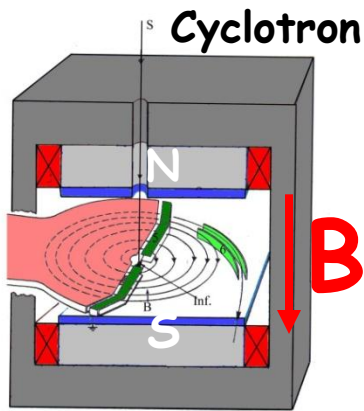


- (Intrinsically), linacs and cyclotrons both are CW machines
- The classical "2 Dee" cyclotron can be imagined by analogy as a linac with 2 drift-tubes (hence two accelerating gaps), leaving the second gap, the beam being **bend back** into the first drift tube by the overlying **magnetic field**
- Note that there actually exist "recirculating linacs", where one actually does exactly that, e.g. the 6 GeV electron accelerator of the Jefferson Laboratory (USA) has **4 arcs**, in smaller versions the 180° arc may be within the **same magnet (microtron)**. Recirculating machines work with the condition that the **velocity does stay constant (i.e. $\beta = c$)**
- The frequency of revolution, the so-called cyclotron frequency has to be **constant**, so that the particle always "sees" the **same RF phase**, with ($W_{\text{total}} \approx W_0 = m_0 c^2$) it can be expressed as

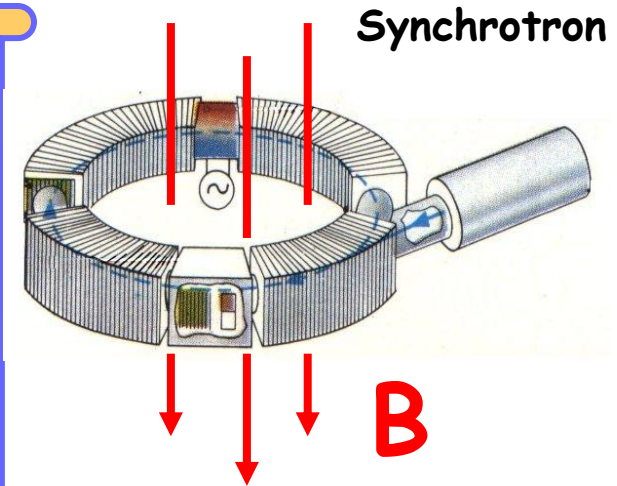


$$\begin{aligned}
 \nu &= 1/T = v/2\pi\rho = v m c^2 / 2\pi\rho m c^2 = (c/2\pi\rho) (\rho c / W_{\text{total}}) \\
 &= c q c B_m \rho / 2\pi\rho m_0 c^2 = q B_m / 2\pi m_0
 \end{aligned}$$

Circular Accelerators: Useful Definitions & Formulas (I)



- a circular accelerator is a machine which has a **median plane**
- the median plane is a plane in which the magnetic field is perpendicular in all points
- the so-called reference particle evolves in this plane



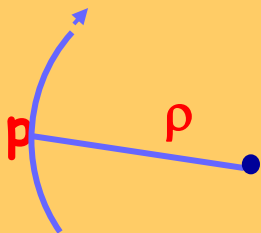
Lorentz force:

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = d\mathbf{p}/dt$$

(relativistic) Kinetic Energy $W_{\text{kin}} = (pc)^2$

$$(pc)^2 = W_{\text{total}}^2 - W_0^2 \text{ with } W_0^2 = m_0^2 c^4$$

Examples: electron rest mass: $m_0 = 511 \text{ KeV}/c^2$, proton rest mass $m_0 = 0.938 \text{ GeV}/c^2$



Neglecting the comparatively small accelerating term $dp/dt = qE$ for a moment, a reference particle with mass m in a given orbit ρ will have $|p| \approx \text{constant}$ in each point. The Lorentz force will be in equilibrium with the centrifugal force:

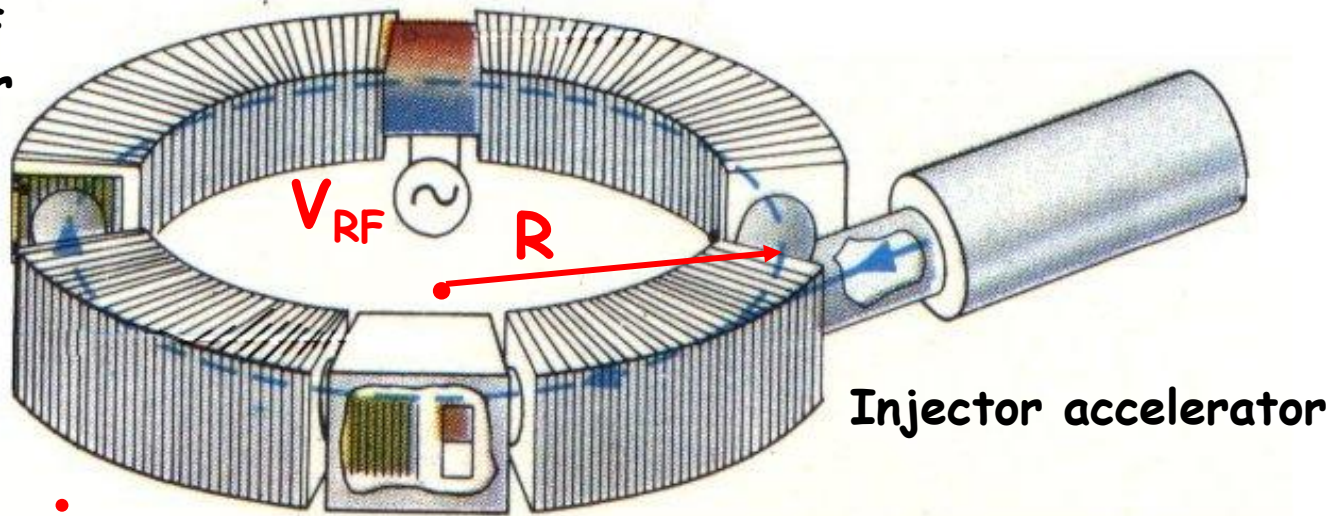
$$mv^2/\rho = dp/dt = qvB$$

Properties of Synchrotrons (I)

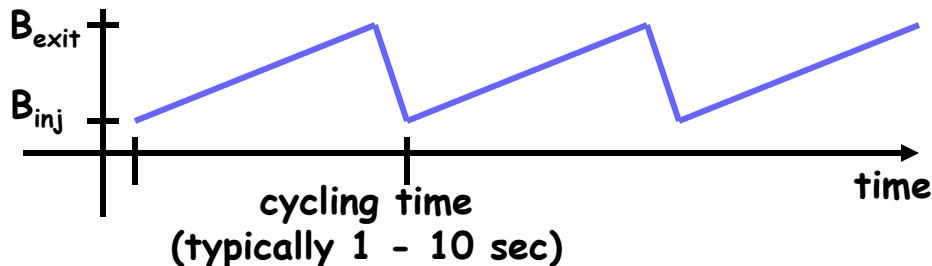
- the accelerating RF is applied to one (or more) cavities

$$V_{RF} = V_0 \sin \omega t$$

- Synchrotron = "Ring"-Accelerator with radius R



$$\delta W = 2\pi \rho q \rho \dot{B}_m \Rightarrow \delta W = 2\pi R^2 q \dot{B}_m$$



that means, that we have a constant energy gain per turn,

which is equivalent to a linear increase, in time, of the average magnetic field B_m

- that means also, that this energy has to be provided by the accelerating radiofrequency cavities, hence

$$\delta W = q V_{RF} \sin \Phi_S$$

Properties of Synchrotrons (II)

- synchrotrons accelerate up to the **highest energies**, determined by the bending fields (today, superconducting magnets approach $B = 10\text{T}$) and radius of the machine, recall $W [\text{MeV}] = 300 Q B \rho [\text{Tm}]$, and it can be used as a **collider**
- a synchrotron is a **pulsed machine**, typical repetition rates are about **1 Hz**
- the implantation of the principle of **strong focusing** (see preceding lecture) in synchrotrons allows the acceleration of **quite strong beams**, in fact, up to about 10^{14} charges can be extracted, corresponding to internal beams circulating in the Ampère-regime.
 - The low-duty factor, however, makes that the **time averaged intensities** are in the **μA range**, and therefore, a synchrotron is not considered for ADS
- the **major components** of a **synchrotron**
(photo: MIMAS, SATURNE)
 - the **bending** elements, magnetic **dipoles**
 - the **focusing** elements, magnetic **quadrupoles**
 - the **accelerating** elements, **RF cavities**



Properties of Cyclotrons (II)

- Cyclotrons ($\delta B_m = 0$) are intrinsically low-energy machines ($W_{kin} \ll W_{total}$), thus,

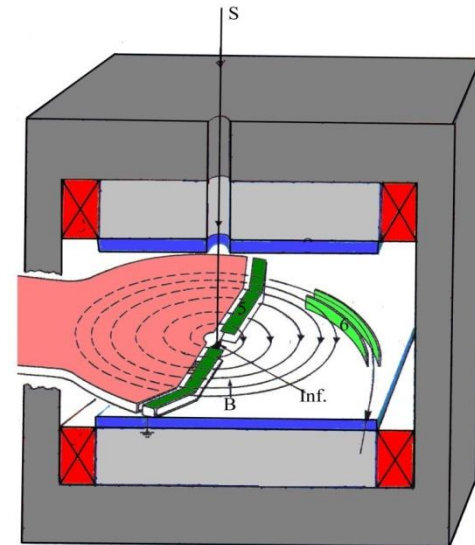
from

$$2 \delta W / W = 2 q c (q c B_m \rho) (r \delta B_m + B_m \delta \rho)$$

- one obtains

$$\delta W_{kin} / W_{kin} = 2 \delta \rho / \rho$$

- which shows that the pitch of the spiral formed by the beam in the cyclotron is indeed small, just **twice** the ratio of the **energy change**
- a cyclotron typically has 1-4 accelerating cavities, with an energy gain of up to a few hundred keV
- thus the beam typically makes **hundreds of turns** in the accelerator, and the turn separation is rather **small**
- this actually confirms our initial assumptions of a "closed turn" with $|p| \approx \text{constant}$ for the derivation of the equations, but it also hints that **efficient extraction of the beam is a major challenge**
- With $W_{kin} \ll W_{total}$ one also derives the formulas where the energy is in MeV, and A the mass-number of the accelerated particle, e.g. A=1 for the proton. The factor K is often used to describe a cyclotron's characteristics



$$W_{kin}/A = 48 (B_m \rho)^2 (Q/A)$$

or

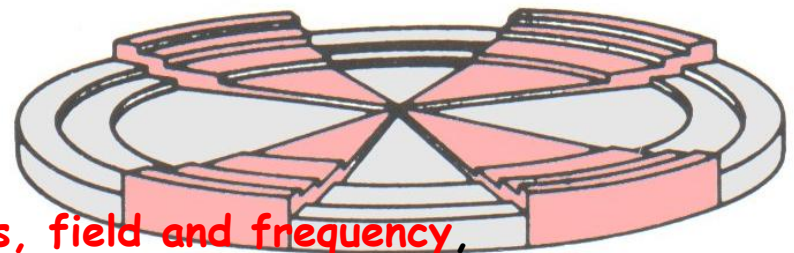
$$W_{kin}/A = K (Q/A)^2$$

Properties of Cyclotrons (III)

- the preceding slide derived the expression for the cyclotron frequency ν

$$\nu = qB_m / 2\pi m_0$$

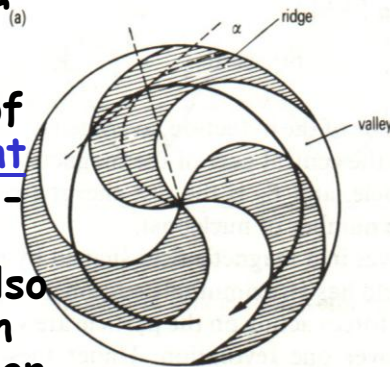
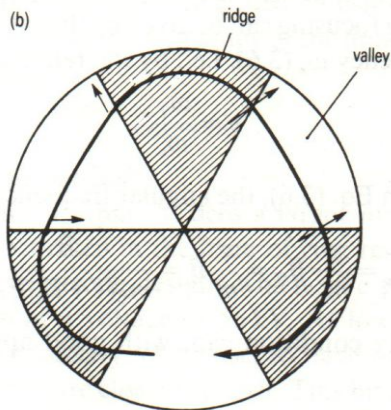
showing the link between **mass, field and frequency**, note, that this can be used for **high-precision nuclear mass measurements**



- but the formula, even more importantly, also suggests how to overcome the initial relativistic effects in a cyclotron (starting around 20 MeV for a proton): the relativistic mass increase with increasing $\beta=v/c$ of $m=\gamma \cdot m_0$, $\gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$ can be compensated by **correspondingly increasing the magnetic field** in order to maintain the frequency ν constant, this can be done by shaping the poles (see figure) and adding "trim coils", such an accelerator is called an isochroneous cyclotron, varying ν , however, is technically challenging, and the corresponding accelerator, the synchrocyclotron, is necessarily a pulsed, **weak current machine**

- unfortunately, a cyclotron can not have any **direct focusing elements** inside and that for flight paths which **exceed kilometers**

- The way to overcome partially the absence of vertical focusing, is to use alternate gradient focusing (see 2nd lecture), by passing in successively in sectors of **strong and weak** (or zero fields). A **radially decreasing field** has also been shown to work, but of course this is in **contradiction to the relativistic effect correction**



Applications des Accélérateurs

- microscopes d'un **pouvoir de résolution ultime** grâce aux accélérateurs
 - **les photons et les neutrons** sont extrêmement utiles pour la recherche en physique des solides, physique atomique, nouveaux matériaux chimie, biologie, pharmacologie, ... etc.
 - grâce à **la spectrométrie de masse par accélérateur** il est possible de faire de la datation, de surveiller l'environnement....
 - les **accélérateurs d'ions de basse énergie** permettent une panoplie d'analyses dans des domaines très variés (cf. l'accélérateur du Louvre)
- sources de radiation pour applications nombreuses
 - micro-lithographie, stérilisation de nourriture et d'autres objets, matériaux, déclencheurs de réactions chimiques
- en médecine nucléaire
 - production de **radio-isotopes**
 - **thérapie de cancers**, des milliers de sources de rayons-x et d'électrons dans les hôpitaux, puis, voir plus loin, la proton (hadron-) thérapie
- et puis pour l'aval du cycle du combustible nucléaire

Nombre approximatif de différents accélérateurs

Physique " ν et Φ " :	150	Radiothérapie :	4000	Radioisotopes médicales :	200
"Recherche" :	800	Appl. Industr. :	1500	Machines Ray. Synchr. :	50
Modifications de Surface (R&D + Industr.) :	1000	Implanteurs d'ions :			2000

Analyses Structurelles de Macromolécules :

Complémentarité du Rayonnement Synchrotron et des Neutrons

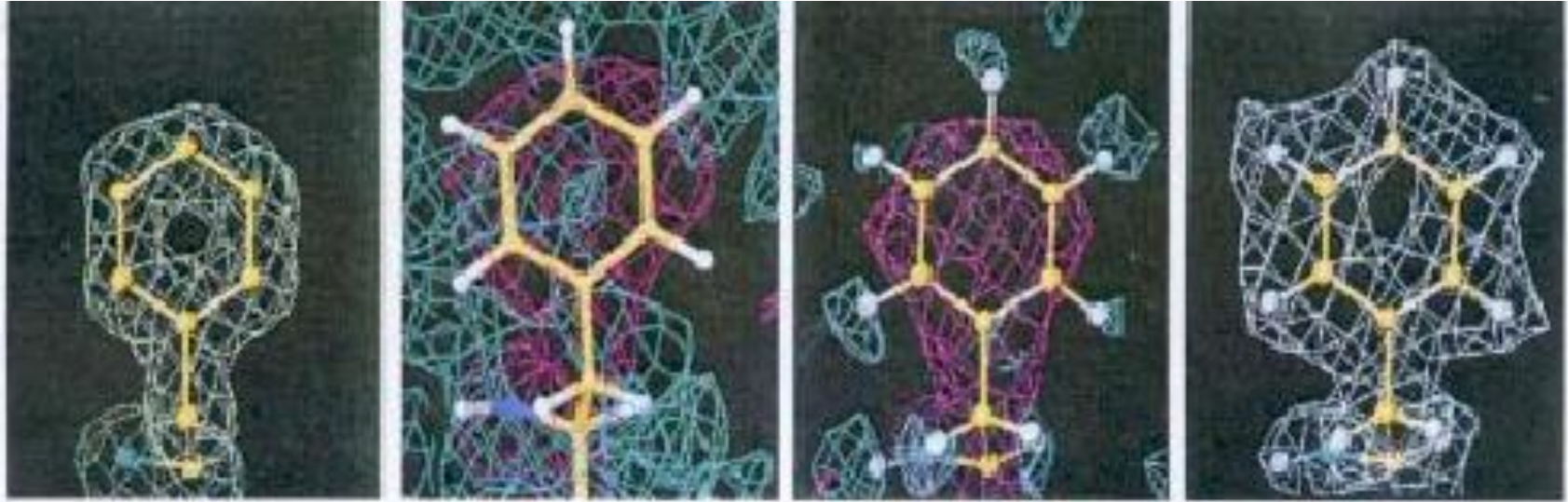


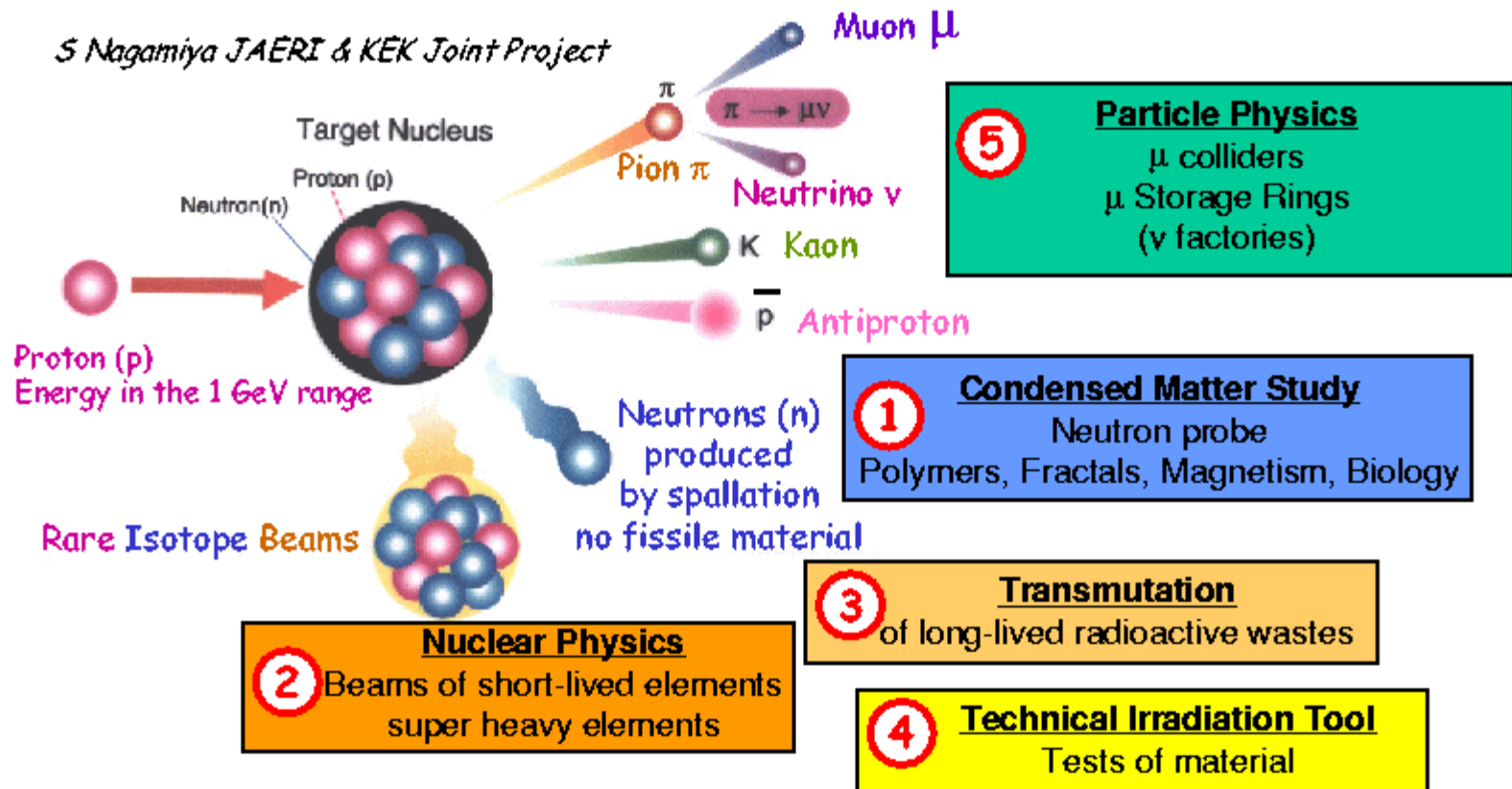
Figure 3. Locating hydrogen positions in a residue of myoglobin, (A) using X-rays, (B) using neutrons and an unlabelled sample, (C) the calculated map equivalent to (B), and (D) using neutrons and a fully deuterated sample. (from Shu, Ramakrishnan and Schoenborn, Proceedings of the National Academy of Sciences, 97(8), 3872-3877, (2000)).

Extrait du rapport: Neutrons in Biology, Workshop Juillet 2001, School of Biochemistry and Molecular Biology, Université de Melbourne, Australie

La Spallation produit des particules secondaires pour de très nombreux domaines

Secondary Beams produced by a **high energy proton** in a target
5 applications in fundamental and applied Research

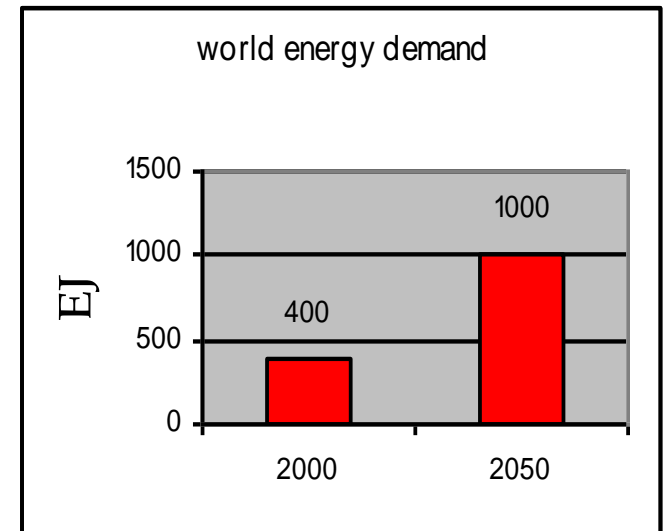
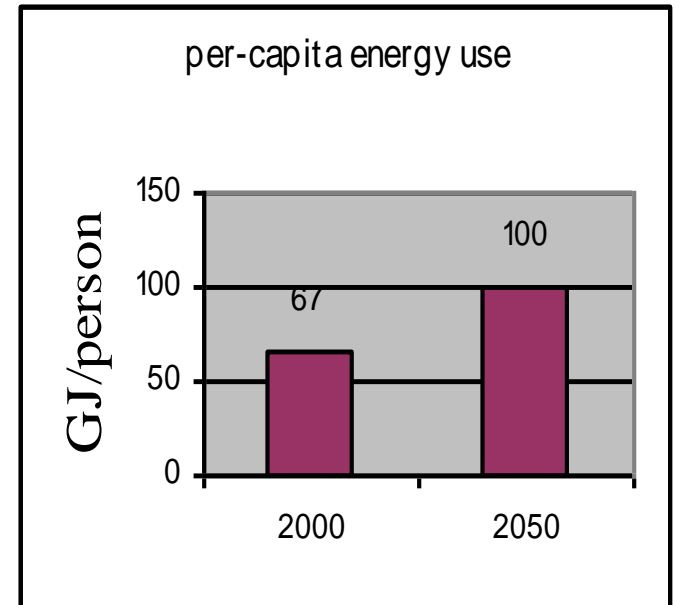
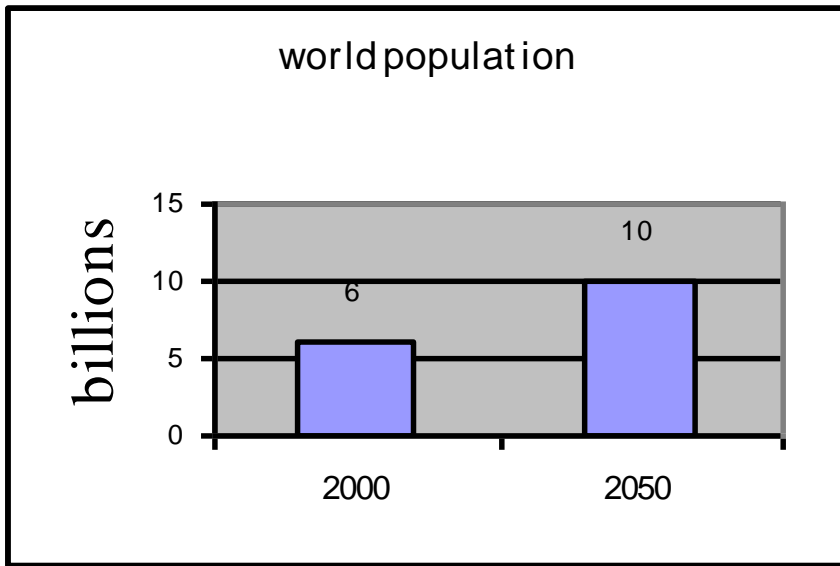
S Nagamiya JAERI & KEK Joint Project



JL LACLARE, CONCERT team, IEEE 2000 NSS-MIG in Lyon, jllaclare@cea.fr

2

Growth in World Energy Demand ("typical" predictions)



also "typical":
electricity = 1/3 of primary energy
electricity = 40% of world's CO₂ emissions

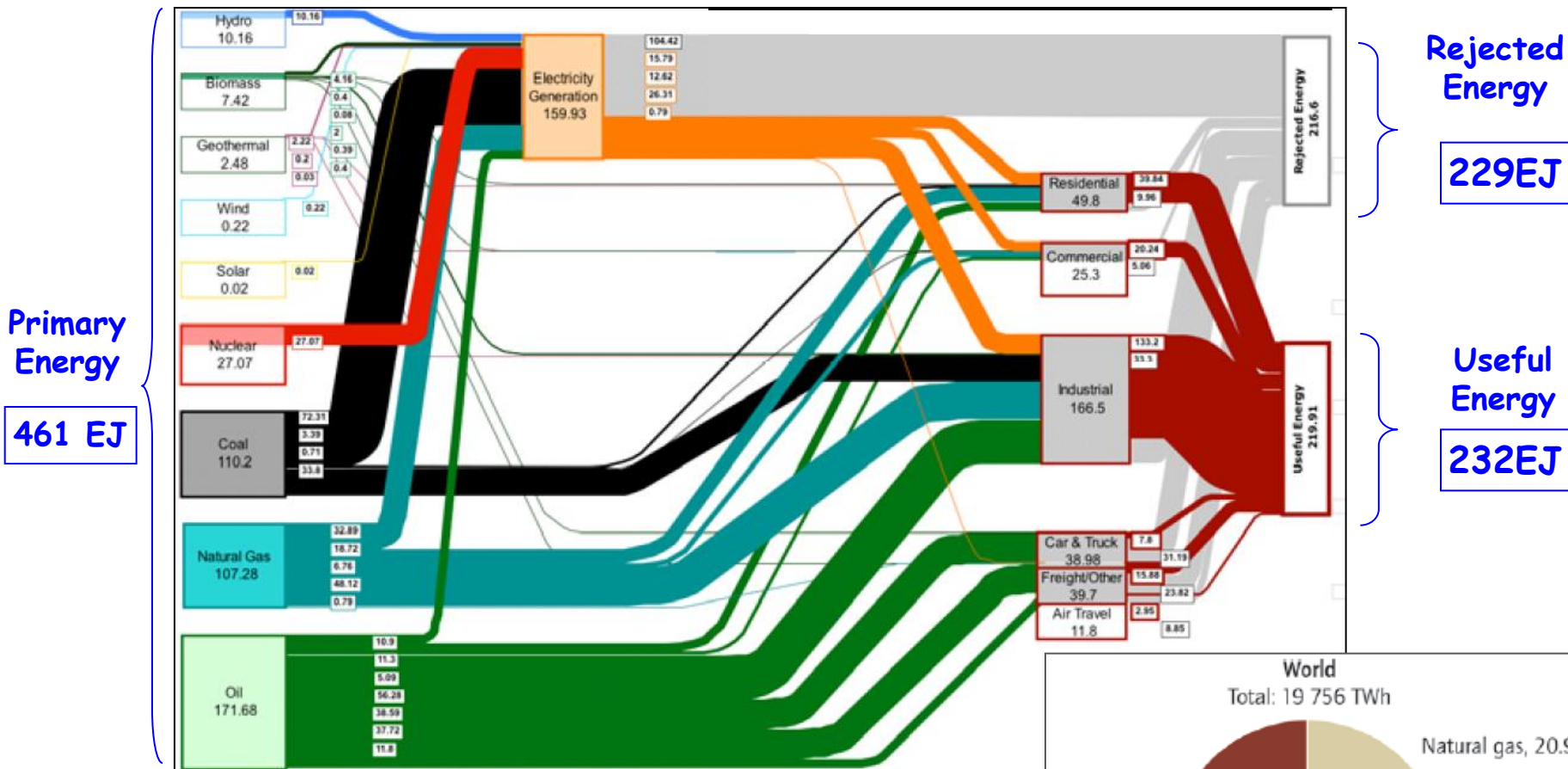
Nuclear share of electricity:
17% world-wide
35% Europe
78% France

Urgency of knowledge-based approach

Common,
but not "knowledge based" opinions/misconceptions
(alas, often voiced by political ecologists)

- We have just to replace fossile energy (nuclear) sources by "renewable" energies
- Sufficient initial public subsidizing will be a quick means to reach economic competitiveness for any "renewable" energy through mass-production
- It is impossible to solve the nuclear waste issue
(gegen Kernmüll kan man "bekanntlich" nichts tun)

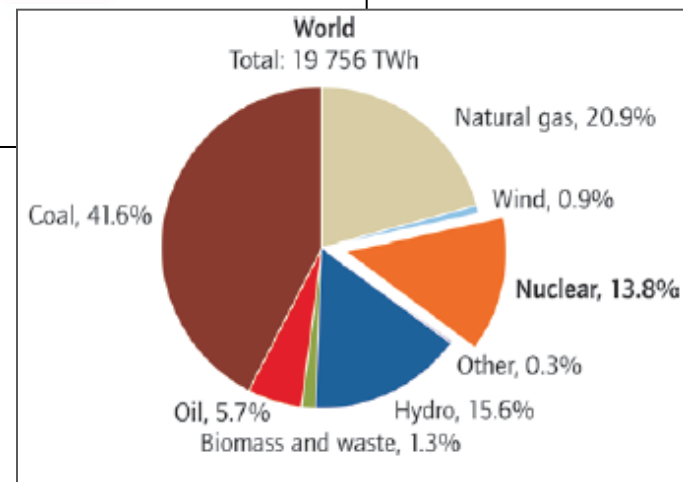
2005 World Energy Flow Diagram



Source: Lawrence Livermore National Laboratory
chart figures in quads - 1 quad=1.05 EJ

electricity = 1/3 of primary energy
electricity = 40% of world's CO₂ emissions

Electricity generation worldwide
(OECD, 2007)



Le "casse-tête" énergétique

Les hypothèses pour 2050

- * La consommation d'énergie n'augmentera que d'un facteur 2 (économie d'énergie !)
- * L'émission de CO₂ sera réduite d'un facteur 2

Consommation	2005			2050	
	~10 Gtep	(% de 10 Gtep)		20 Gtep	(% de 20 Gtep)
Fossiles	7.9	→ 78%	: 2	4.1	20%
Bois+déchets	1.0	→ 10%	x 3	3.3	17%
Hydraulique	0.6	→ 6%	x 2	1.2	6%
Autre renouvelables*	0.05	→ 0.5%	x 100	5.4	27%
Nucléaire	0.6	→ 6%	x 10	6.0	30%

*Solaire thermique et photovoltaïque, éolien, géothermie, biomasse

Equivalences de différentes énergies primaires



1 tonne de pétrole



1,7 tonnes de charbon



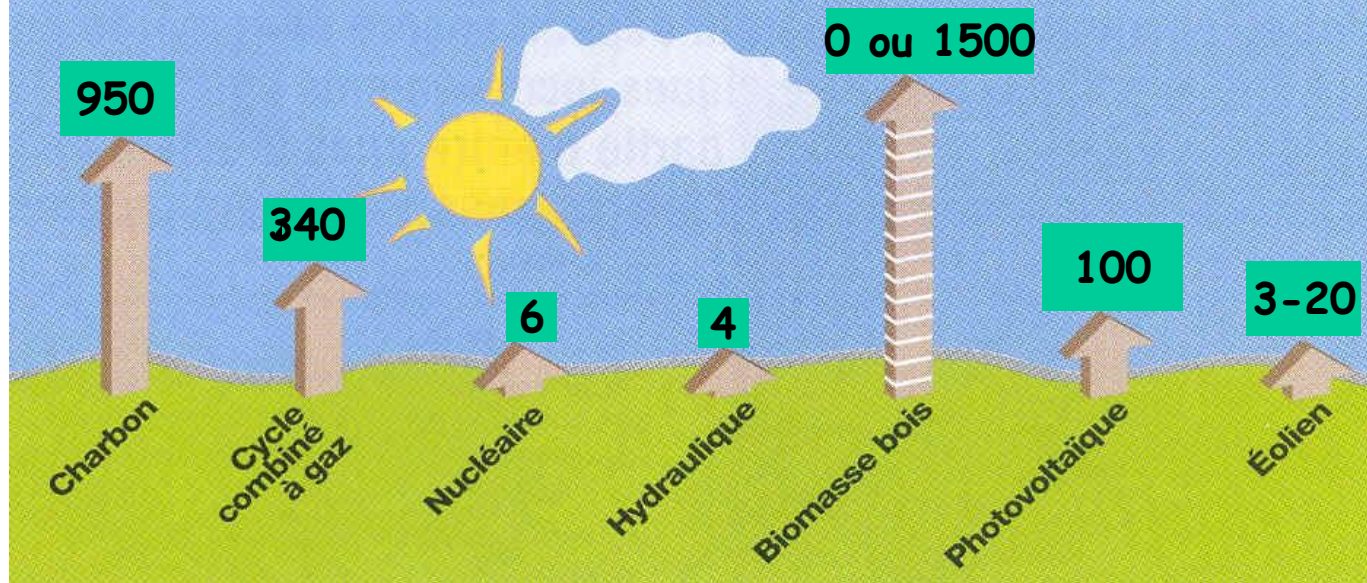
3,3 tonnes de bois



0,5 gramme de matière fissile

Émissions de CO₂ selon les modes de production de l'électricité

(analyse du cycle de vie* - en g/kWh)



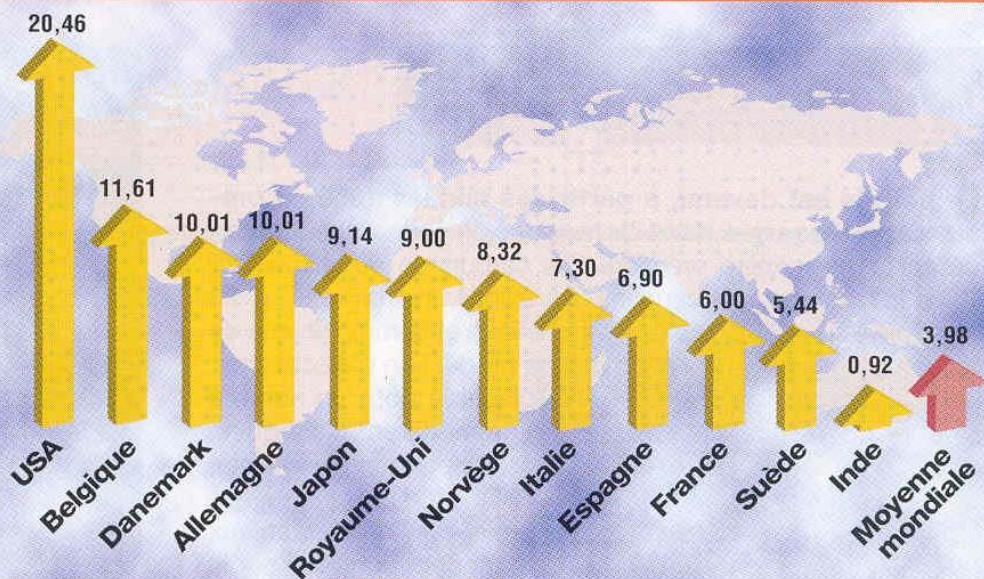
Autres énergies fossiles

Fioul: 800 g/kWh

Gaz: 570 g/kWh

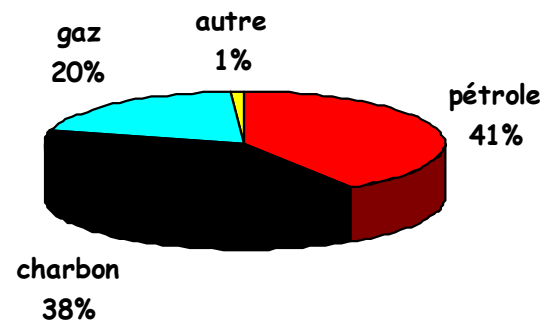
L'émission de CO₂ : quelques statistiques

Émissions de gaz carbonique dues à l'énergie
(en tonnes de CO₂/habitant, 1999)



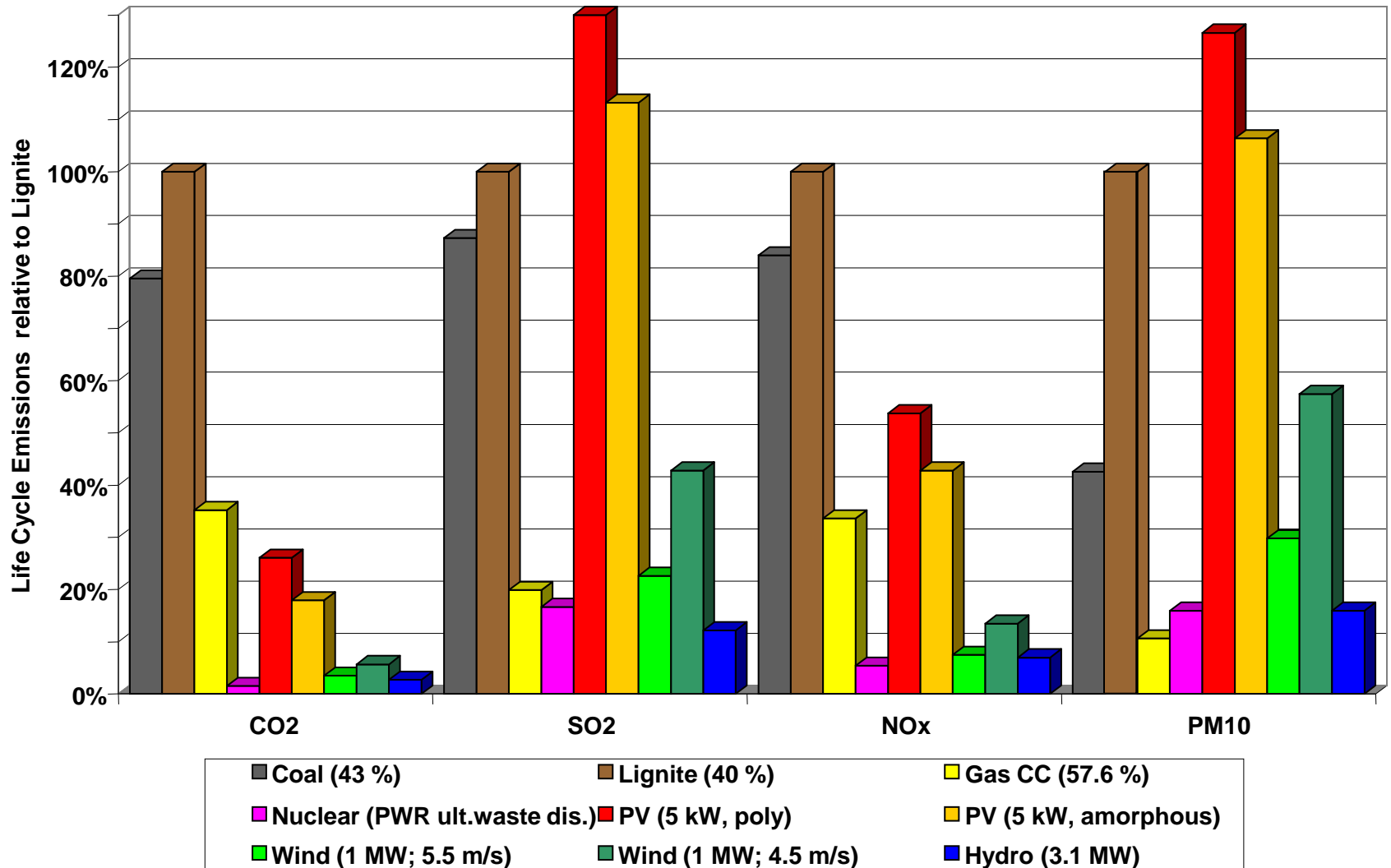
Total de CO₂ émis:
24 milliards de tonnes par an

Les Énergies primaires responsables
de l'émission du CO₂



Emission de polluants pour le cycle de vie normalisée à la lignite

From A. Voss (IER Stuttgart)



Besoins en Matériaux

	Iron [kg / GWh _{el}]	Copper [kg / GWh _{el}]	Bauxite [kg / GWh _{el}]
Coal (43 %)	2308	2	20
Lignite (40 %)	2104	8	19
Gas CC (57.6 %)	969	3	15
Nuclear (PWR, ult. waste dispo.)	445	6	27
PV poly	6708	251	2100
(5 kW) amorph	8153	338	2818
Wind 5.5 m/s	5405	66	54
(1 MW) 4.5 m/s	10659	141	110
Hydro (3.1 MW)	2430	5	10

Source: Marheineke 2002

Rejets par an et par habitant en FRANCE

- ❑ Industriels: 2,5 tonnes dont 100 kg toxiques
- ❑ Ménagers: 0,8 tonne
- ❑ Dioxyde de carbone CO_2 : 6 tonnes
- ❑ Nucléaires: 1 kg dont 100 g de moyenne et forte activités

Generations of nuclear power plants

Generation I

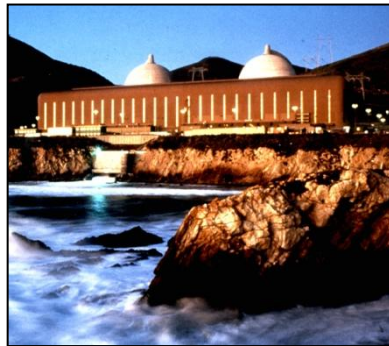
- Early prototype/ demo reactors
 - Shippingport
 - Dresden, Fermi I
 - Magnox



- First demo of nuclear power on commercial scale
- Close relationship with DOD
 - LWR dominates

Generation II

- LWR-PWR, BWR
 - CANDU
 - HTGR/AGR
 - VVER/RBMK



- Multiple vendors
- Custom designs
- Size, costs, licensing times driven up

Generation III

- ABWR, System 80+, AP600, EPR



- Passive safety features
- Standardized designs
- Combined license

Generation IV

- Highly economical
- Proliferation resistant
- Enhanced safety
- Minimize waste

Atoms for Peace

TMI-2

Chernobyl

from van Heek
Groningen Energy Convention 2005

1950

1960

1970

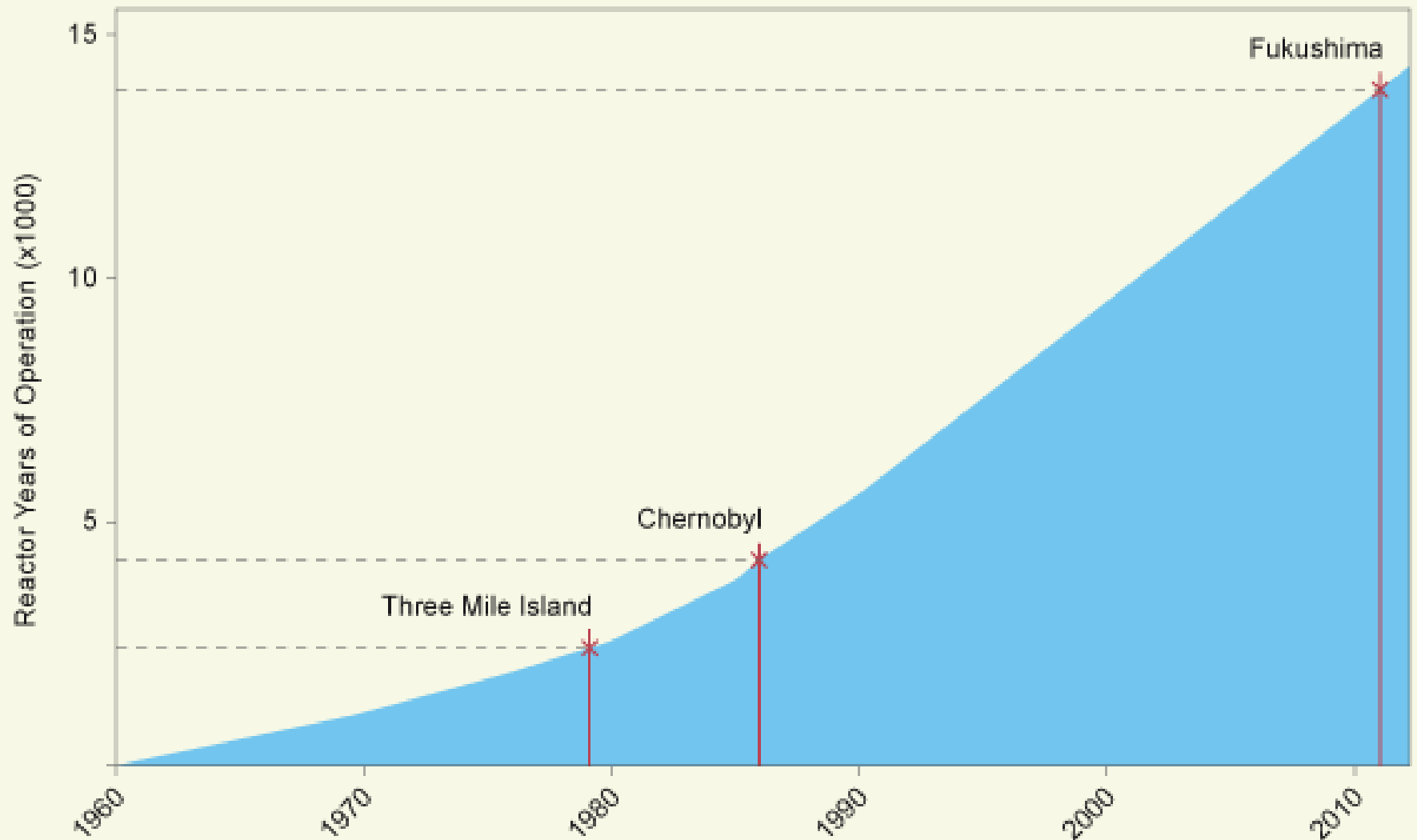
1980

1990

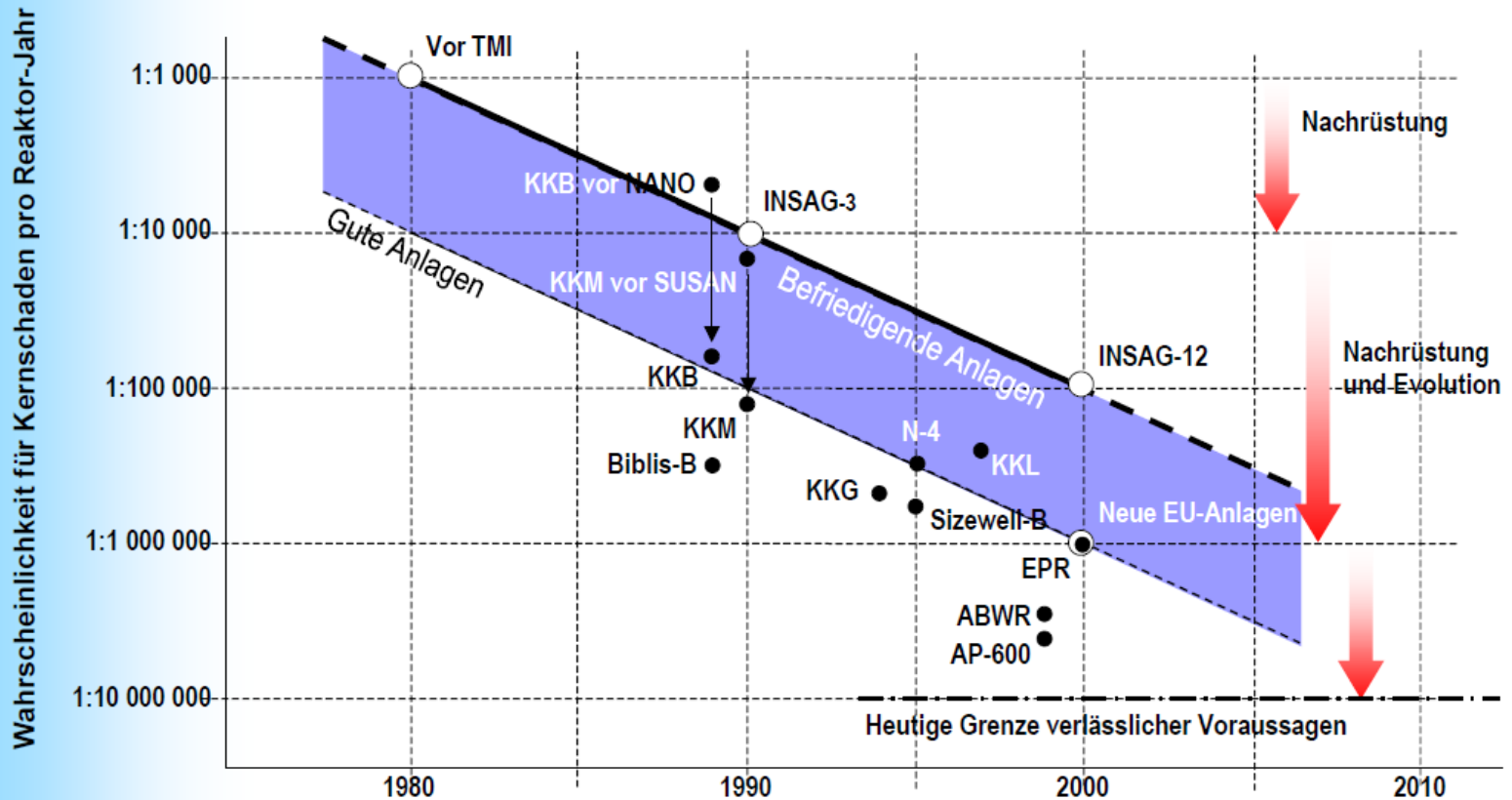
2000

Sûreté 1

Cumulative Reactor Years of Operation

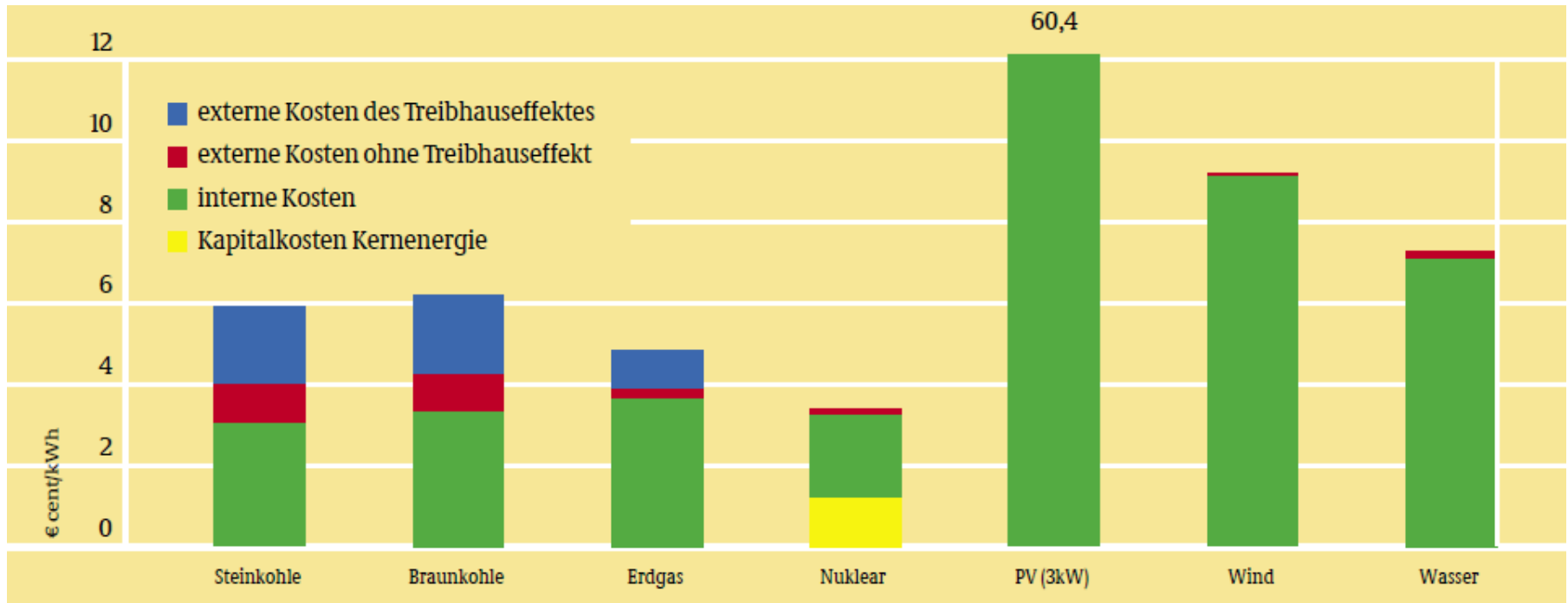


Laufende Verbesserung der Sicherheit



Quelle : IAEA, 1995

Le "vrai" coût pour la société

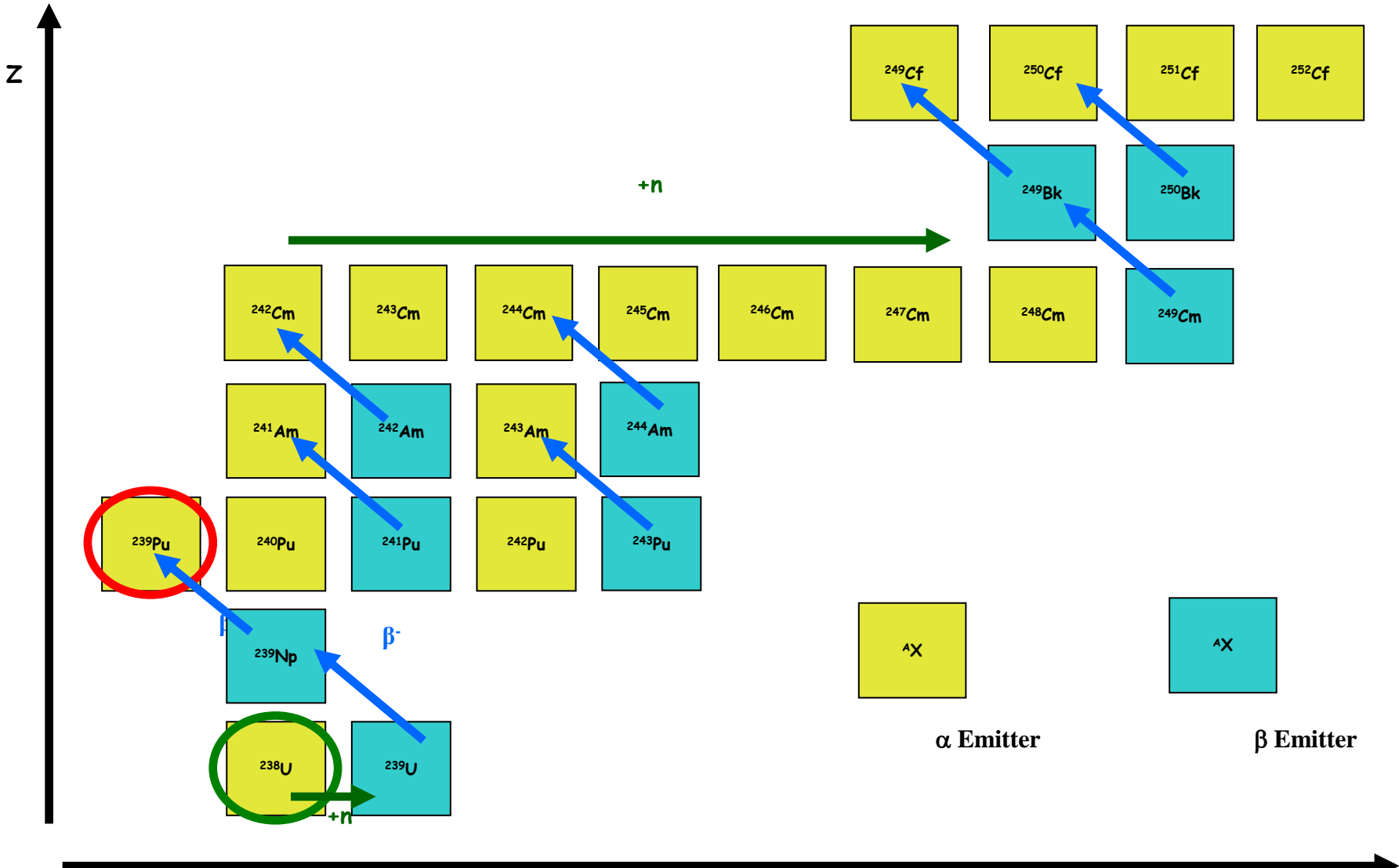


Source Hirschberg, PSI (2004)

Quelques faits relatifs à l'énergie nucléaire

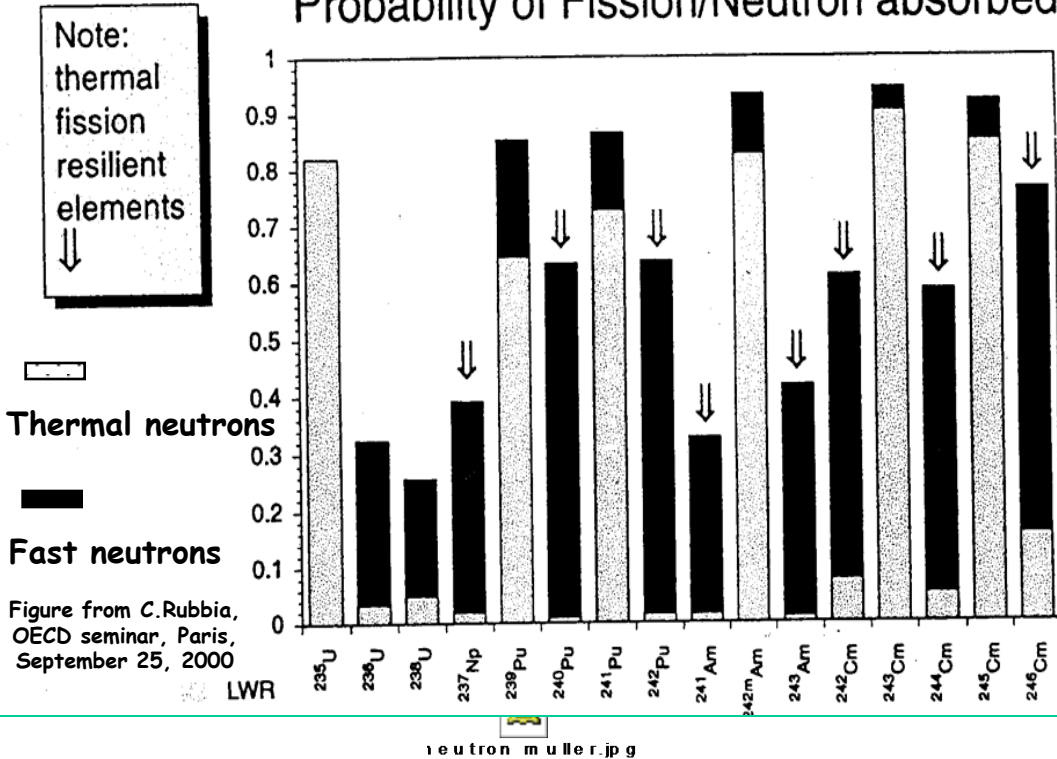
- **L'Énergie Nucléaire est (à présent) importante en Europe (cf. UE "Green Paper")**
 - è 145 réacteurs (127 GW_{el}) produisent 850 TWh/y = 35% de l'électricité de l'UE
 - è Un réacteur de 1 GW_{el} produit 1000 tonnes de déchets en 30 ans
 - è n.b. dans le monde entier 330 (1 GW équivalent) réacteurs produisent 6% de l'électricité
- **L'Europe possède la maîtrise de l'entier du cycle du combustible, à l'exception du management des déchets**
 - è *"for this reason focusing on waste management has to be continued" (European Commissions Green Paper)*
- **Les déchets de la génération actuelle des réacteurs (LWR)**
 - è ils sont hautement radiotoxiques (10^8 Sv/ton)
 - è à la fin du déploiement actuel on aura accumulé 3×10^{13} Sv (0.3 Mégatonnes), à comparer à la dose limite annuelle pour une personne exposé (Directive UE : < 20 mSv)
 - è la radiotoxicité initiale (de l'uranium) sera ré-atteinte après plus d'un Million d'années
- **Le stockage géologique est sujet à controverse**
 - è fuites dans la biosphère ?
 - è C'est cher (1000 €/kg), et où ? (le fameux Yucca Mountain aux US possède une capacité maximale de 0.07 Mégatonnes)
 - è opposition du publique
- **Préoccupations sur le long terme**
 - è disponibilité des ressources pétrole, gaz, charbon (et uranium!)
 - è réchauffement global induit par les combustibles fossiles

Nuclear Reaction Flow in a PWR building up MA-waste



Transmutation des déchets nucléaires: Pourquoi et Comment?

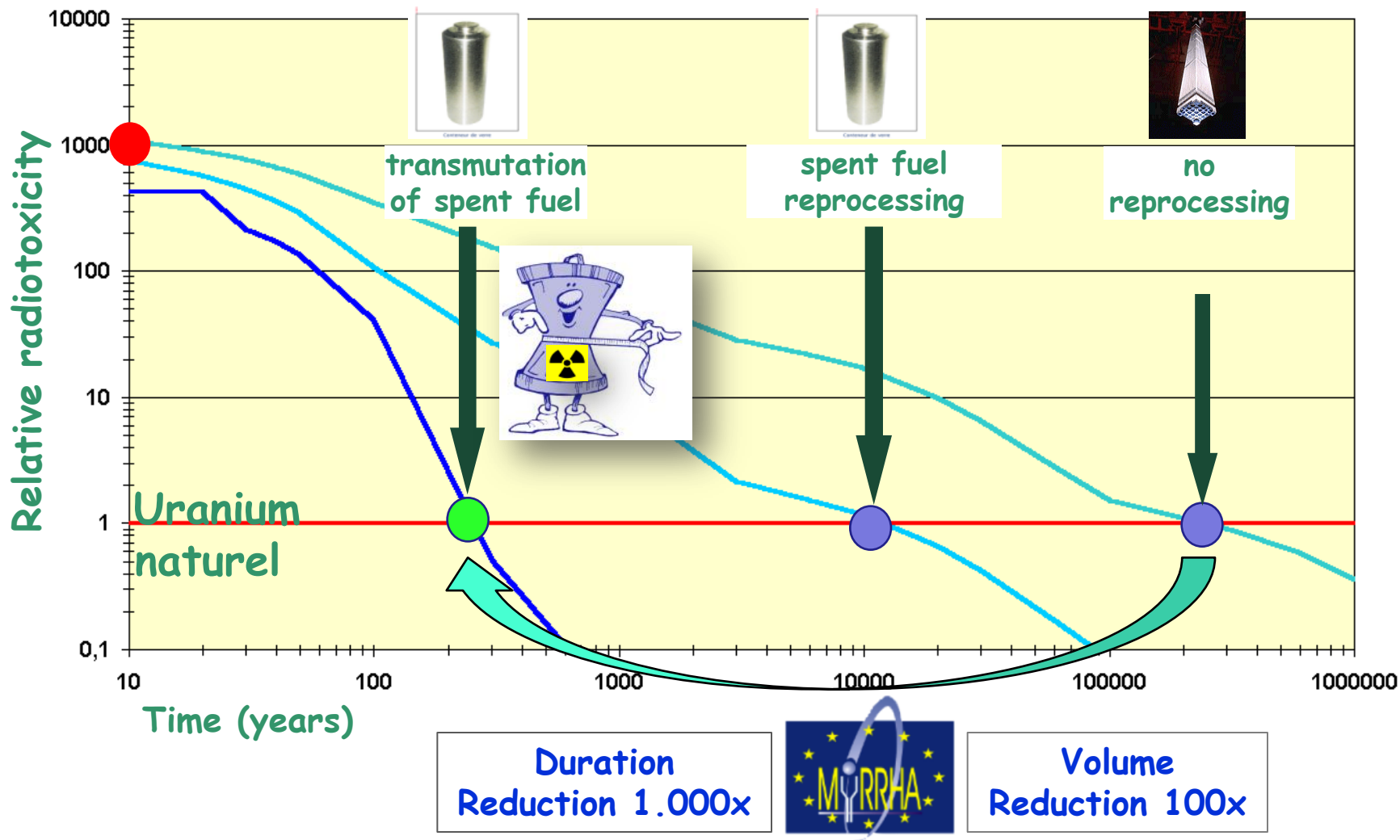
Probability of Fission/Neutron absorbed



- 99.995% des isotopes radio-toxiques à durée de vie longue sont concentrés dans seulement quelques éléments chimiques
- ils représentent en masse 1% du combustible utilisé (300 kg/y/ 1GW_{el} réacteur)
- quasiment tous ces isotopes sont "résistants" à une combustion supplémentaire dans un PWR traditionnel
 - la transmutation complète nécessite des neutrons rapides
- donc des réacteurs à neutrons rapides comme Superphénix Surgénérateurs

Alternative: neutrons (très) rapides produits par un accélérateur, en combinaison avec un réacteur sous-critique. Ce système, dit ADS (Accelerator Driven System), est flexible, sûr et efficace.

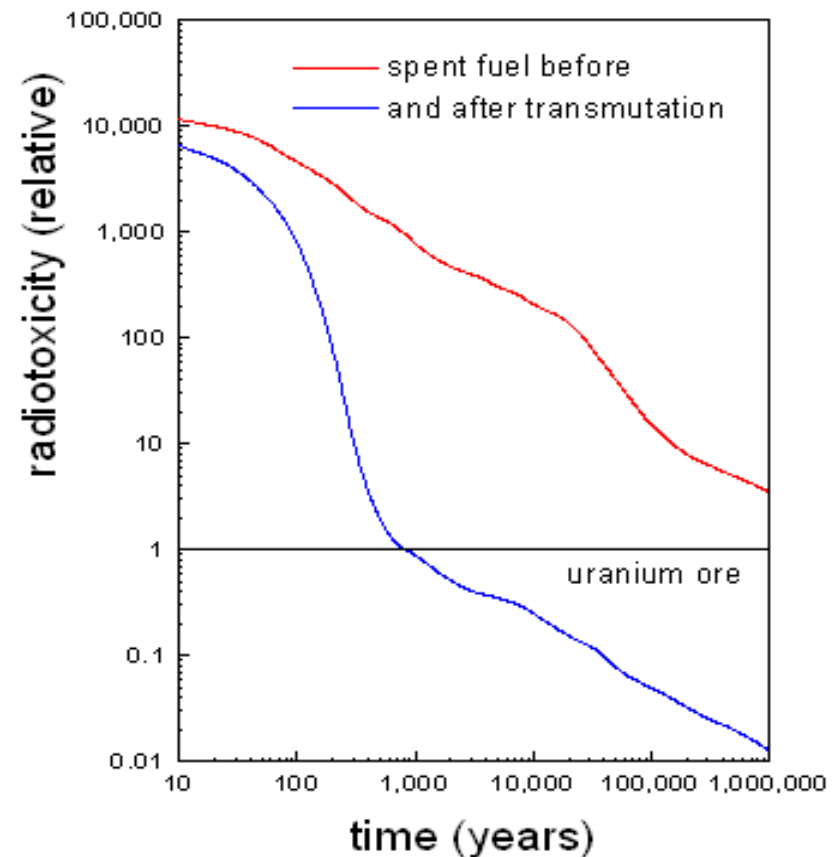
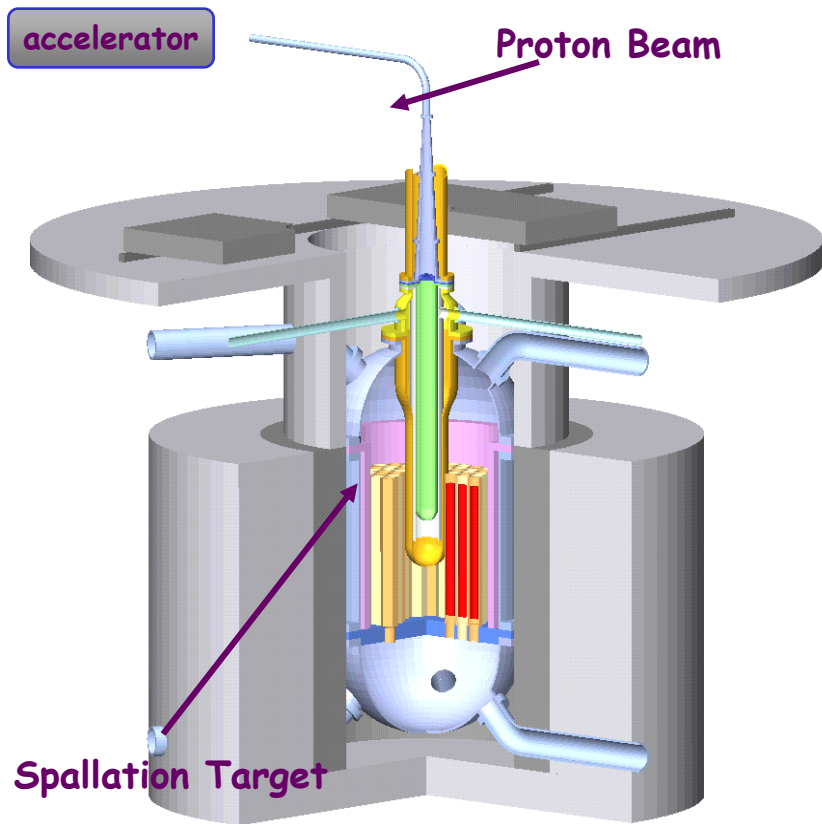
Motivation for Transmutation



Fermeture du cycle du combustible par ADS

Incinération des déchets radioactifs

- L'incinération des déchets, donc de combustible hautement enrichi en actinides mineurs par un système sous critique n'est pas vertue mais nécessité



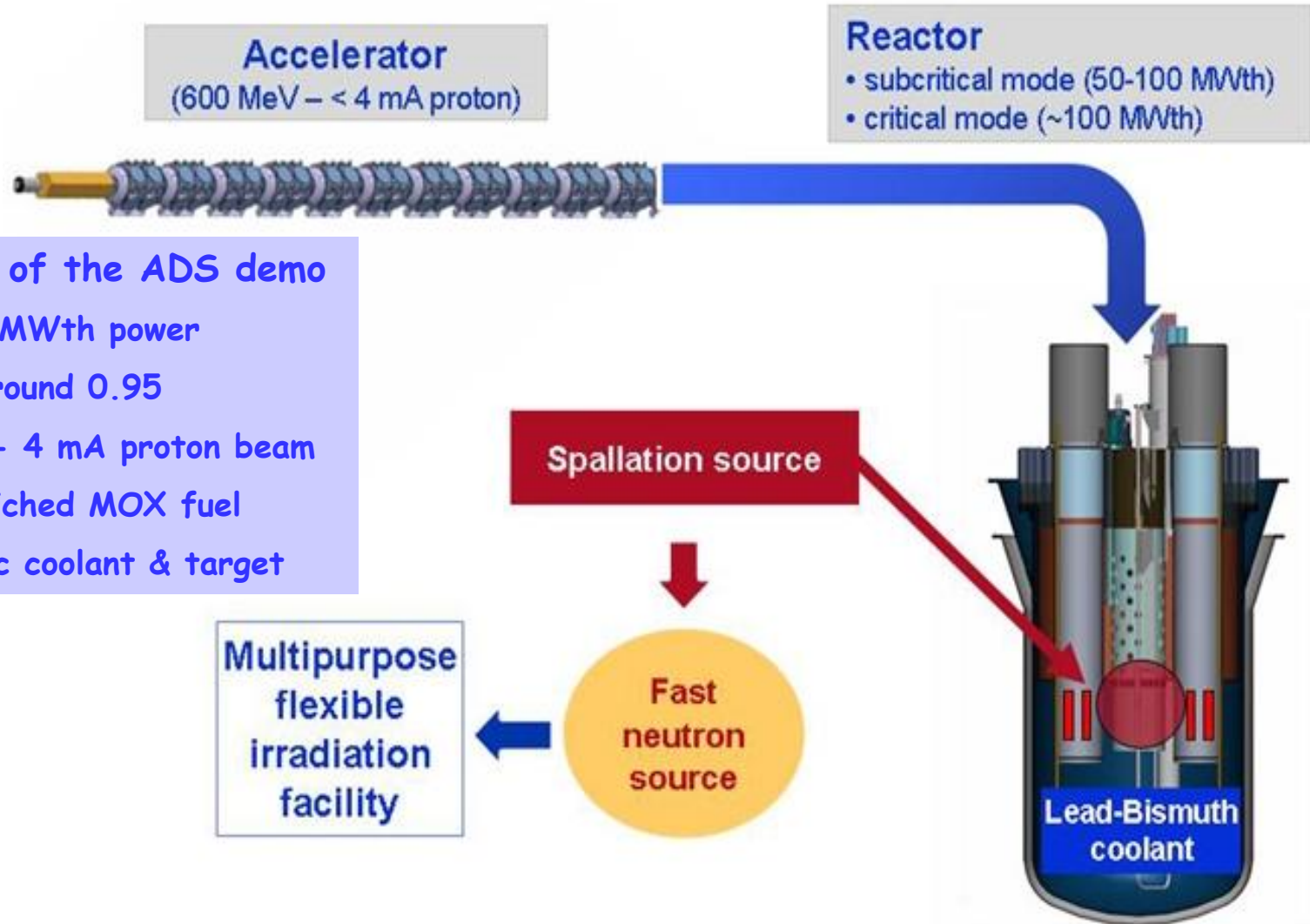
MYRRHA: EXPERIMENTAL ACCELERATOR DRIVEN SYSTEM

A non-European innovative and unique facility

- Time horizon: full operation ~ 2023
- Costs: ~ EUR 960 million



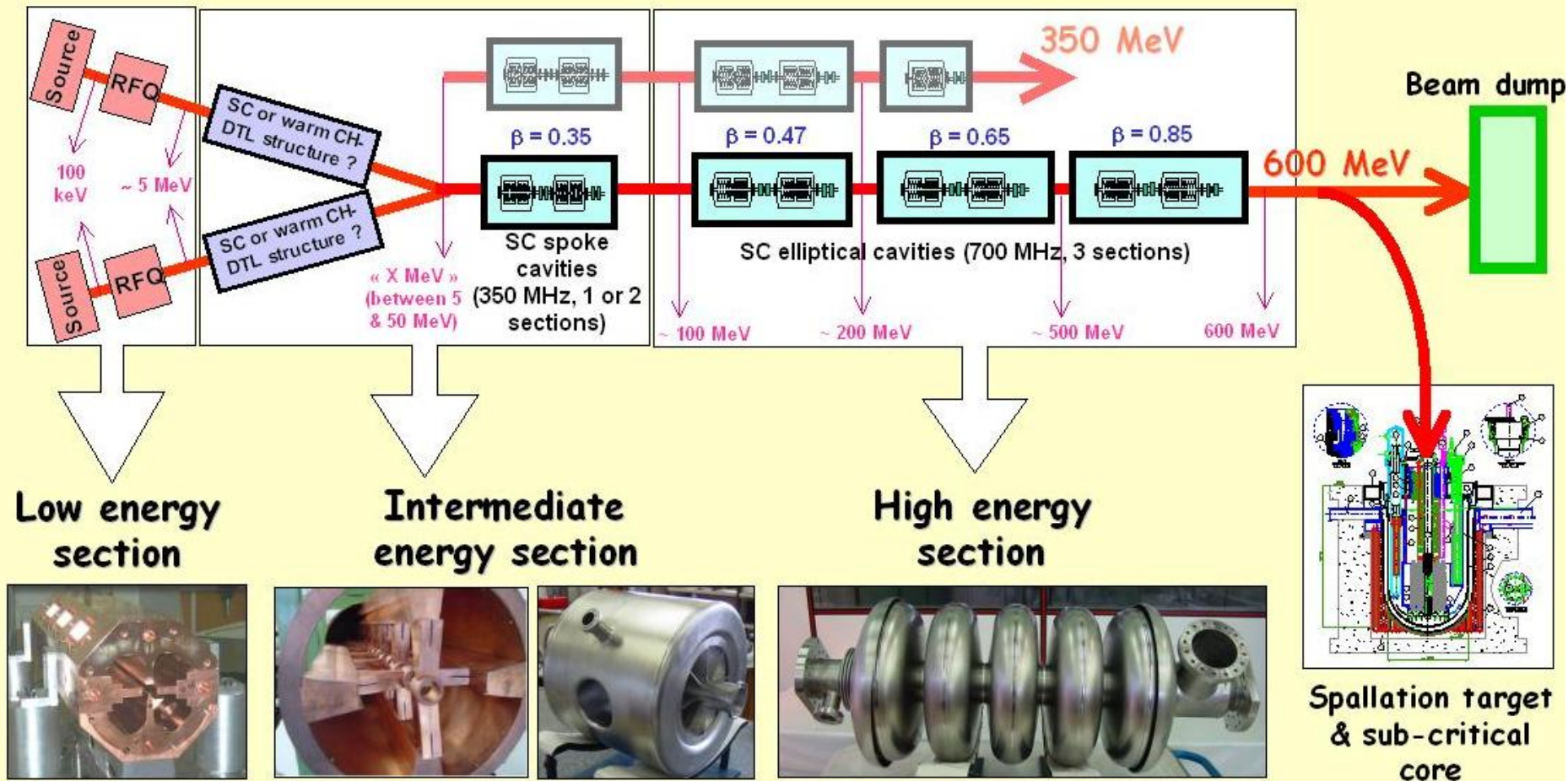
ADS Demonstrator = MYRRHA



Multipurpose facility



PDS-XADS Reference Accelerator Layout



**Strong R&D & construction programs for LINACs
underway worldwide for many applications
(Spallation Sources for Neutron Science, Radioactive Ions & Neutrino Beam
Facilities, Irradiation Facilities)**

Accelerator main specifications

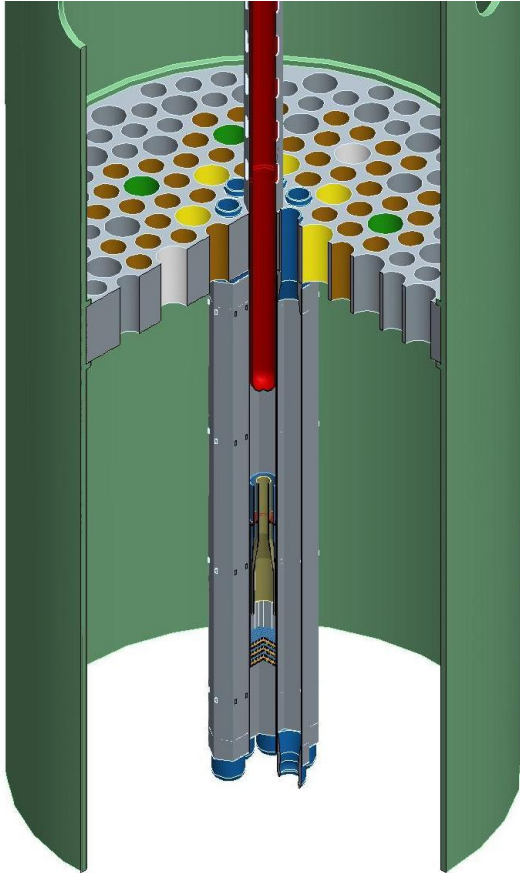
High-power proton CW beams

Table 1 – XT-ADS and EFIT proton beam general specifications

	XT-ADS	EFIT
Maximum beam intensity	2.5 – 4 mA	20 mA
Proton energy	600 MeV	800 MeV
Beam entry	Vertically from above	
Beam trip number	< 20 per year (exceeding 1 second)	< 3 per year (exceeding 1 second)
Beam stability	Energy: $\pm 1\%$, Intensity: $\pm 2\%$, Size: $\pm 10\%$	
Beam footprint on target	Circular \varnothing 5 to 10 cm, “donut-shaped”	An area of up to 100 cm ² must be “paintable” with any arbitrary selectable intensity profile
Beam time structure	CW, with 200 μ s zero-current holes every 10 ⁻³ to 1 Hz, + pulsed mode capability (repetition rate around 50 Hz)	

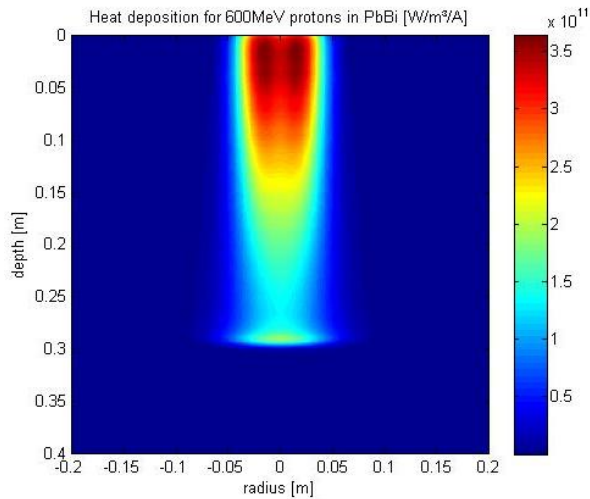
Extremely high reliability is required !!!

Spallation target window

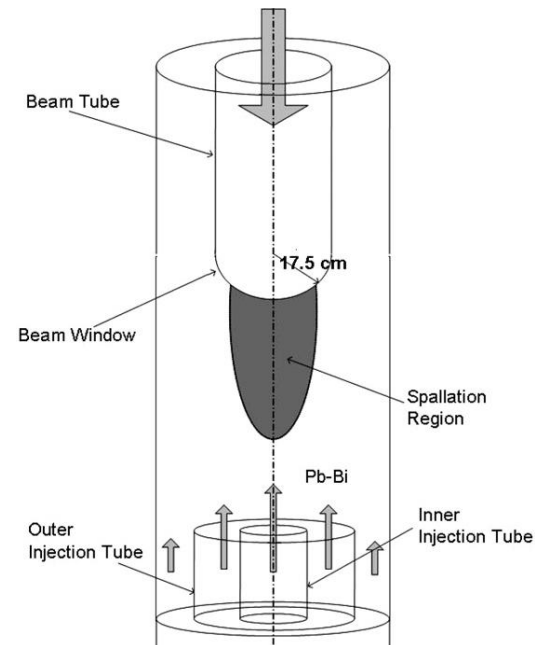
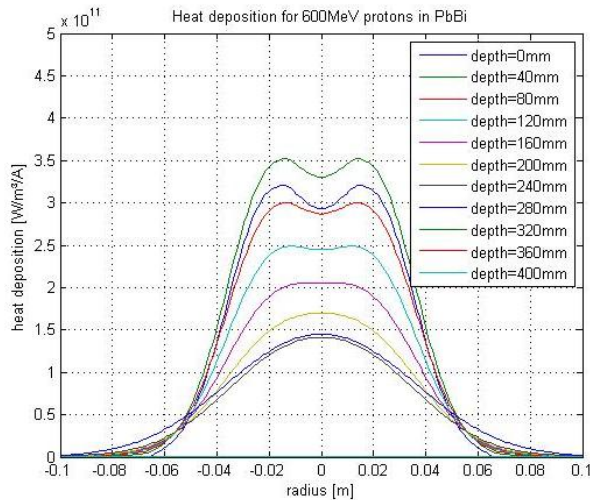


- Produces about 10^{17} neutrons/s at the reactor mid-plane to feed subcritical core @ $k_{eff}=0.95$
 - Fits into a central hole in core
 - Compact target
 - Remove produced heat
- Accepts megawatt proton beam
 - 600 MeV, 3.5 mA \rightarrow ~ 2.1 MW heat
 - Cooling of window is feasible
 - Material challenges
- Preferential working temperature: 450 - 500°C
- Service life of at least 3 full power months (1 cycle) is achievable

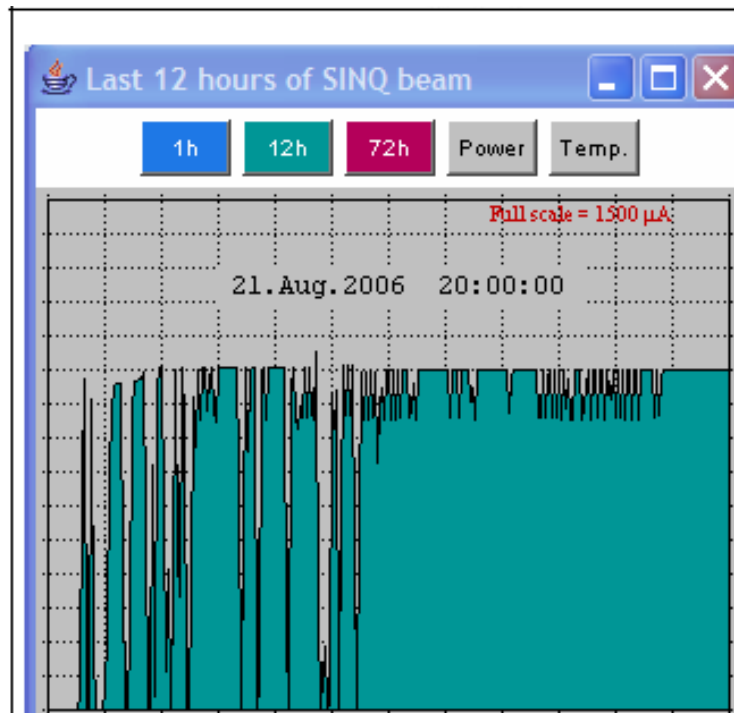
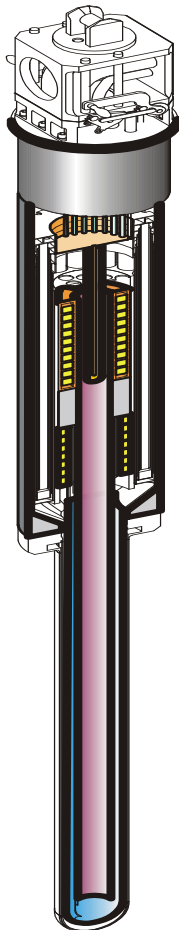
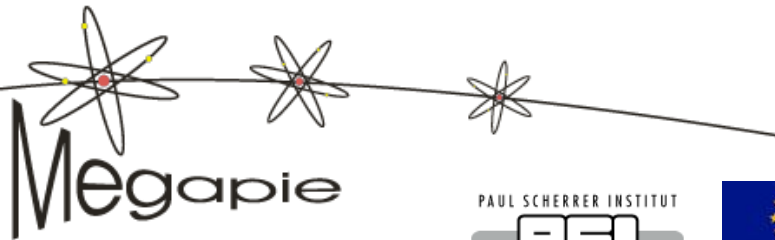
Spallation target window



- Rotating beam σ 15 mm
sweep 25 mm
- Limited heat deposition at stagnation point
- Multi tube concept
 - 3 Concentric inlet tubes



2006: Succes of the Megapie experiment at PSI



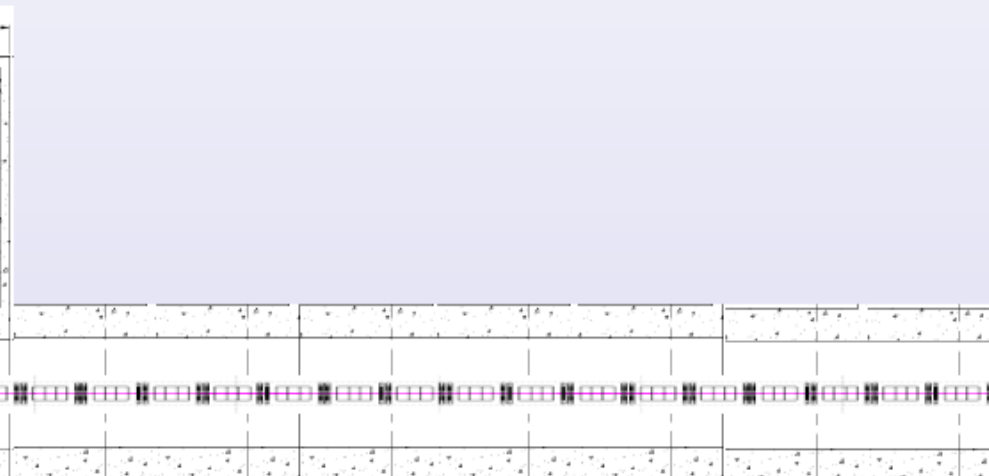
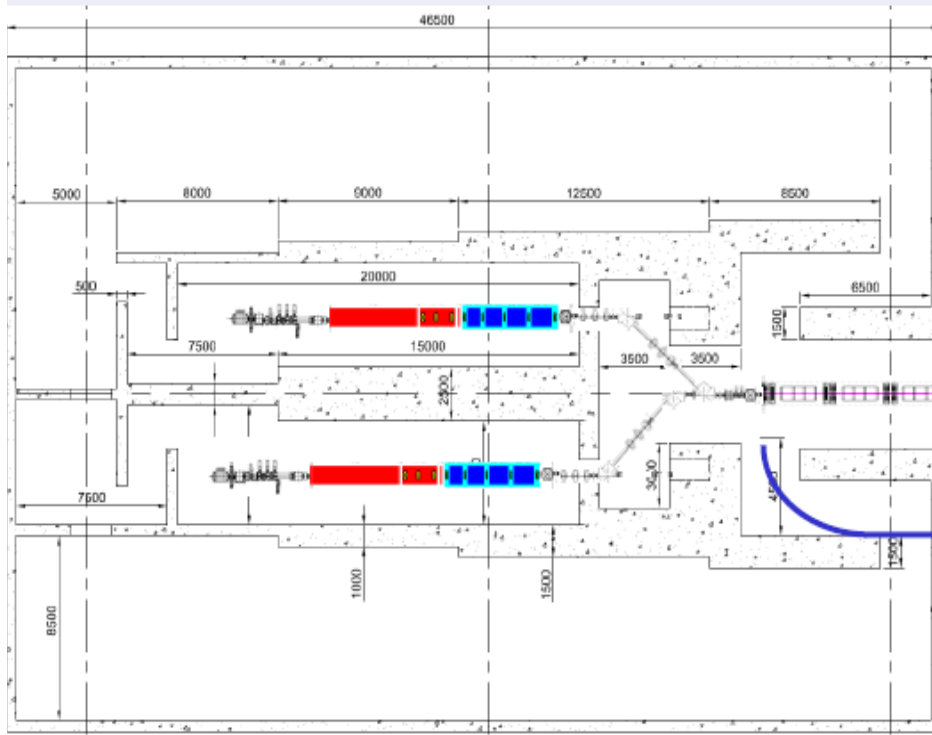
Start of Normal User operation.

Normal user operation was started on August 21st around 8:30 and is planned to continue until the normal annual winter shut-down starting on December 23rd 2006.

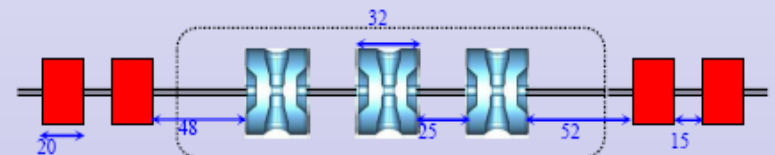
The first 12 hours of proton beam is seen to the left.

The MYRRHA linear accelerator

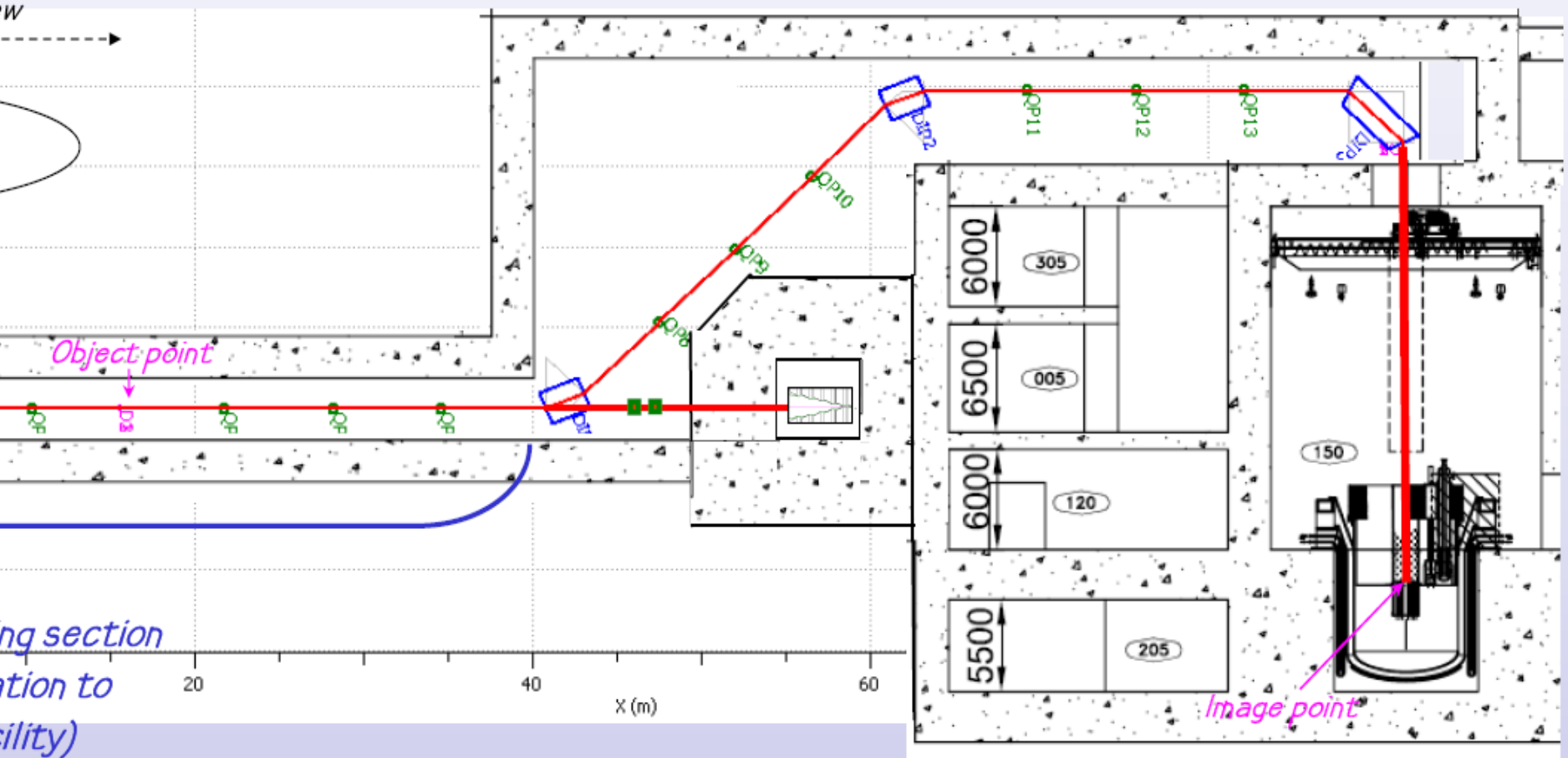
INJECTOR BUILDING



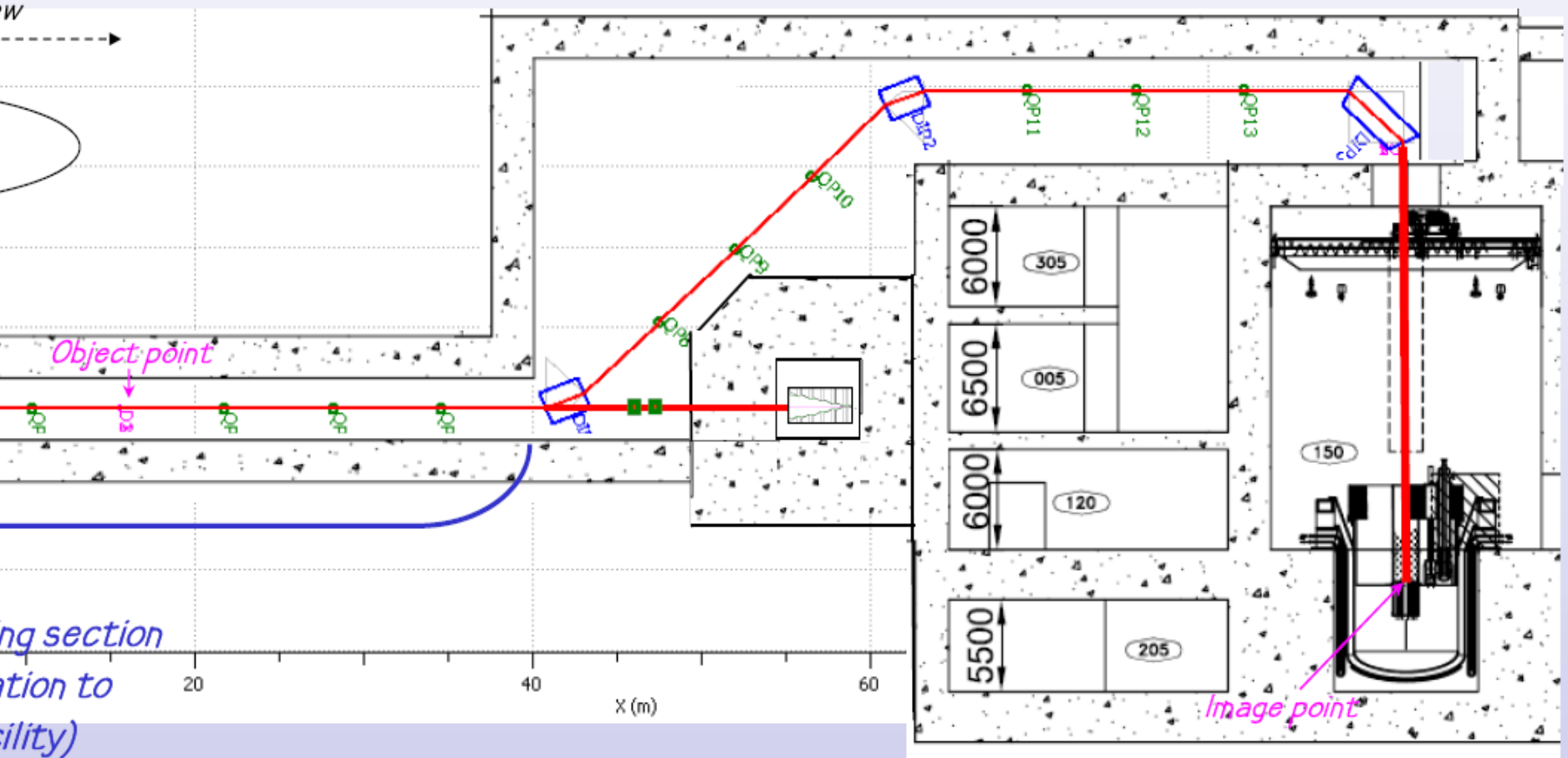
Section #1 (Spoke $\beta \sim 0.35$ @352MHz)



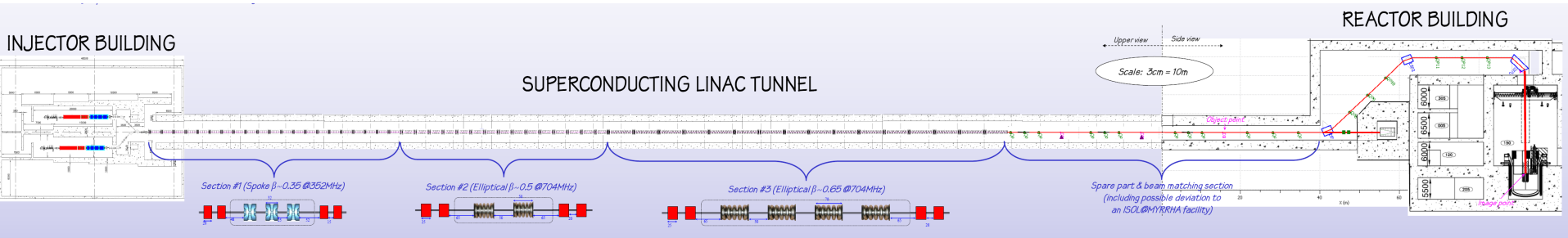
REACTOR BUILDING



REACTOR BUILDING

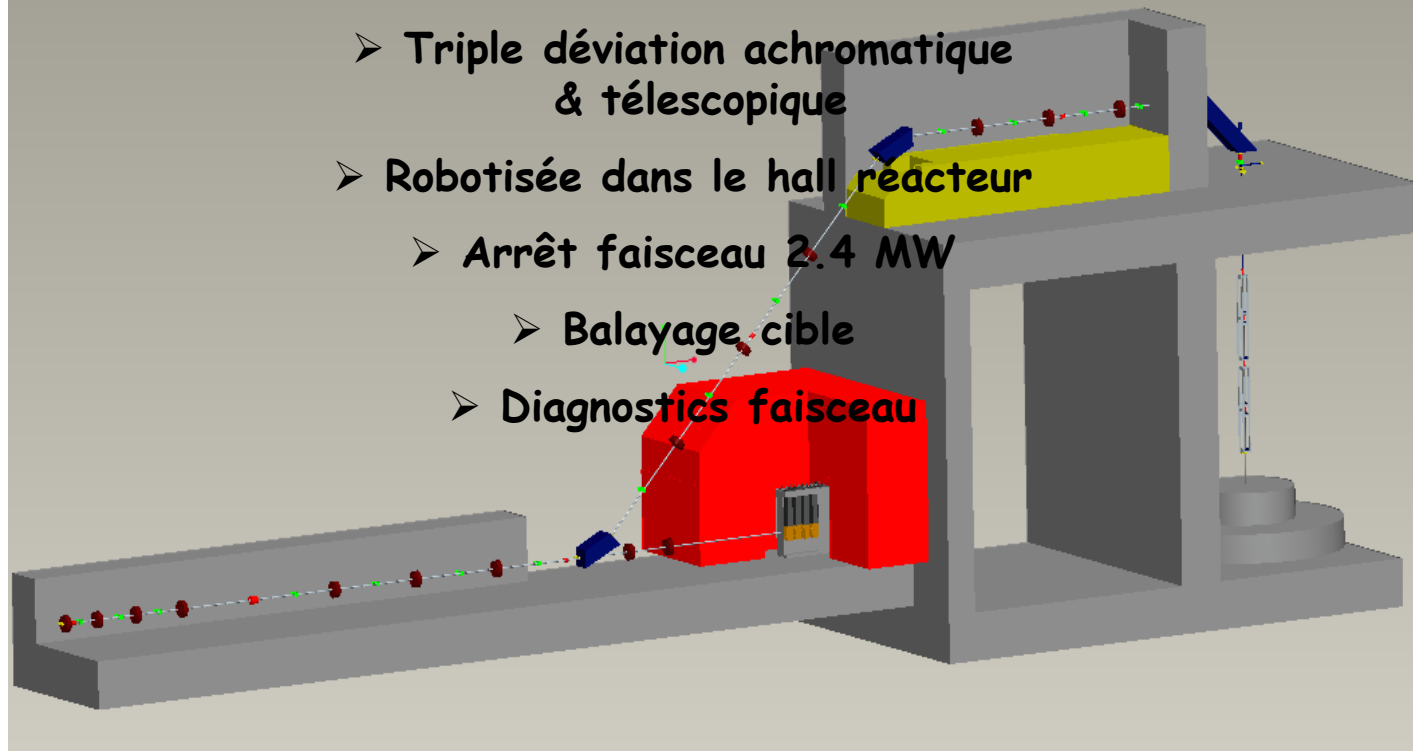


La ligne de faisceau finale

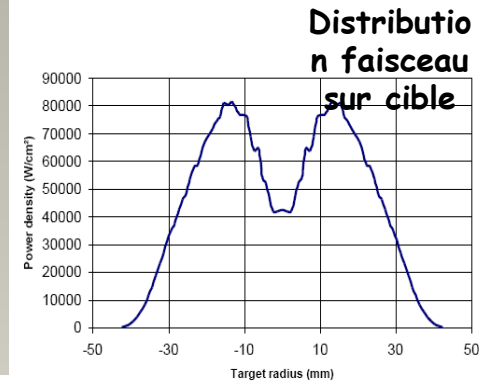
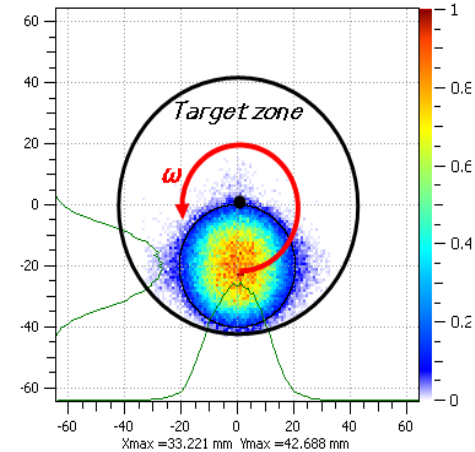


Ligne de faisceau en cours de conception (CNRS, projet CDT)

- Triple déviation achromatique & télescopique
- Robotisée dans le hall réacteur
- Arrêt faisceau 2.4 MW
 - Balayage cible
 - Diagnostics faisceau



Ele: 760 [132.25]: TraceWin - CEA/DSM/Irfu/SACM
X(mm) - Y(mm)



The Roadmap for MYRRHA

On March 5, 2010 the Belgian government decided the funding of the MYRRHA at a level of 40% of the total cost of the project with a first budget release of 60 M€ for the period 2010-2014 aiming at:

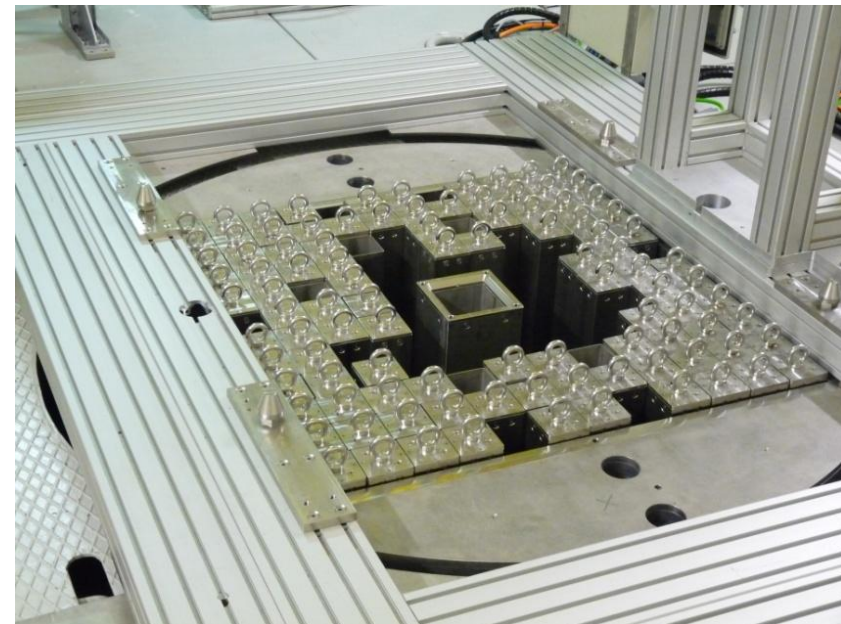
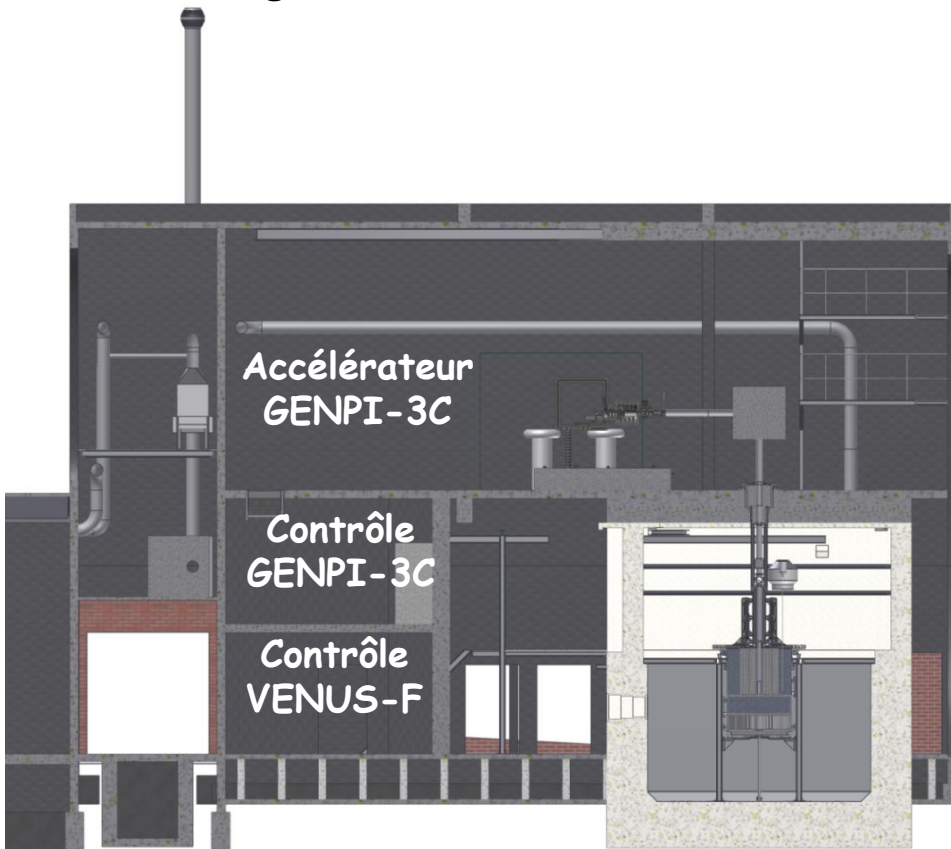
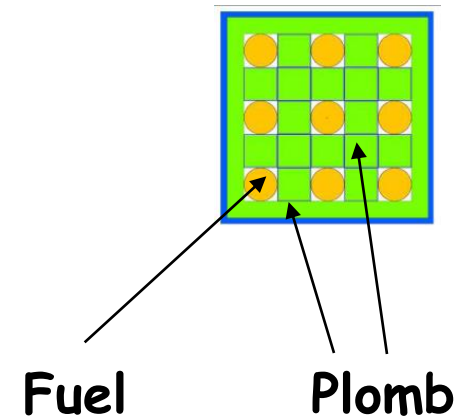
- completing the front-end engineering design (FEED) of the project,
- securing the licensing of the project
- obtaining the construction permit
- establishing the international consortium

The main next milestones of the project are as follows:

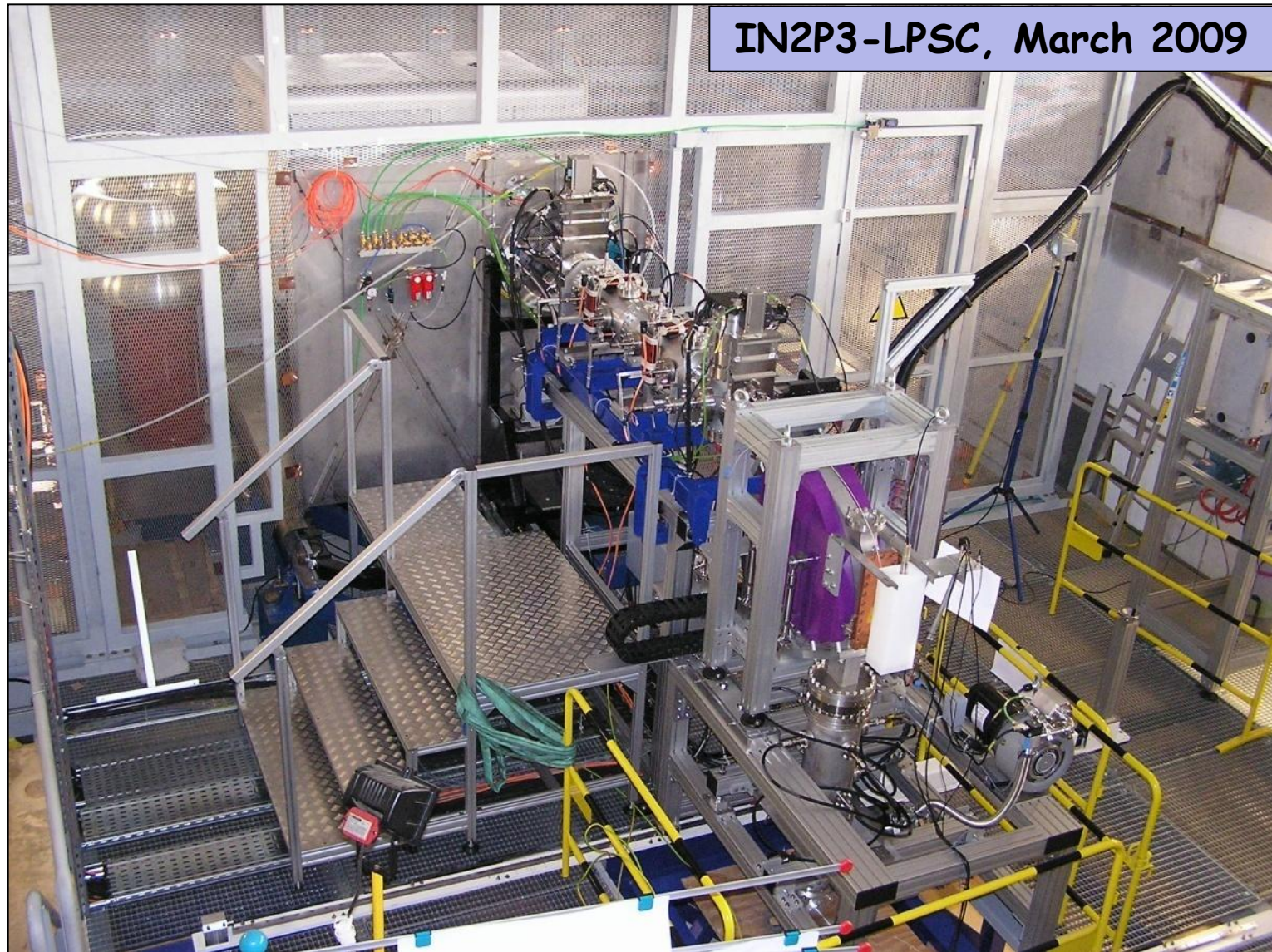
- 2010-2014 : Completion of Front End Engineering Design
- 2014 : Obtaining the construction permit
- 2014 : Consolidation of the international consortium
- 2015 : Tendering and contract awarding
- 2016-2018 : Construction of components and civil engineering
- 2019 : On-site assembly
- 2020-2022 : Commissioning
- 2023 : Progressive start-up
- 2024 : Full power operation

Preparing (i.a. the licensing) for MYRRHA: the ADS-experiment GUINEVERE at SCK-CEN

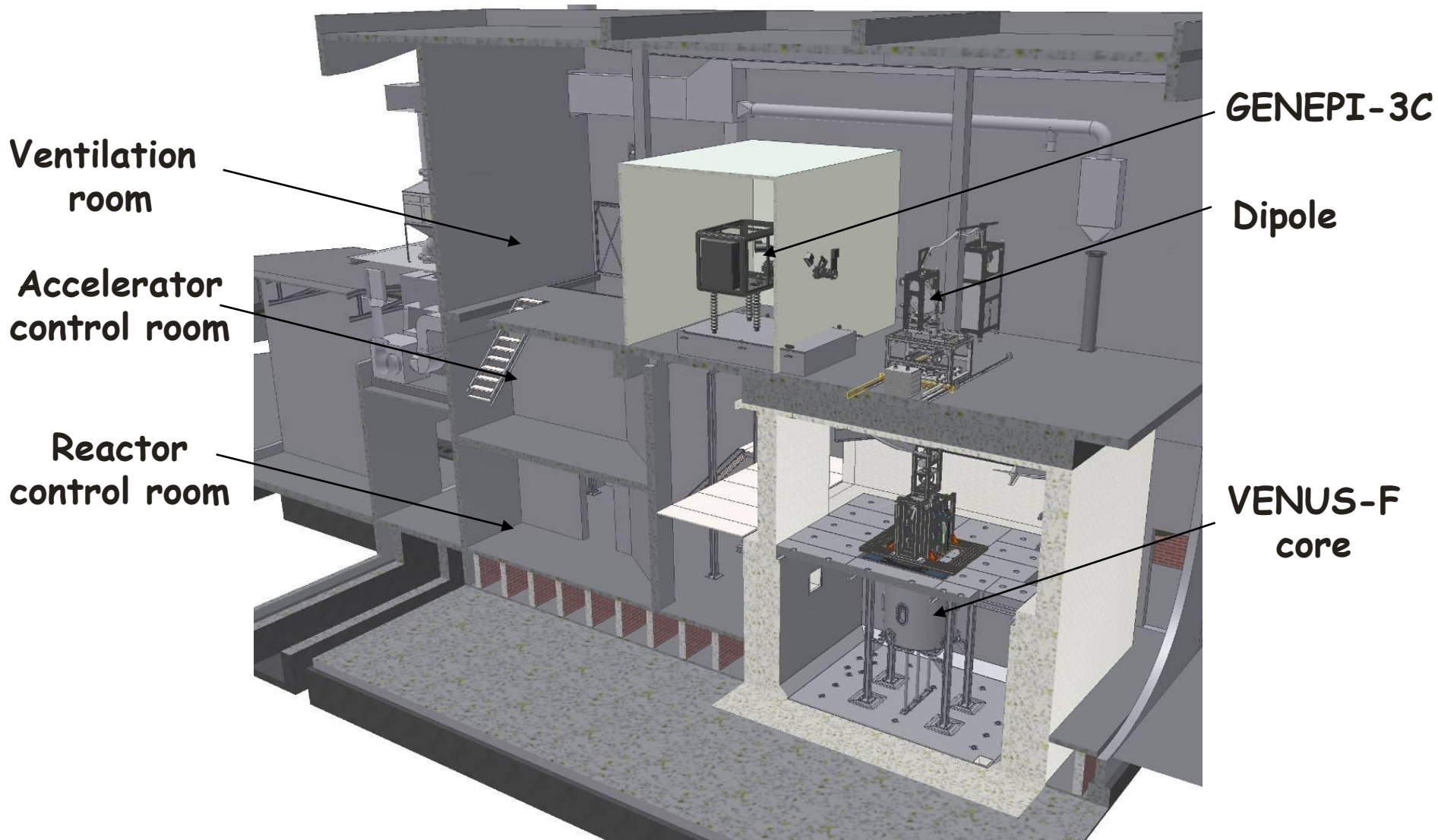
- ➔ neutron source GENEPI-3C (CNRS-IN2P3)
- ➔ VENUS experimental reactor (SCK-CEN)
 - ➔ VENUS was light-water moderated but is transformed for GUINEVERE into a fast lead-moderated reactor
- ➔ 360 kg 30% enriched metallic U-235 fuel (CEA)



GENEPI 3C avant le démontage au LPSC



GUINEVERE = GENEPI-3C coupled to VENUS-F



The Neutron source GENEPI-3C for the criticality measurements with GUINEVERE



- Collaboration LPSC-LPC-IPNO-IPHC
- 250 keV Deuterons, tritium target $[T(d,n)^4He]$
 - CW intensity : $160 \mu A - 1 mA$
 - Beam-off pulsing: 0.1 - 100 Hz
- Beam-off times faisceau : $20 \mu s - 10 ms$
- Design 2007, construction 2008, reception at LPSC Grenoble 2009
 - Transferred to Mol fend of 2009
 - Reception 2010
- First Coupling Experiment authorized very recently

