



El sincrotró ALBA i les seves aplicacions

Jordi Benach (jbenach@cells.es)

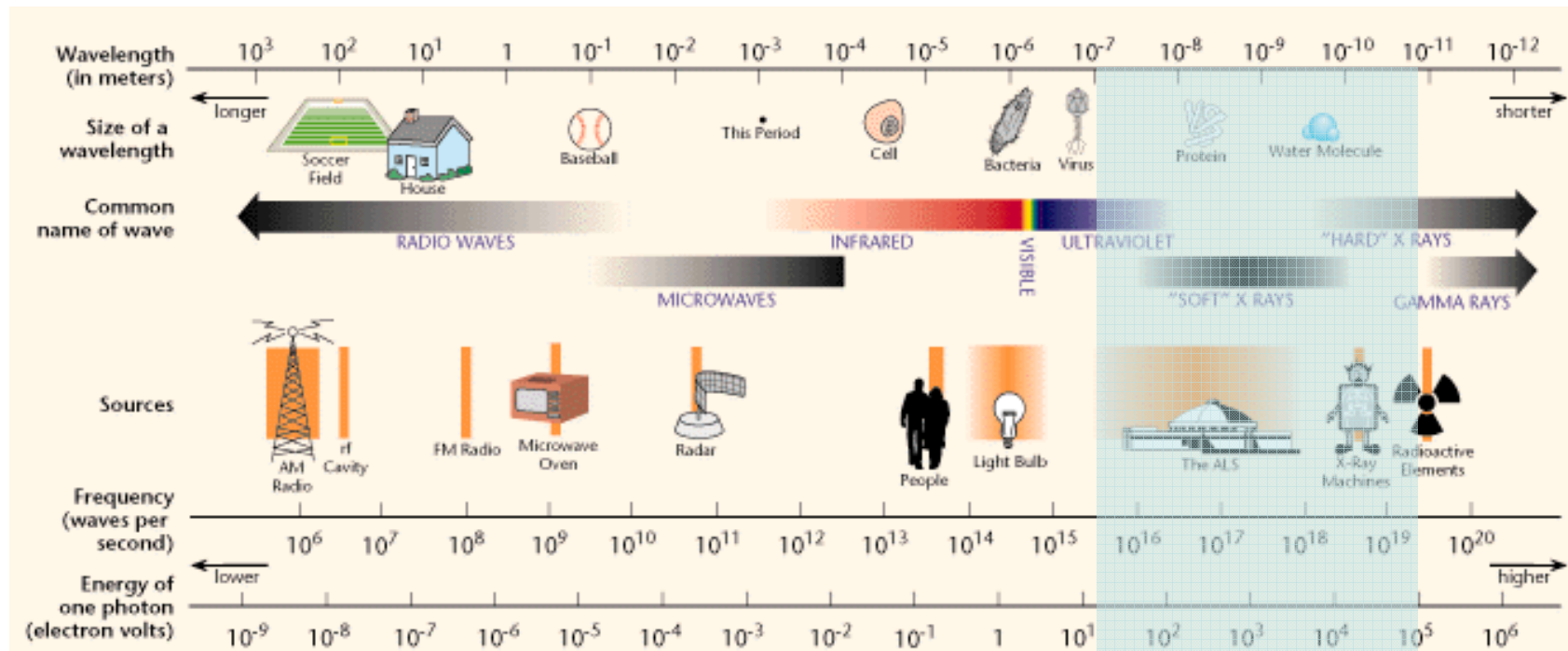
IEC 27 octubre 2010

La llum de sincrotró

El sincrotró ALBA

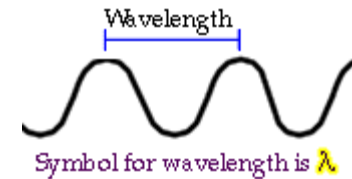
Aplicacions

La radiació electromagnètica = llum



Per observar els detalls d'un objecte, la longitud d'onda de la "llum" ha de ser menor que la mida dels detalls que volem observar,

$\lambda < \text{menor que els detalls}$

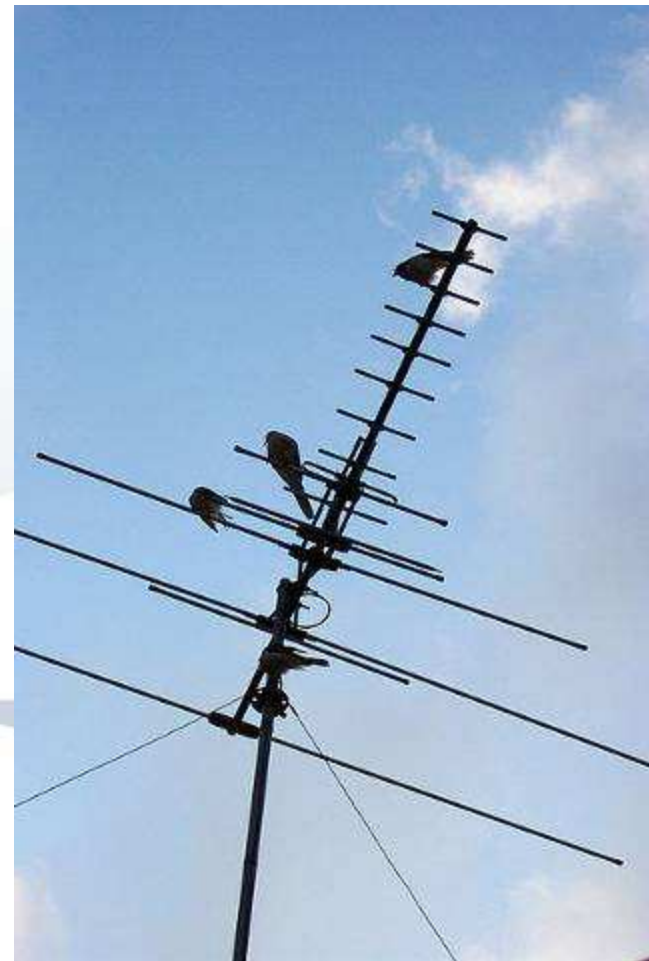
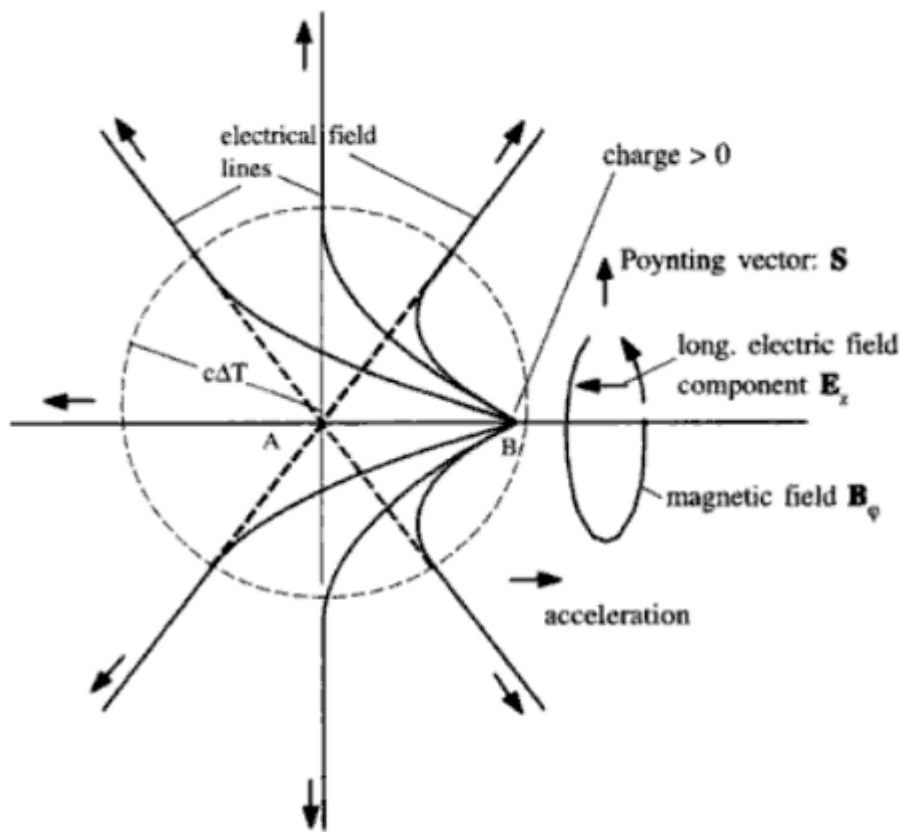


La font lluminosa ha de ser prou **intensa**

La llum visible (λ entre 300 nm i 700 nm) és suficient per als objectes usuals: Amb un microscopi podem observar objectes més grans que 1 μm

Però això no és suficient per a objectes més petits, com molècules o àtoms -> **necessitem raigs X ($\lambda \sim 1 \text{ \AA} \text{ ó } 0.1 \text{ nm}$)}**

Degut a que la velocitat de la llum no és infinita, quan una càrrega canvia la seva velocitat, genera una pertorbació en el **camp elèctric**. Com que una càrrega que es mou genera també un **camp magnètic**. El vector de **Poynting és diferent de zero** i es genera un flux d'energia o radiació.

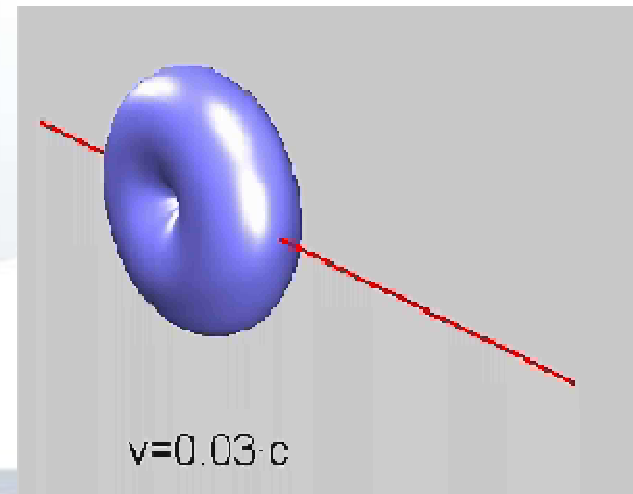


La **potència** total emesa per una càrrega total al ser accelerada.

càrrega accelerada **NO relativista**

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m^2 c^3} \left(\frac{dp}{dt} \right)^2 = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} a^2$$

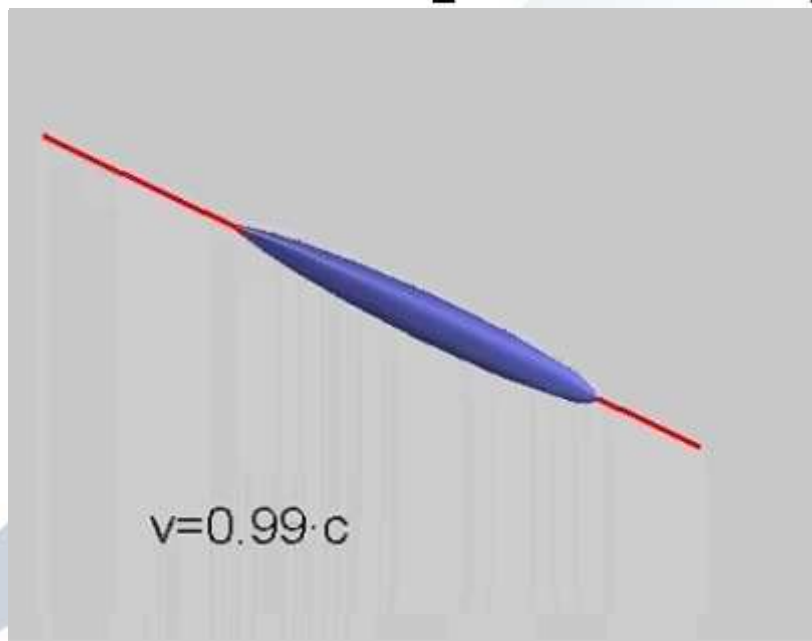
Fórmula de Larmour



**Distribució espacial de la radiació:
Uniforme**

càrrega accelerada **relativista**

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c} \gamma^6 \left[\dot{\boldsymbol{\beta}}^2 - \left(\boldsymbol{\beta} \times \dot{\boldsymbol{\beta}} \right)^2 \right]$$



**Distribució espacial de la radiació:
Concentrada en la direcció frontal**

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \dot{\beta} = \frac{a}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E}{E_0}$$

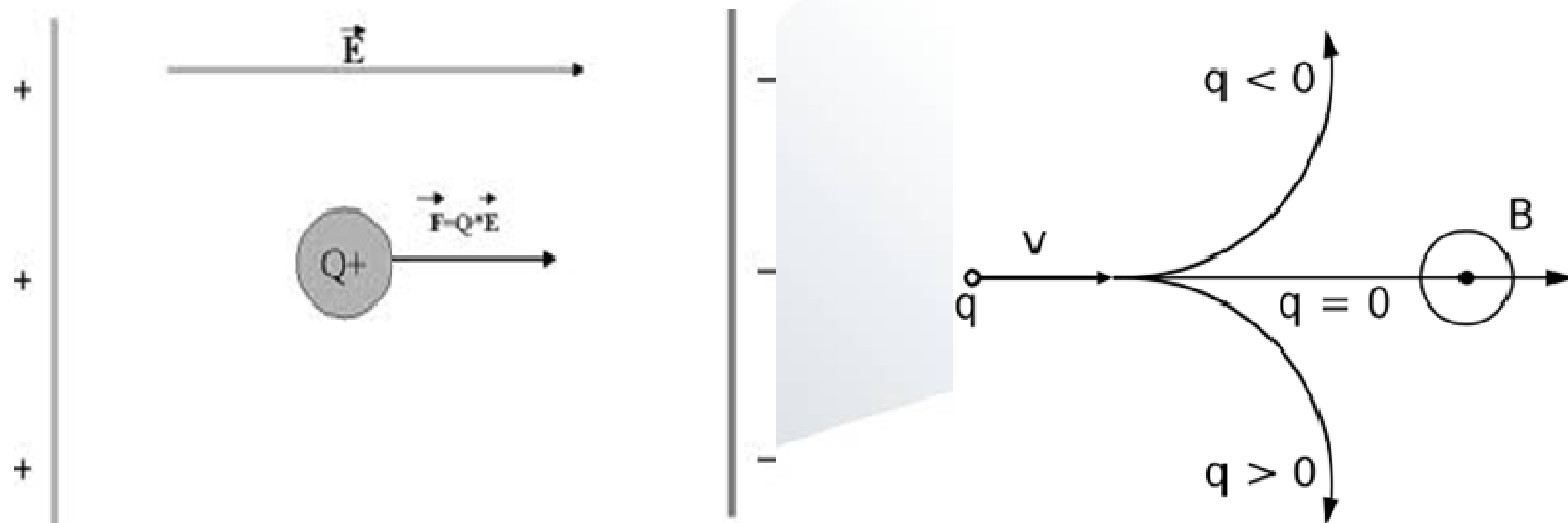
(factor de Lorentz)

A ALBA

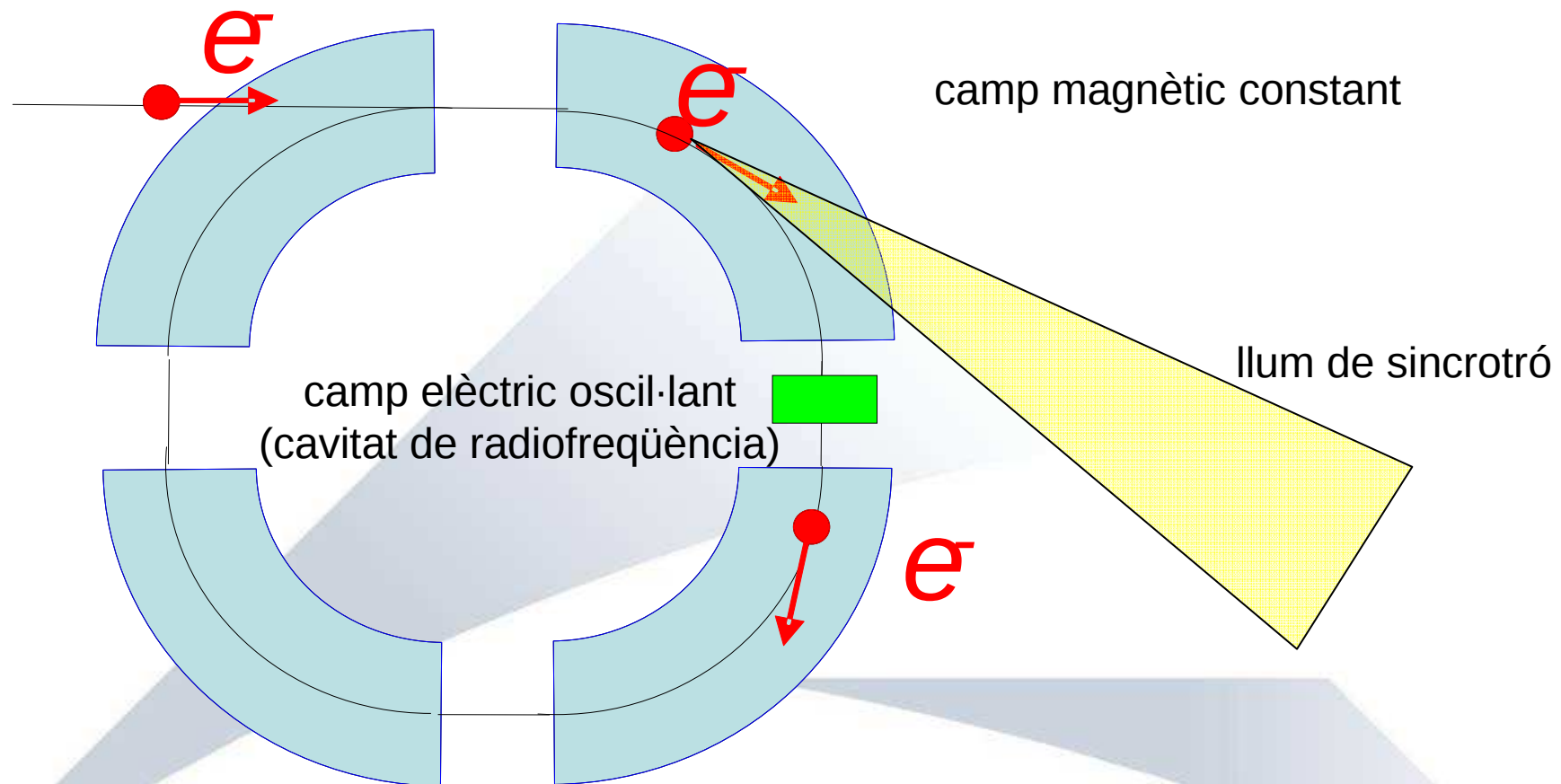
$$\beta = 0.99999999855$$

$$\gamma = 5870$$

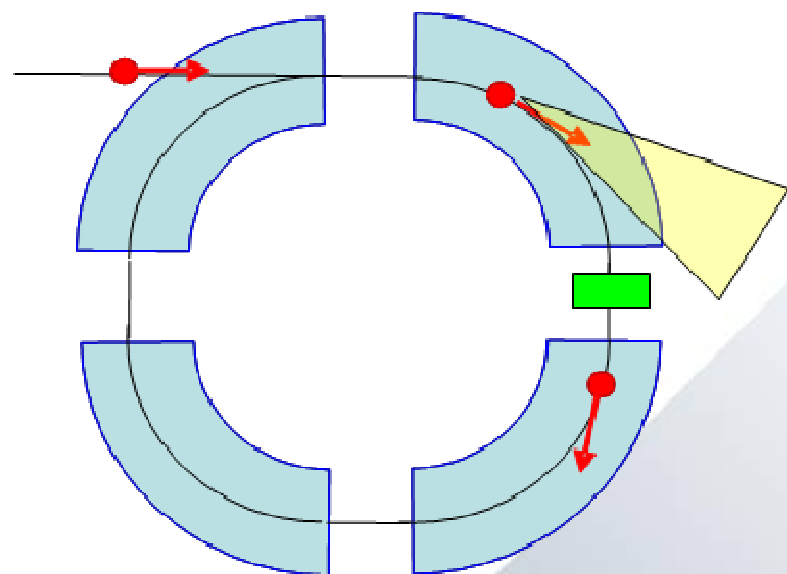
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

 $\vec{E}$ $\vec{B}$

Neix el concepte de sincrotró



Obtenim raigs X enlloc d'ones de ràdio a causa dels efectes Doppler i relativistes



En un electroimant de curvatura

$$E_c = \frac{3e\hbar B \gamma^2}{2m}$$

$$E_c (keV) = 0.6650 E_e^2 (GeV) B (T)$$

Alba accelera els electrons a 3 GeV, quan passen per un imant de curvatura de 1 Tesla generen fotons de:

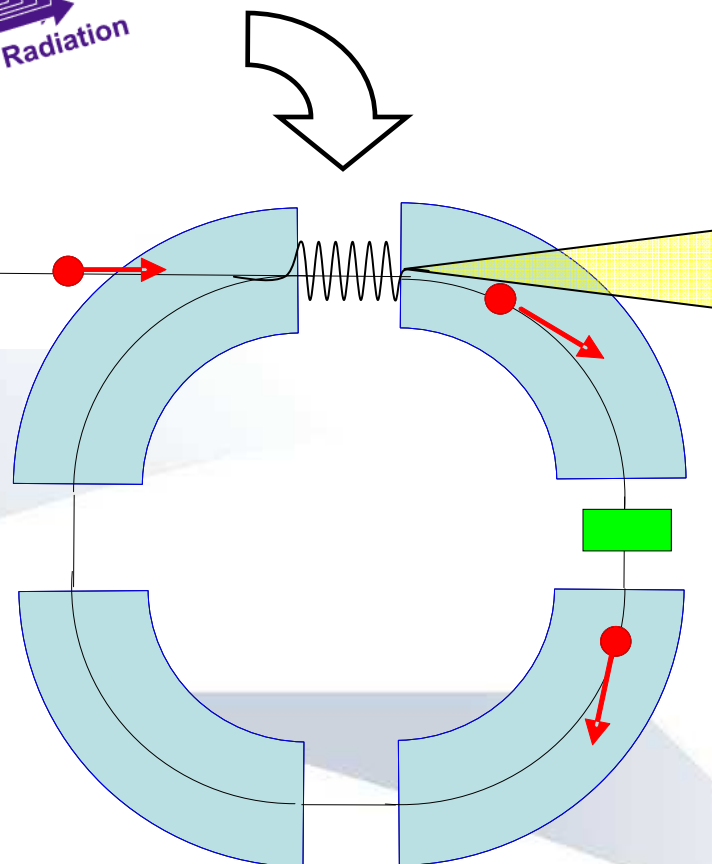
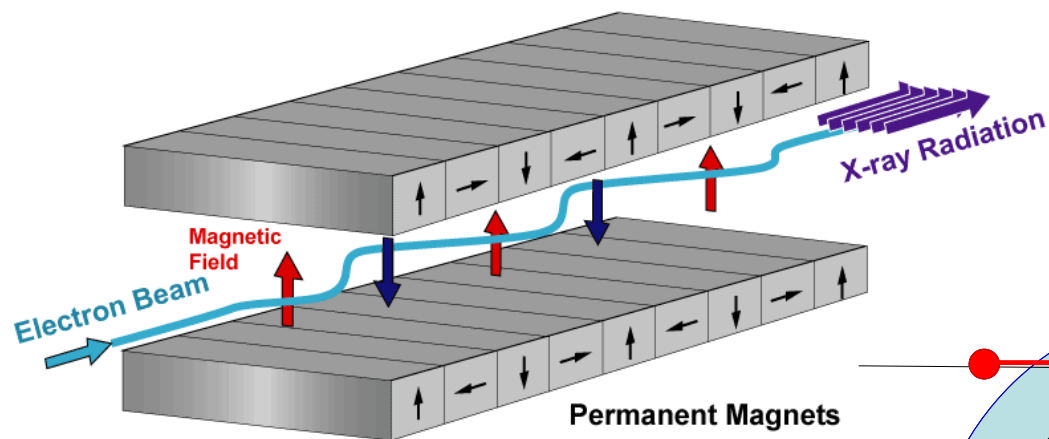
$$E_c = 5.985 keV$$

o

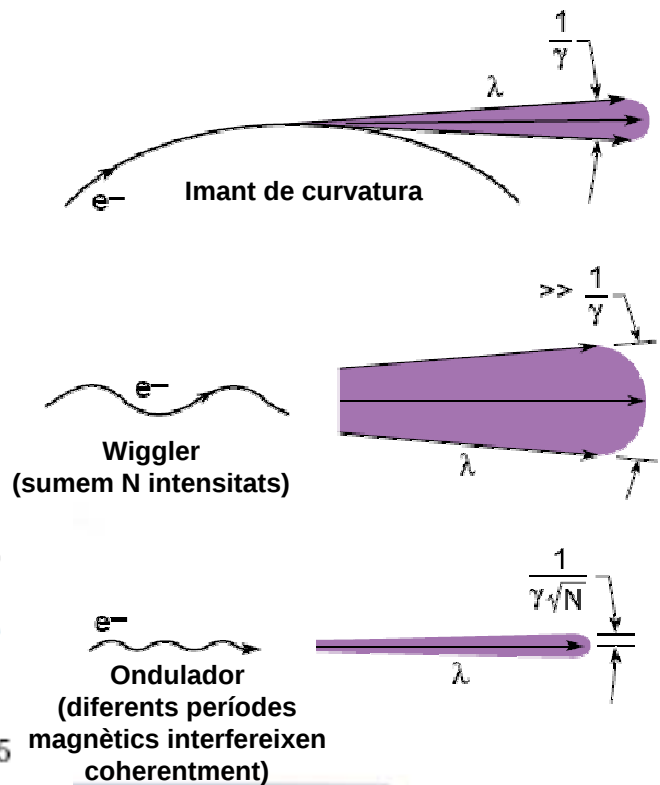
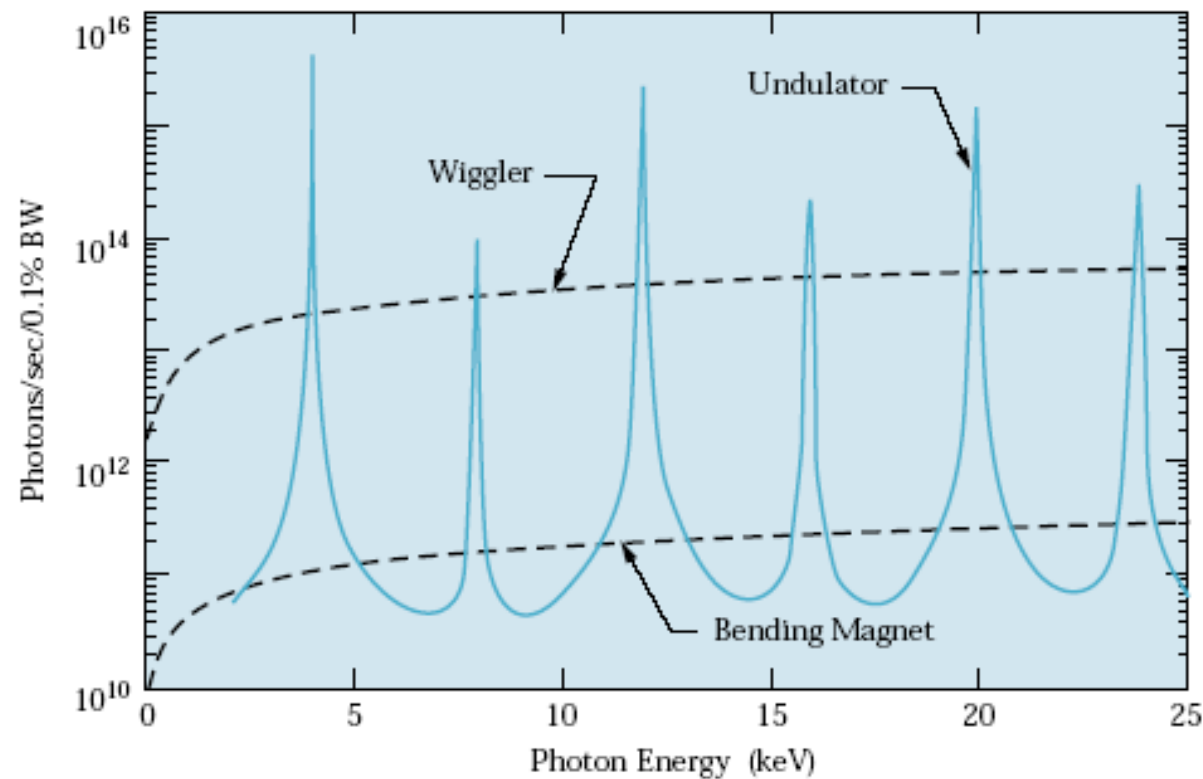
$$\lambda_c = 2.1 \text{ \AA}$$

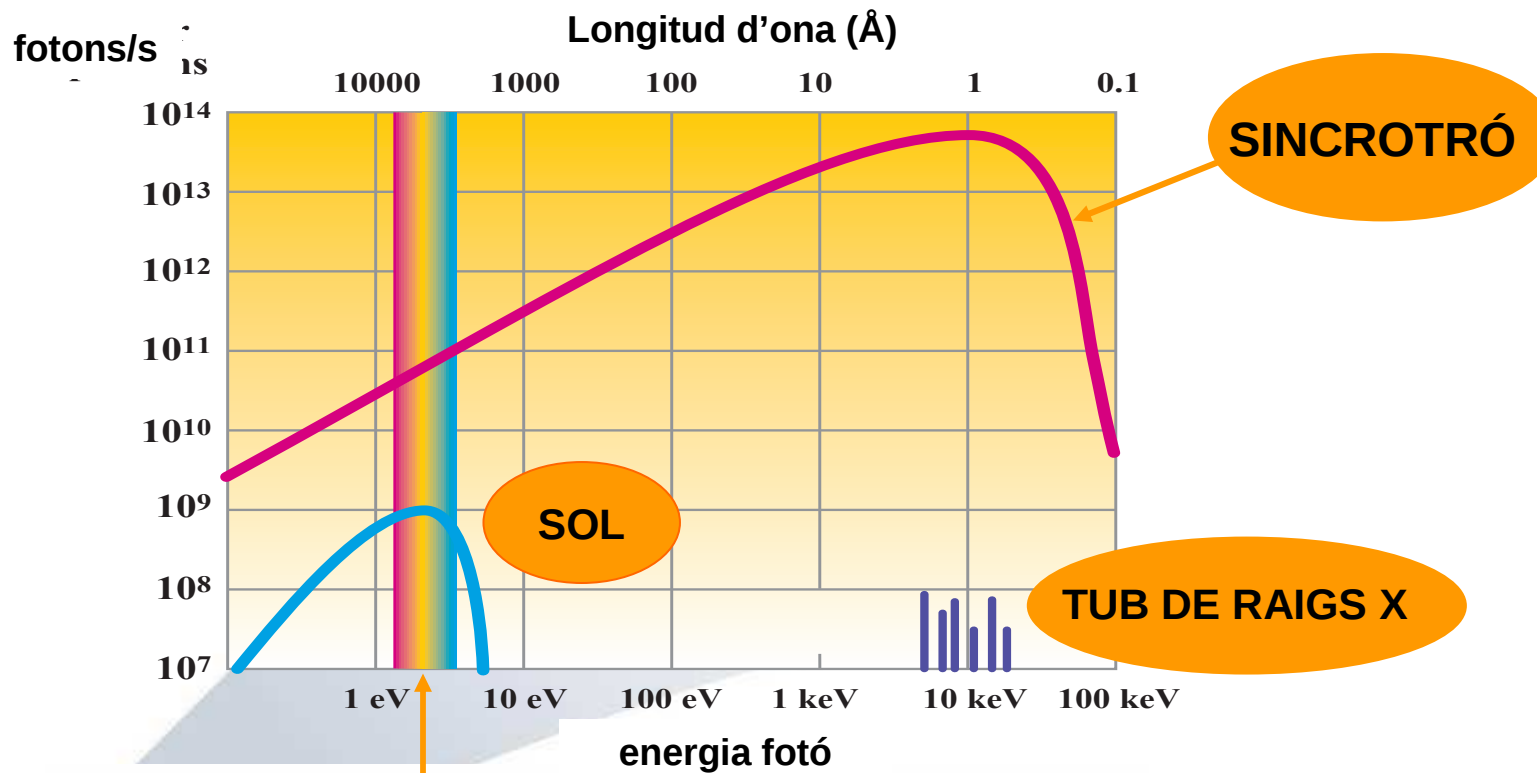
(raigs X)

Podem obtenir raigs **encara** més intensos amb una sèrie d'imants permanents



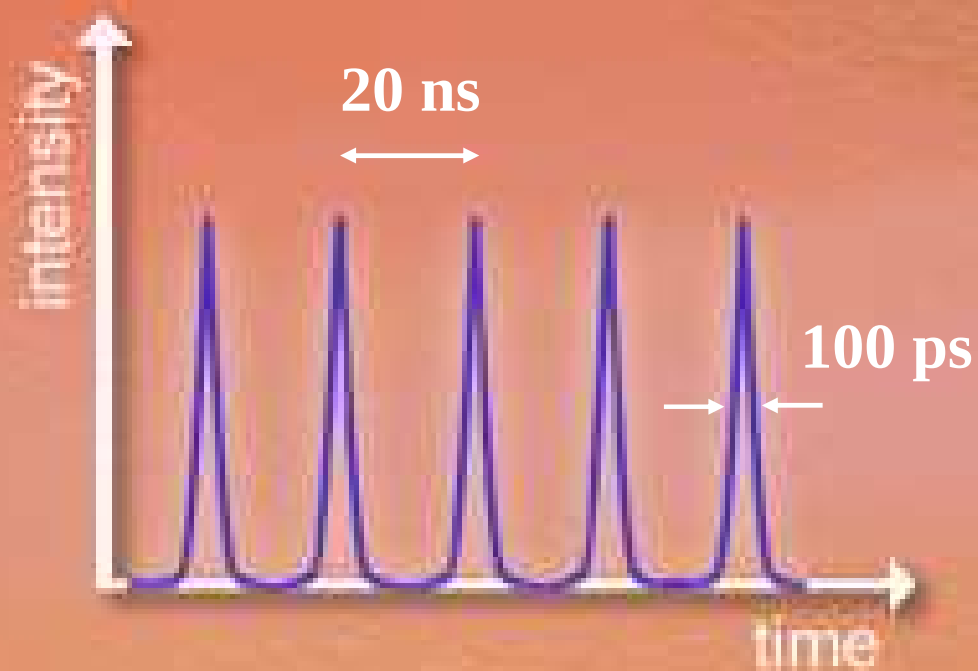
Onduladors i wigglers:
dispositius d'inserció
amb períodes magnètics.



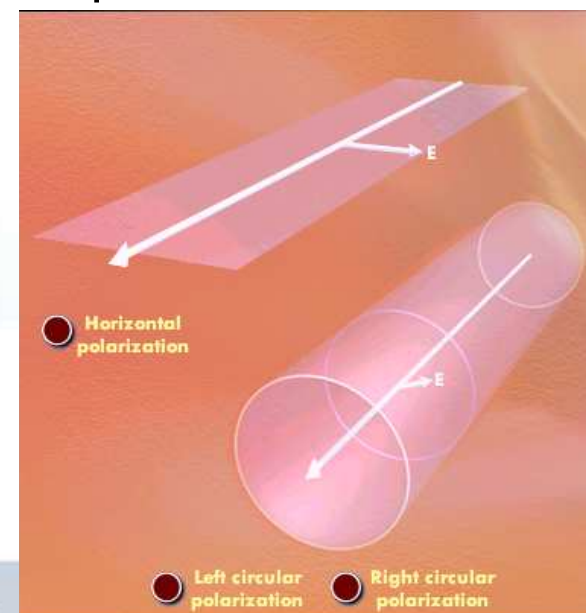


$$E = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Té estructura temporal



Polaritzada linealment en el pla de l'òrbita i es pot manipular amb el dispositius d'inserció

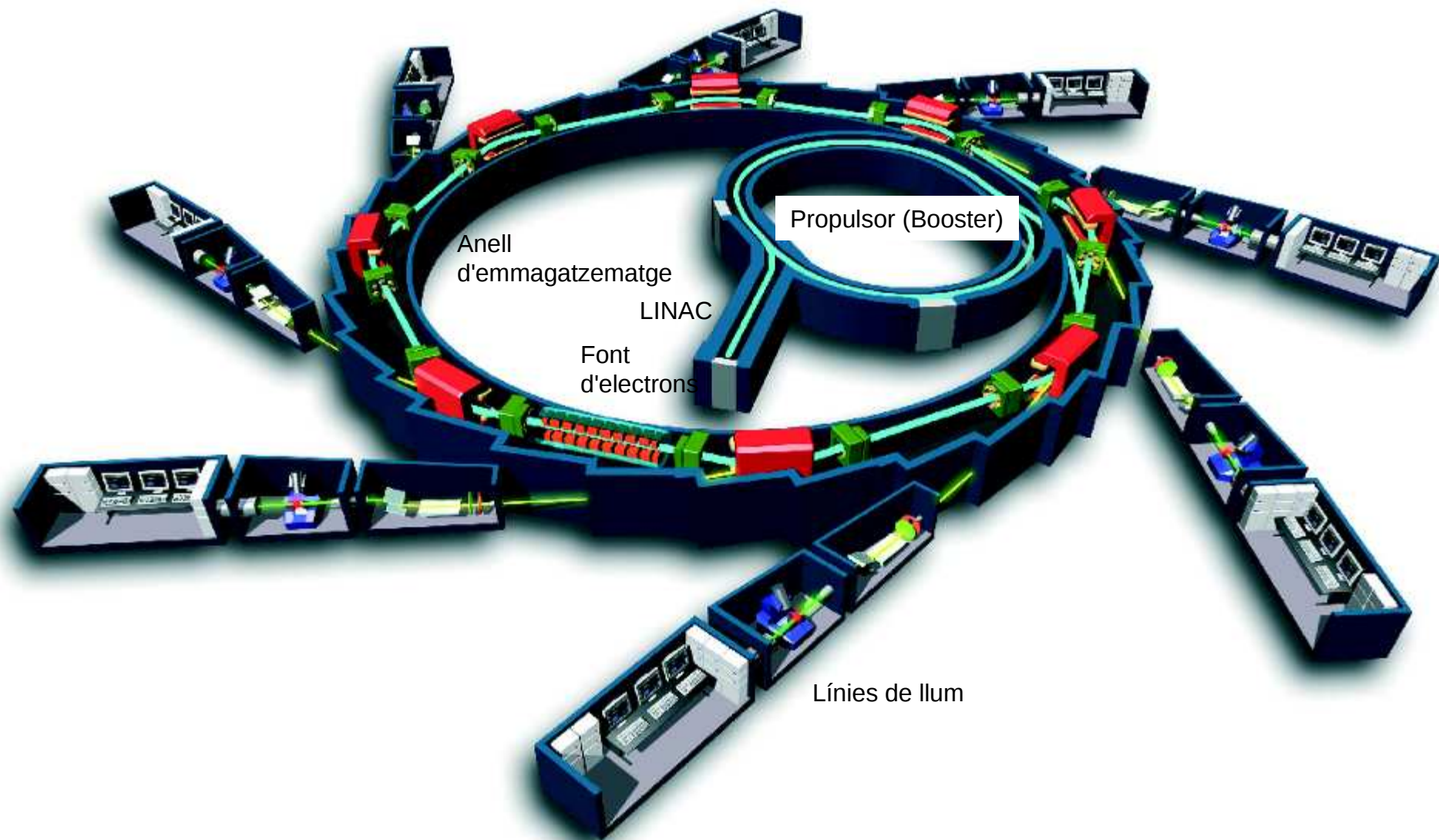


Alt flux i brillantor

Ampli rang de longituds d'ona

La polarització és definida i adjustable

Estructura temporal







El sincrotró ALBA



El sincrotró ALBA



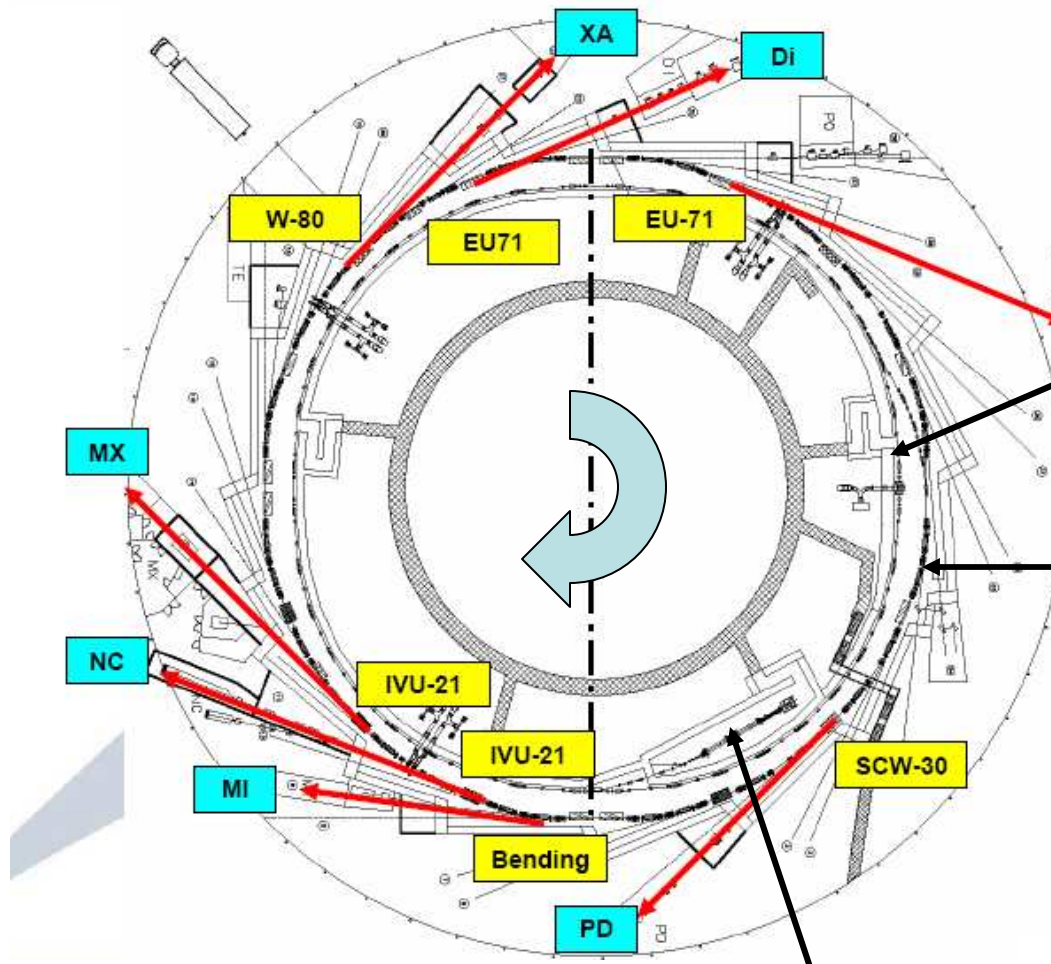
Alba accelera electrons

Propulsor (Booster):
3 GeV, 250 m
simetria 4

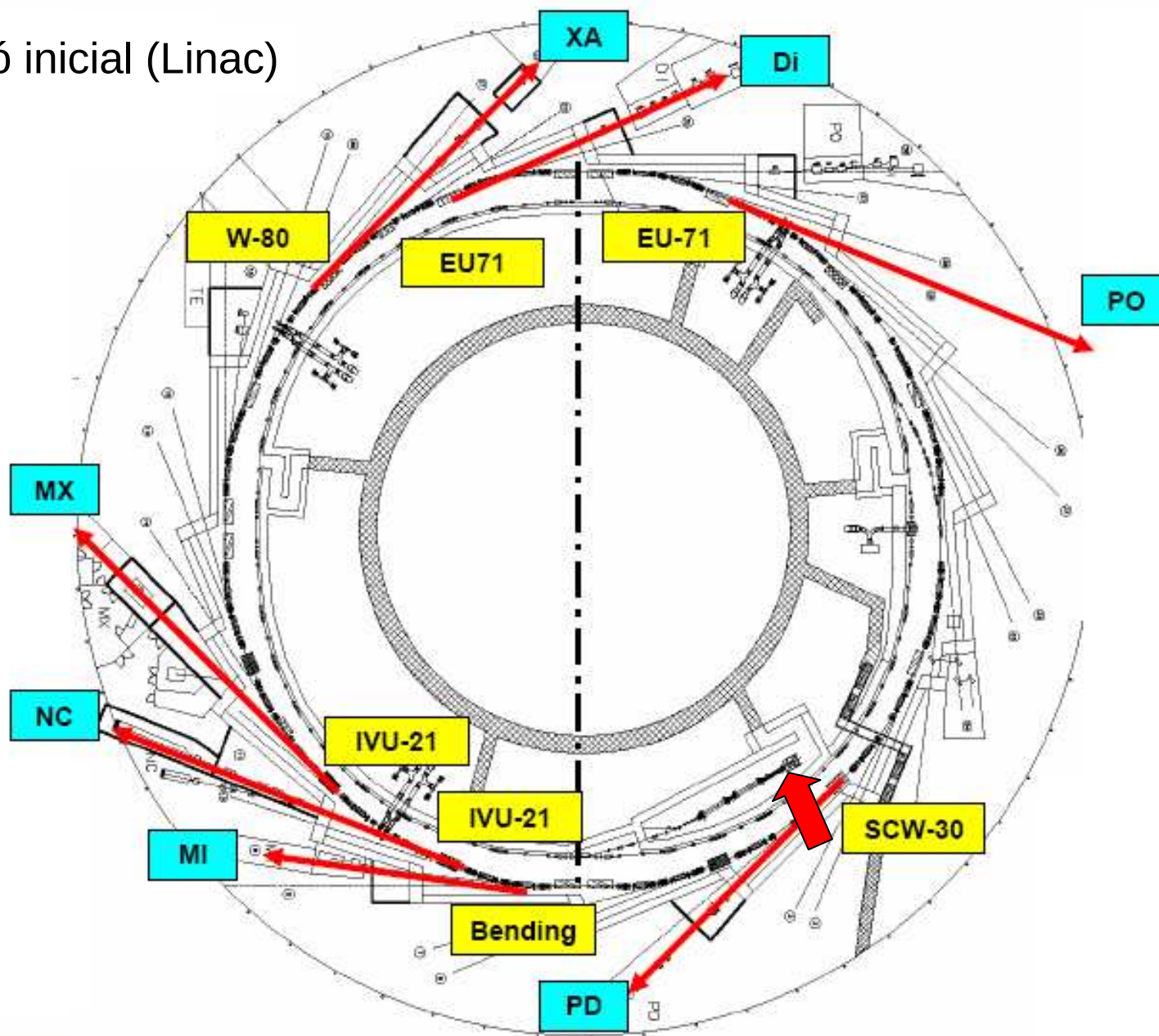
Anell d'emmagatzament:
3 GeV, 268 m
16 cel.les
simetria 4

16 seccions rectes de
8m, 4.4m i 2.6 m de llarg

**Linac: 100 MeV
a 3 GHz**



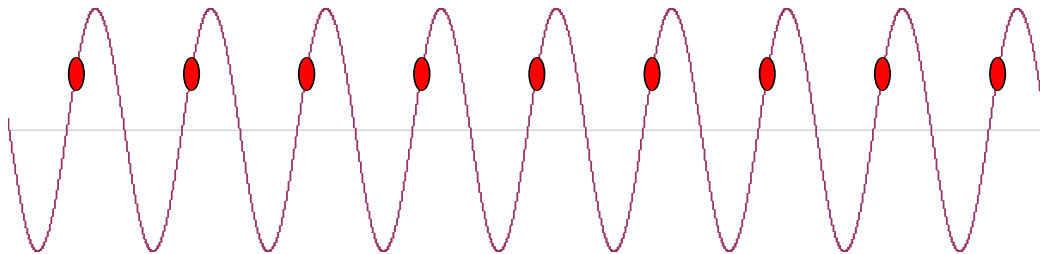
Acceleració inicial (Linac)



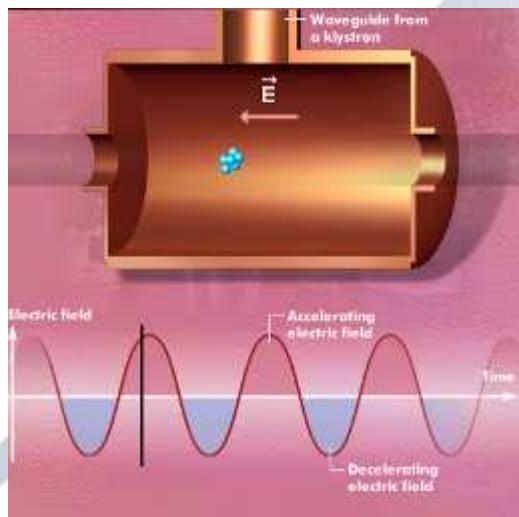
Acceleració inicial (Linac)



- ❑ Per accelerar a altes energies ja no podem fer servir voltatge constant
- ❑ Hem d'anar a voltatges d'alta freqüència: 500 MHz – 3 GHz



Sincronitzar el pas dels electrons amb el pic de l'ona del camp elèctric

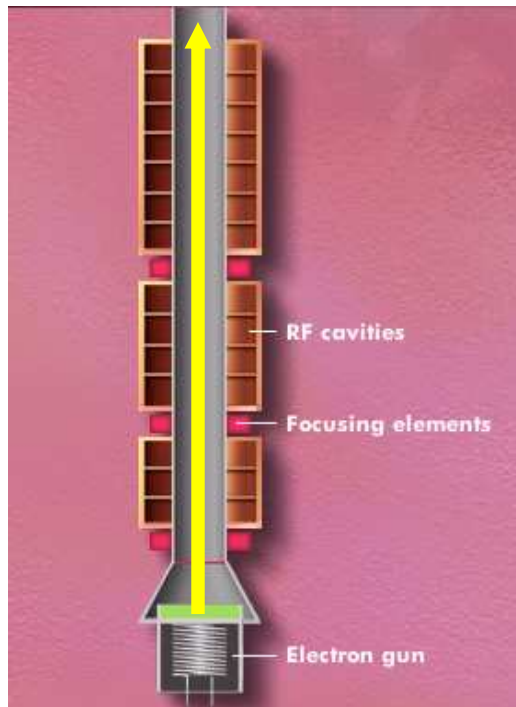


Cavitat de RF
(semblant a un microones)

$$F(t) = q \mathbf{E}(t)$$



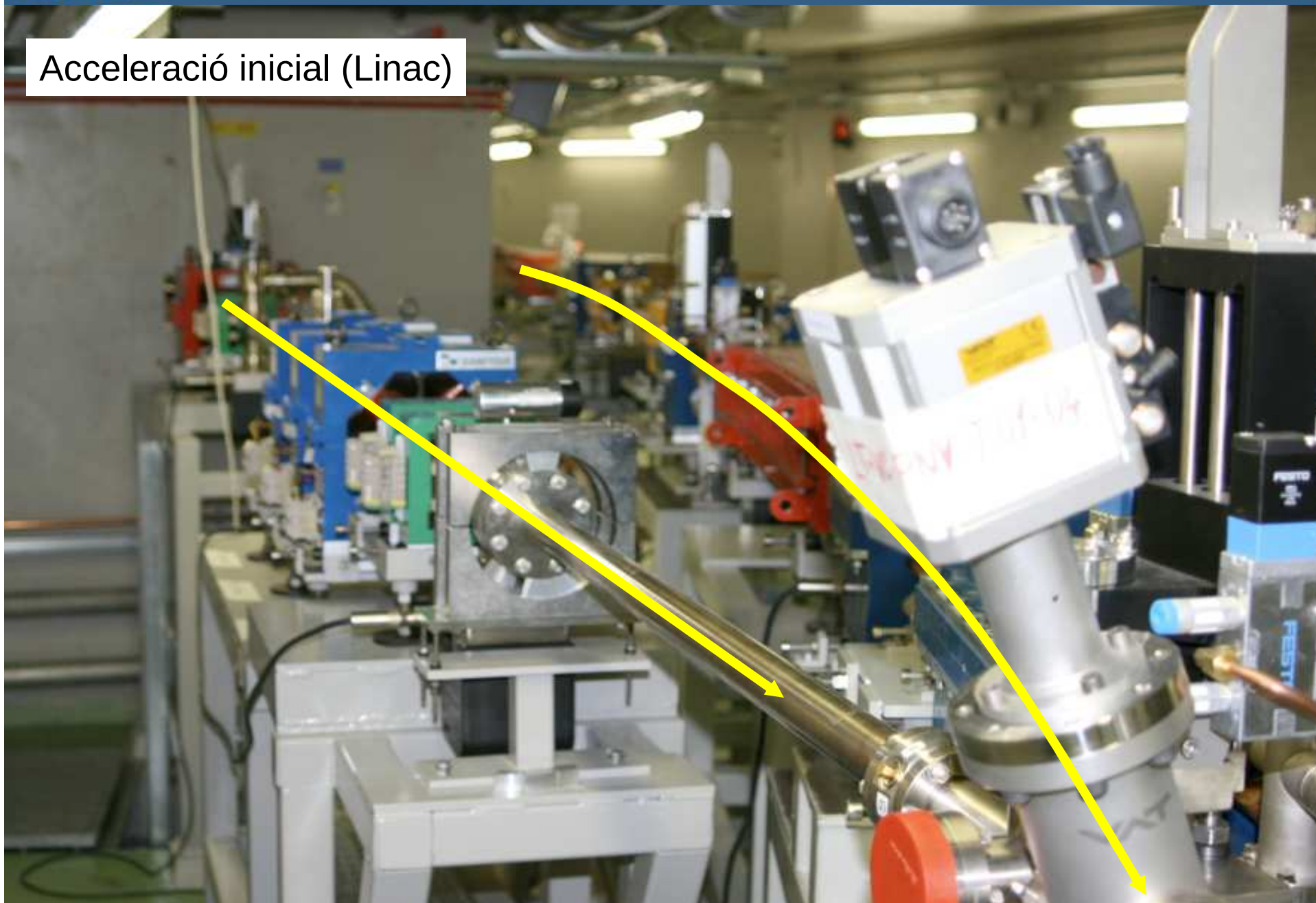
Acceleració inicial (Linac): discretitza els electrons



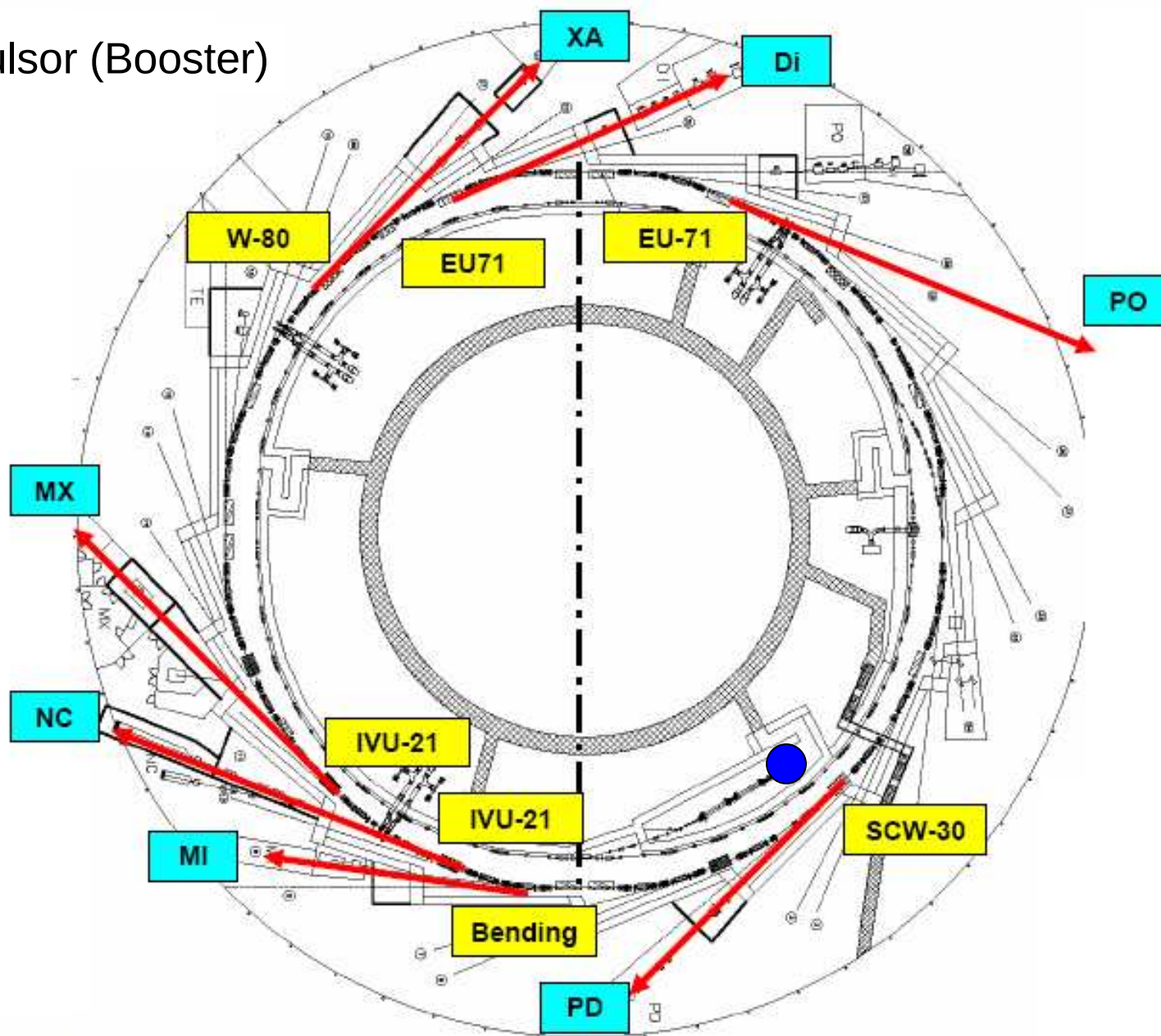
LINAC: de 0.1 a 100 milions de volts en 10 m

v de 60% a 99.998% de c

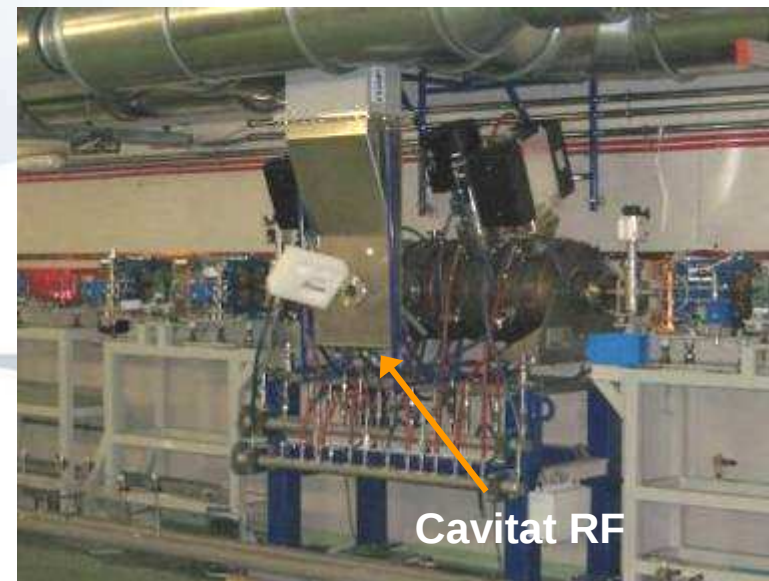
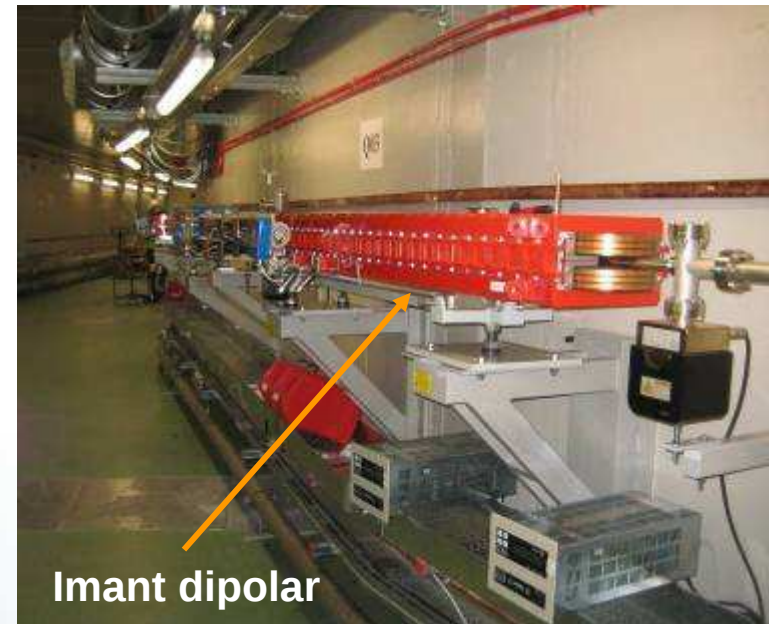
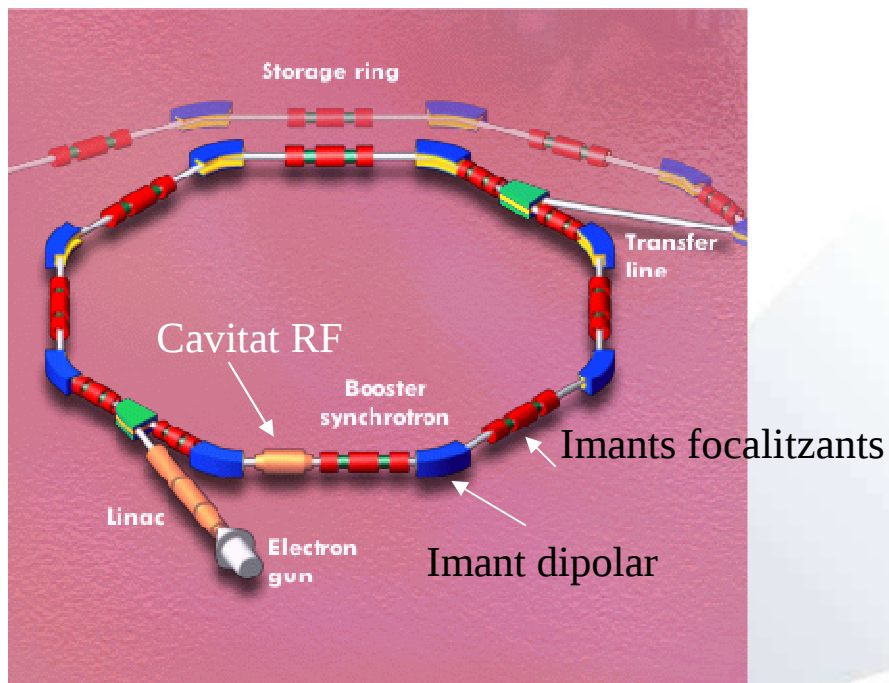
Acceleració inicial (Linac)



Anell propulsor (Booster)



Anell propulsor (Booster)

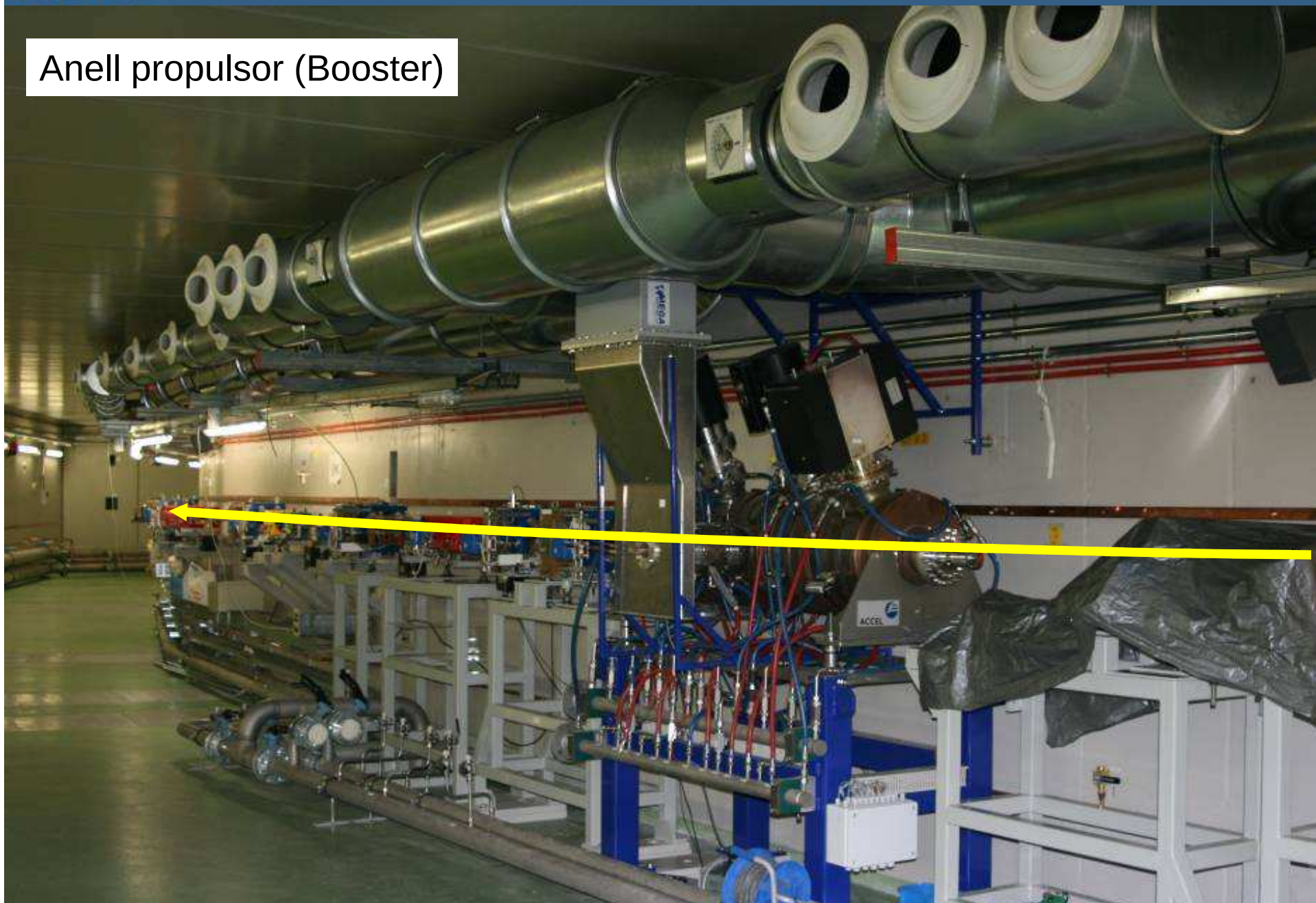


BOOSTER: 100 MeV a 3 GeV

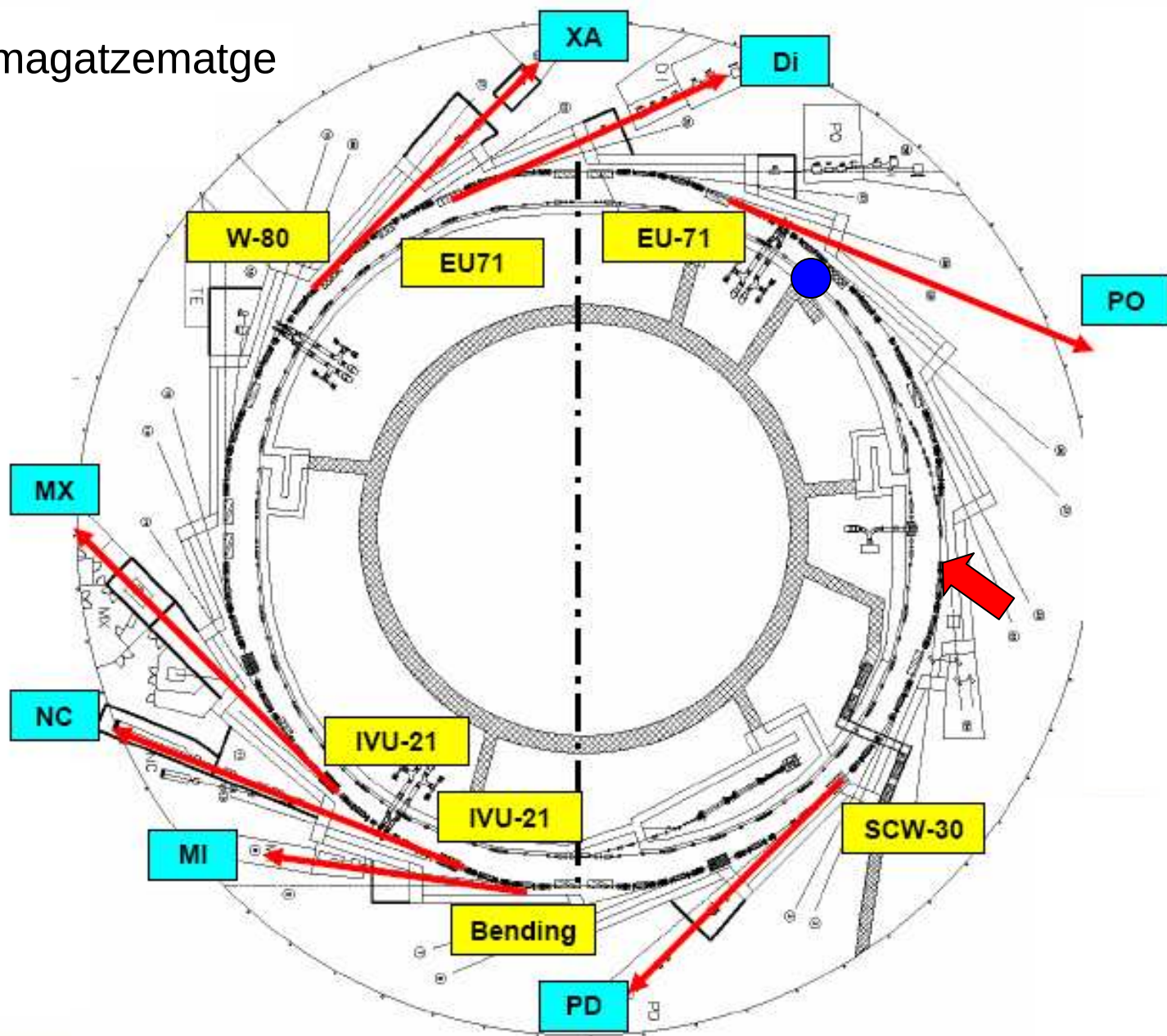
v de 99.998% a 99.99999855% de c

- ❑ Accelerador circular
- ❑ RF per augmentar l'energia
- ❑ Imants per mantenir els electrons circulant

Anell propulsor (Booster)



Anell d'emmagatzematge



Anell d'emmagatzematge



Centenars de bombes iòniques mantenen un buit de 10^{-10} mbar

$\vec{B}$

32 dipols (1.42 T)



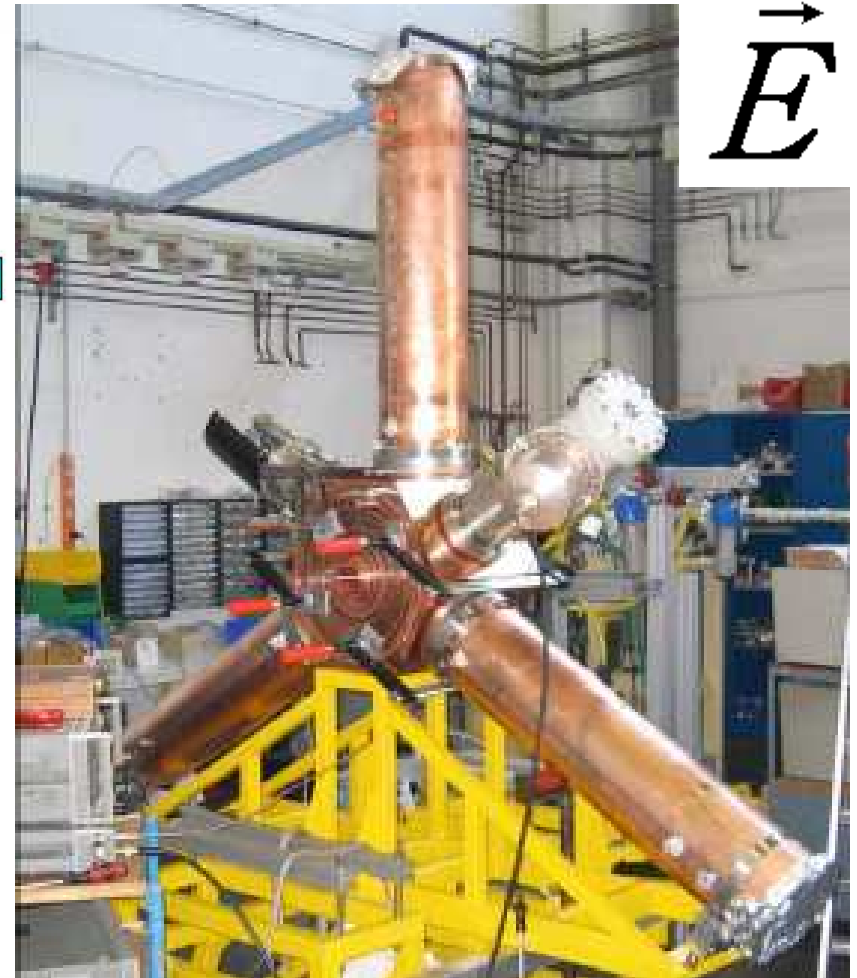
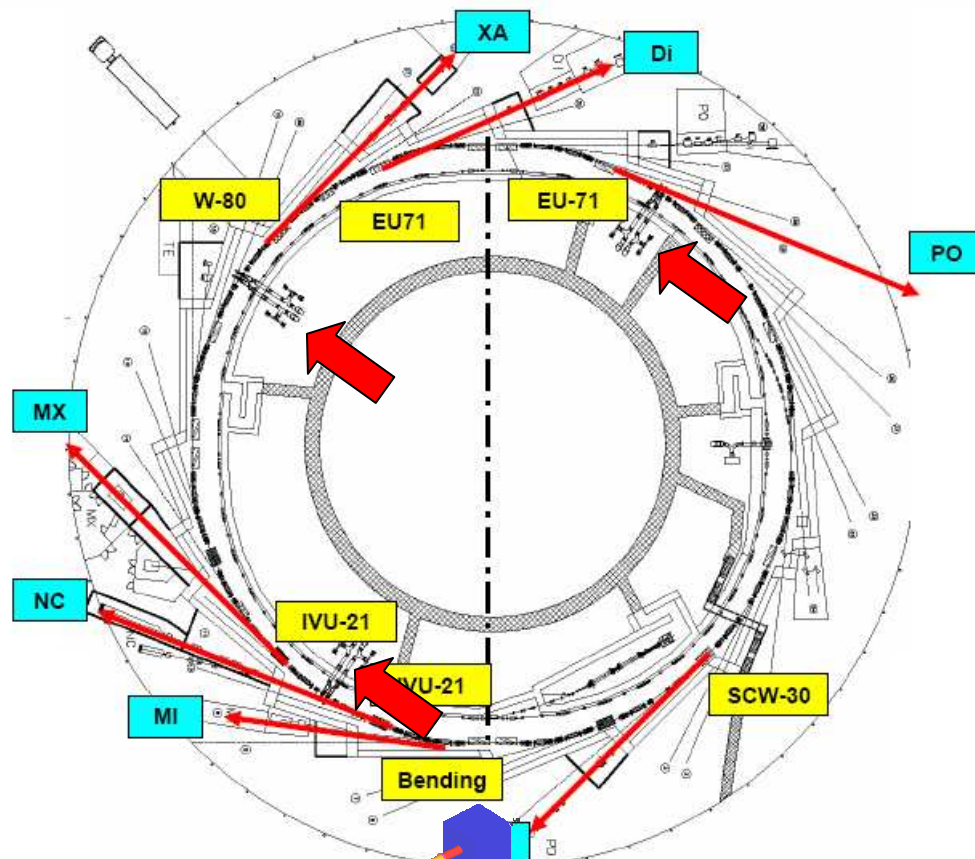
128 quadrupols de 500 mm



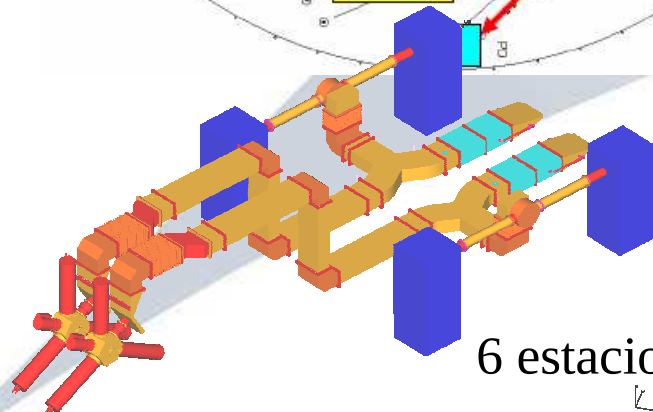
120 sextupols de 150 mm,



més de 100 correctors



$\vec{E}$

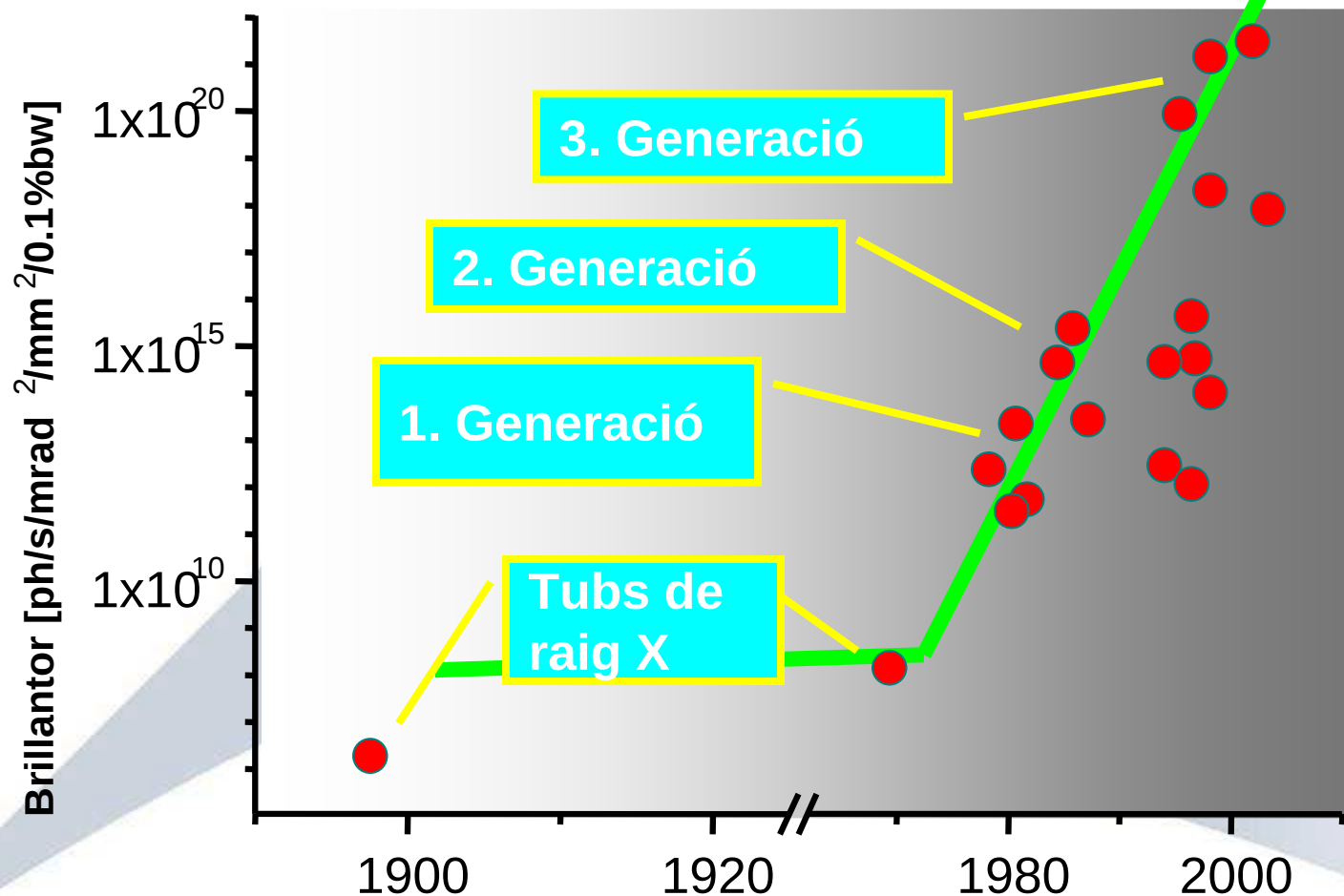


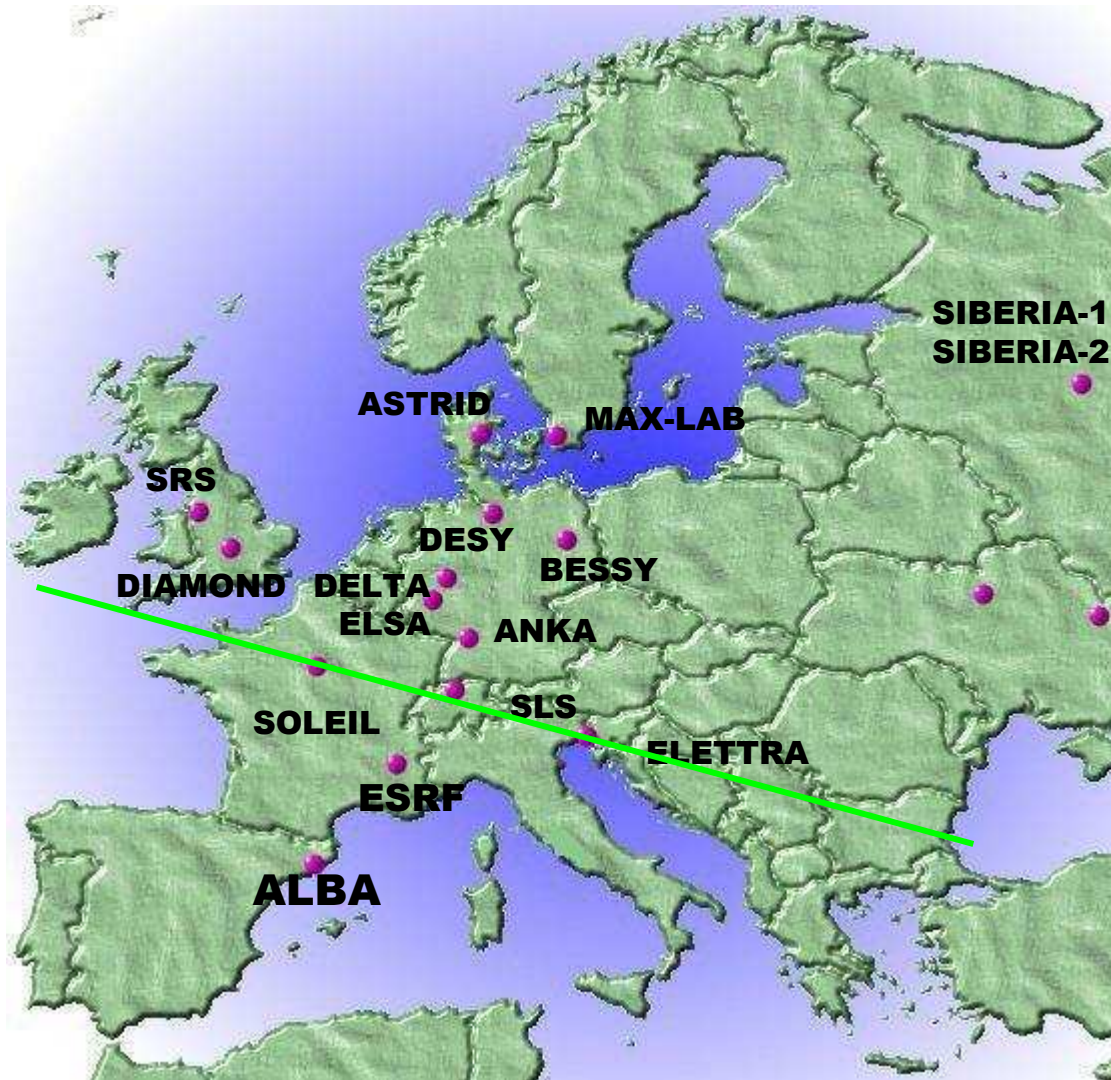
6 estacions de ràdiofreqüència per a l'anell d'emmagatzament

Anell d'emmagatzematge



Alba és un sincrotró de 3^a generació





Europa: 18

Amèrica: 14

Àsia: 28

Oceania: 1

> 60 sincrotrons arreu del món !



El sincrotró ALBA





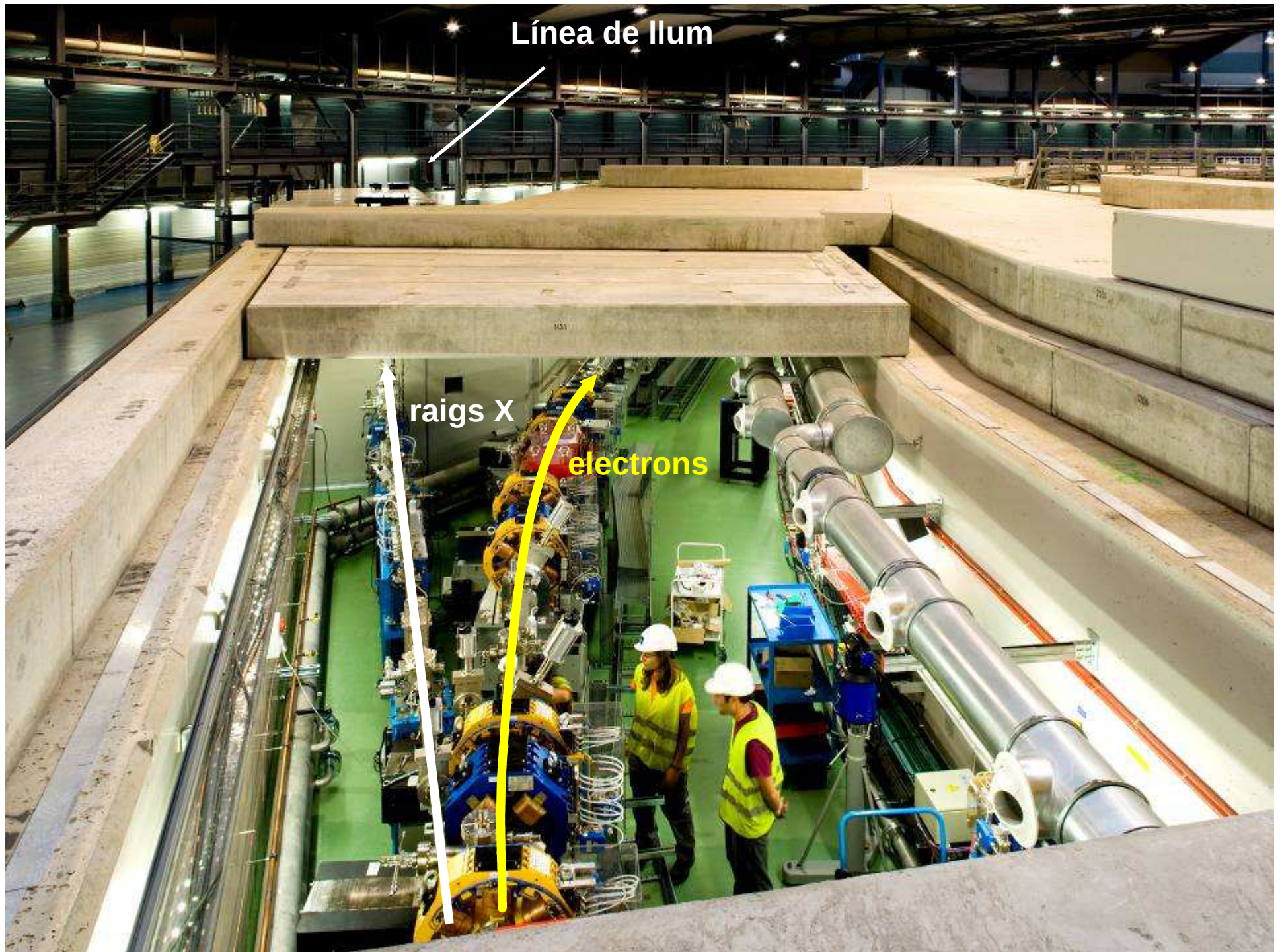
El sincrotrón ALBA



Línea de llum

raigs X

electrons



Port	Línia (FL)	Tècniques experimentals	Aplicacions científiques
4	MSPD (SCW-30)	Ciència de materials i difracció de pols / Altes pressions	Estructura atòmica de materials, difracció amb resolució temporal
9	MISTRAL (BM)	Microscòpia de raigs X	Tomografia criogènica de mostres biològiques. Espectroscòpia amb resolució espacial.
11	NCD (IVU-21)	Difracció no cristal·lina	Estructura i transformació de fase de fibres biològiques, polímers, macromolècules i solucions.
13	XALOC (IVU-21)	Cristal·lografia macromolecular	Estructura atòmica de proteïnes o ADN o els seus complexos.
22	CLÆSS (MPW-80)	Espectroscòpies d'absorció i d'emissió	Estructura atòmica de materials, difracció amb resolució temporal. Reaccions químiques
24	CIRCE (EU-62)	Microscòpia i espectroscòpia de fotoemissió (PEEM) i a prop de pressions atmosfèriques (NAPP)	Nanociència i visualització de dominis magnètics (PEEM) o química de superfícies (NAPP).
29	BOREAS (EU-71)	Dicroisme magnètic (XMCD/XMLD) i dispersió ressonant	Magnetisme: magnetisme de superfícies i estructura magnètica.

BL04: MSPD

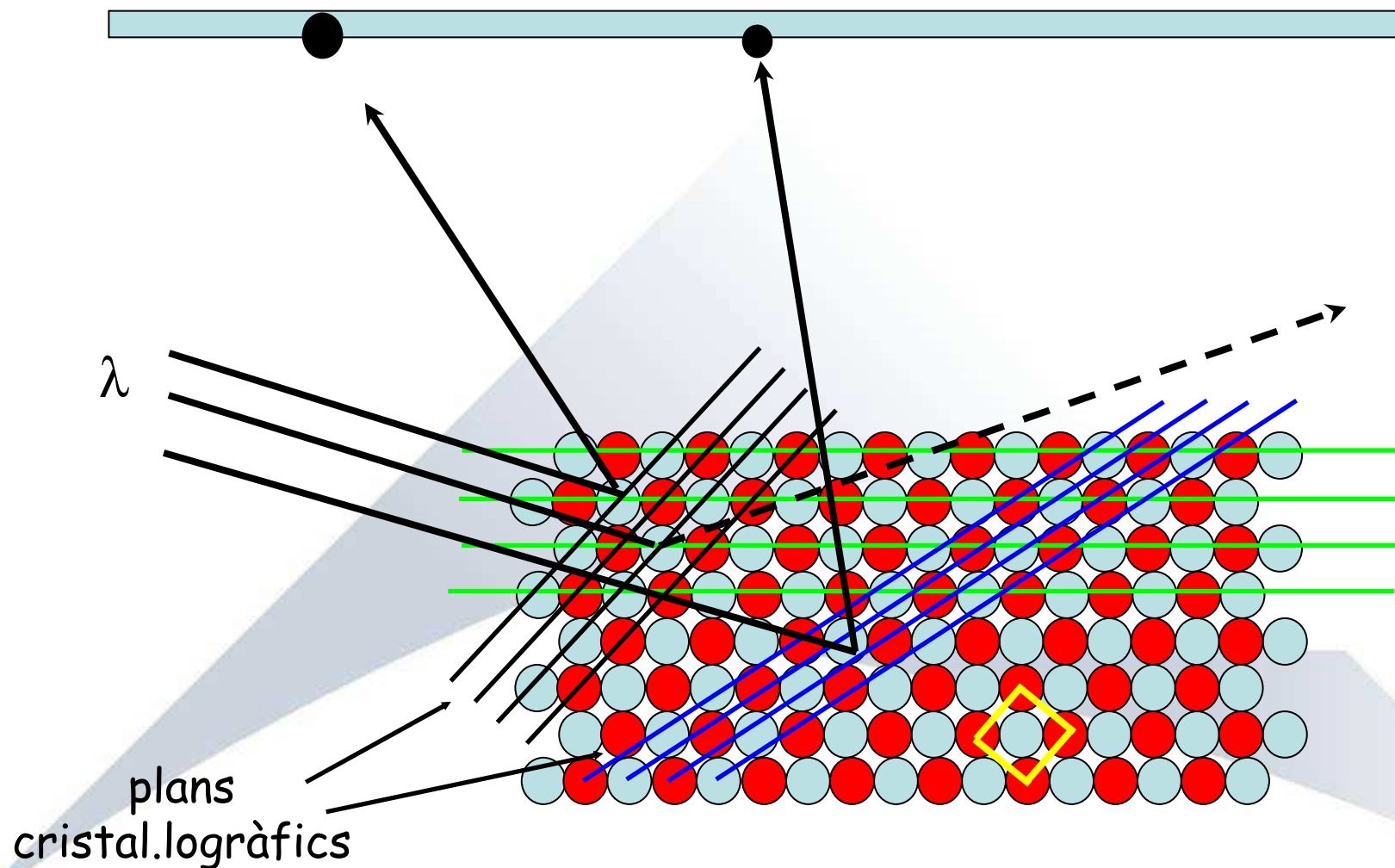
experimental

òptica



La tècnica que empren en aquesta línia és la difracció de raigs X

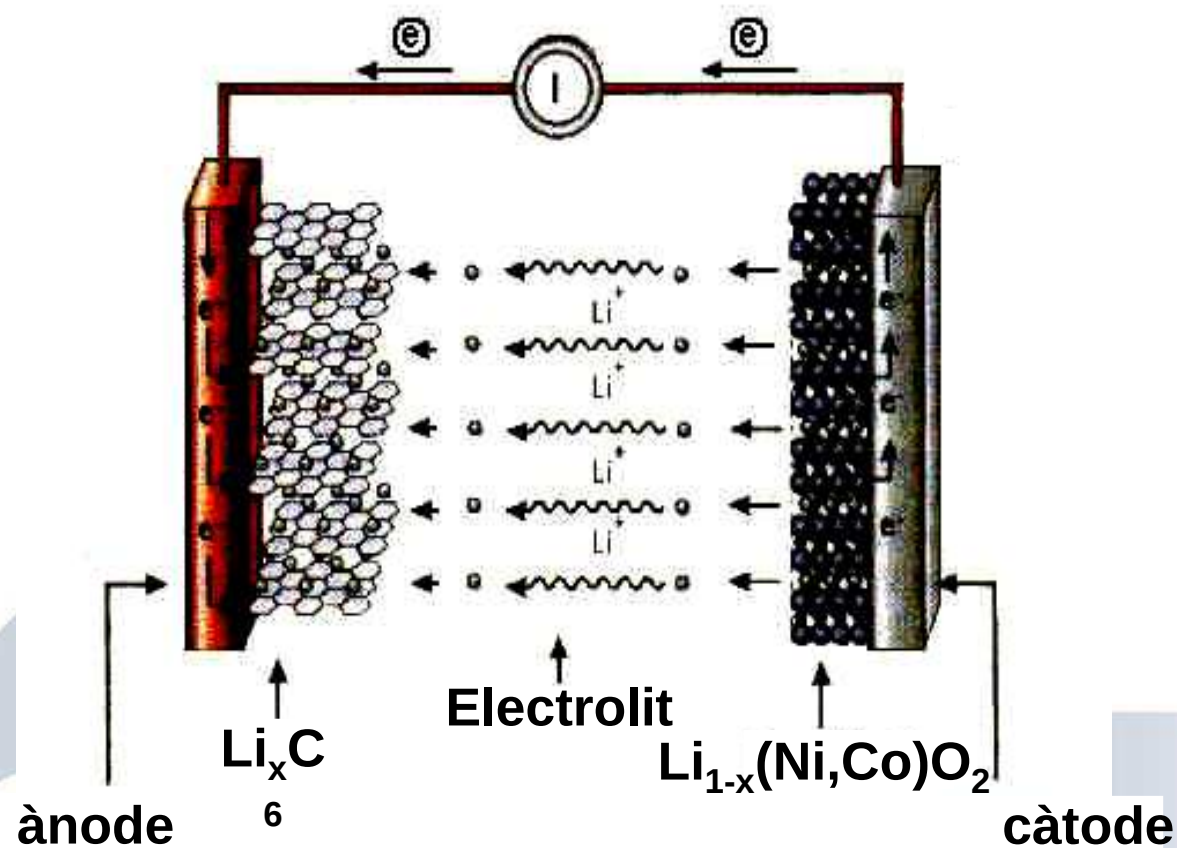
detector



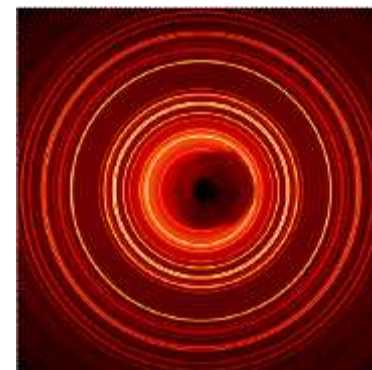
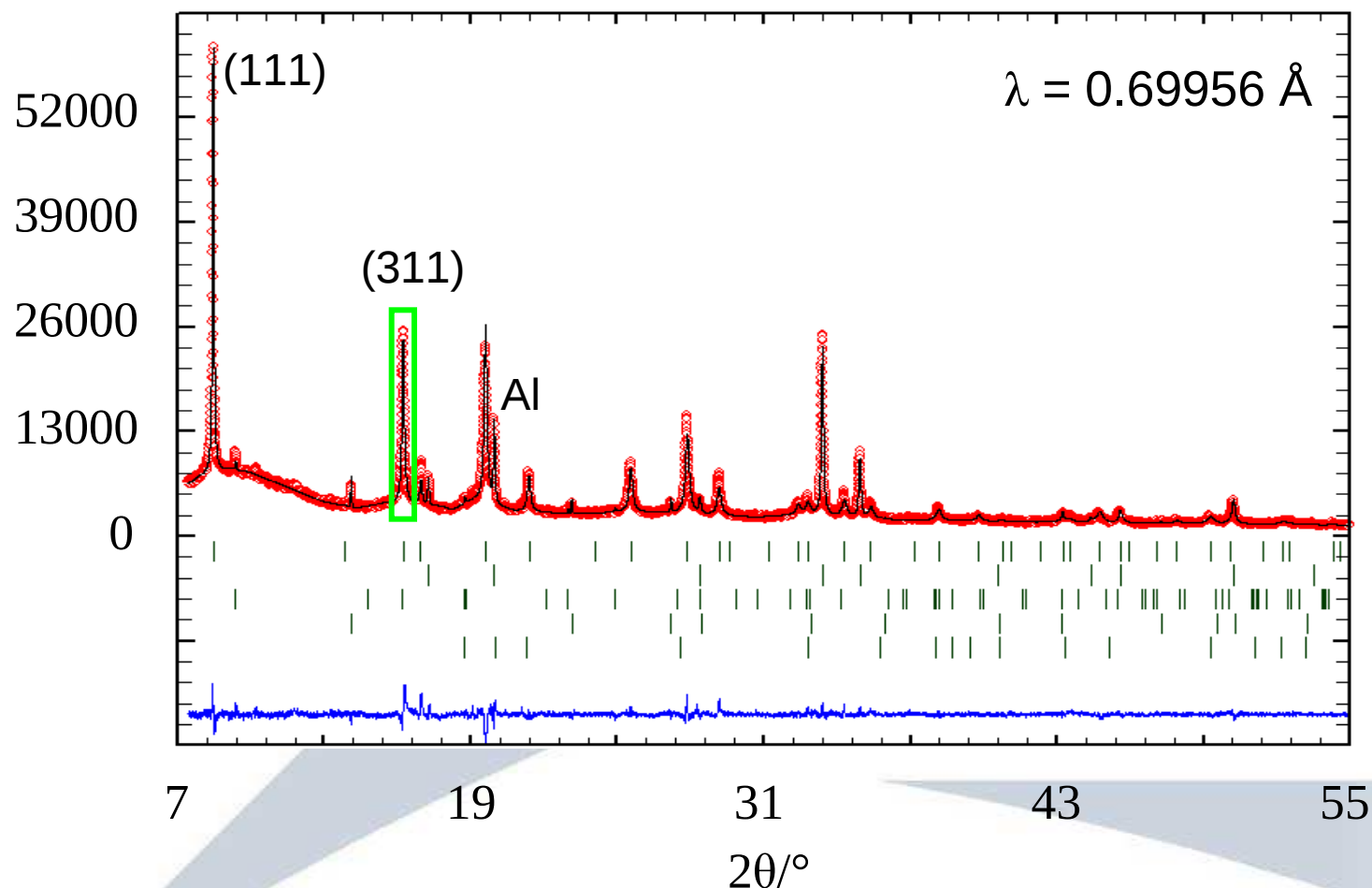
Estudi d'una bateria de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$

- Estructura tipus "spinel" de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ (vàries valències: $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$) i que inclou altres fases.
- Li_{1-0} bateria buida (descarregada), el Li és al càtode
- Li_{1-1} bateria plena (carregada), el Li és a l'ànode
- Preguntes:
 - Què passa amb l'estructura de la bateria durant la càrrega/descàrrega?
 - Hi ha degradació de l'estructura interna de la bateria durant varis cicles de càrrega/descàrrega?
 - Hi ha fases que destrueixen la matriu de la bateria (la matriu és l'encarregada d'emmagatzemar els electrons) i que per tant s'han d'evitar/suprimir?
 - Reversibilitat? Estudis de "doping" o dopatge, estequiometria.
- La mesura de difracció de pols es realitza en transmissió amb una cel.la (que conté la bateria) dissenyada específicament per a l'experiment. Absorció d'alta energia, 10-15 minuts per patró de difracció.
- Podríem fer el mateix amb bateries comercials?

El procés de càrrega i descàrrega d'una bateria Li-ió

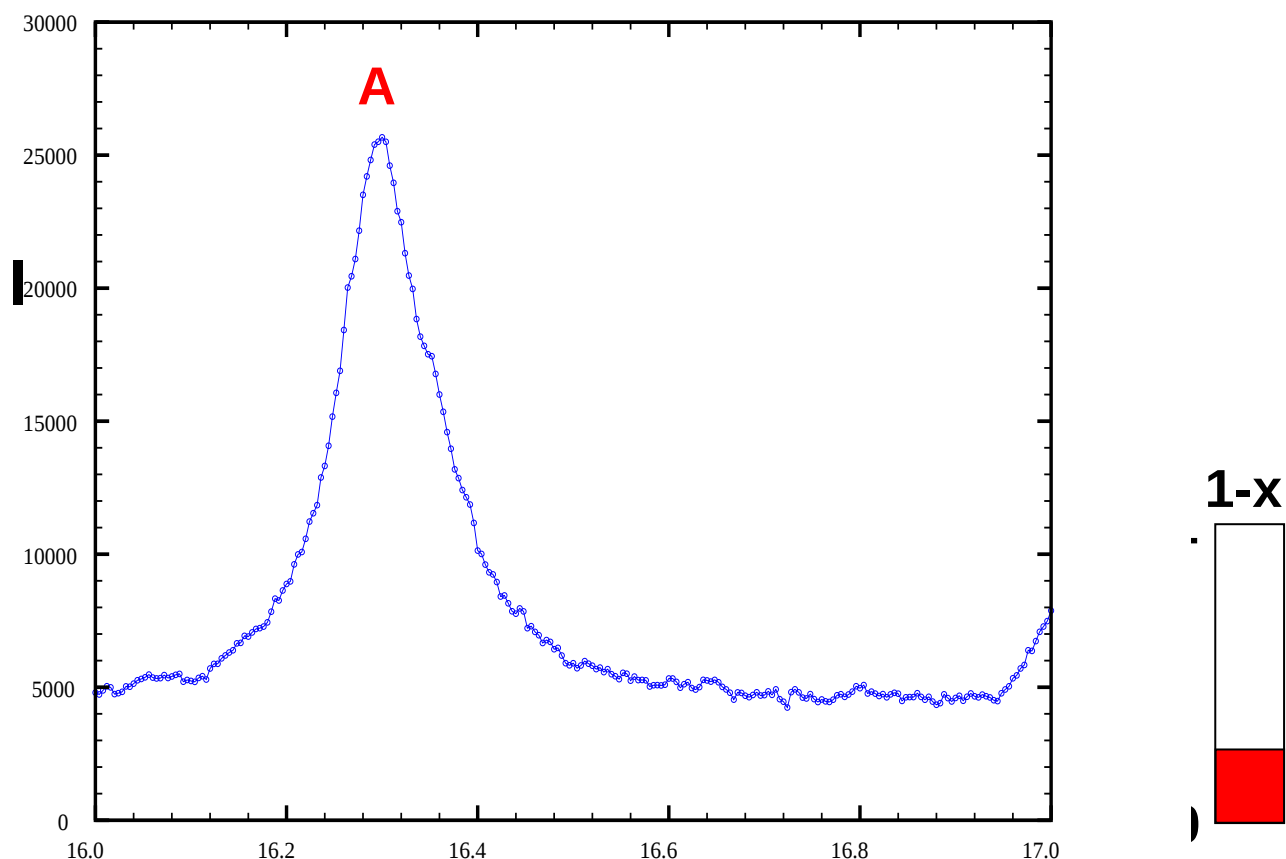


Difractograma *in situ* de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ en la cel·la



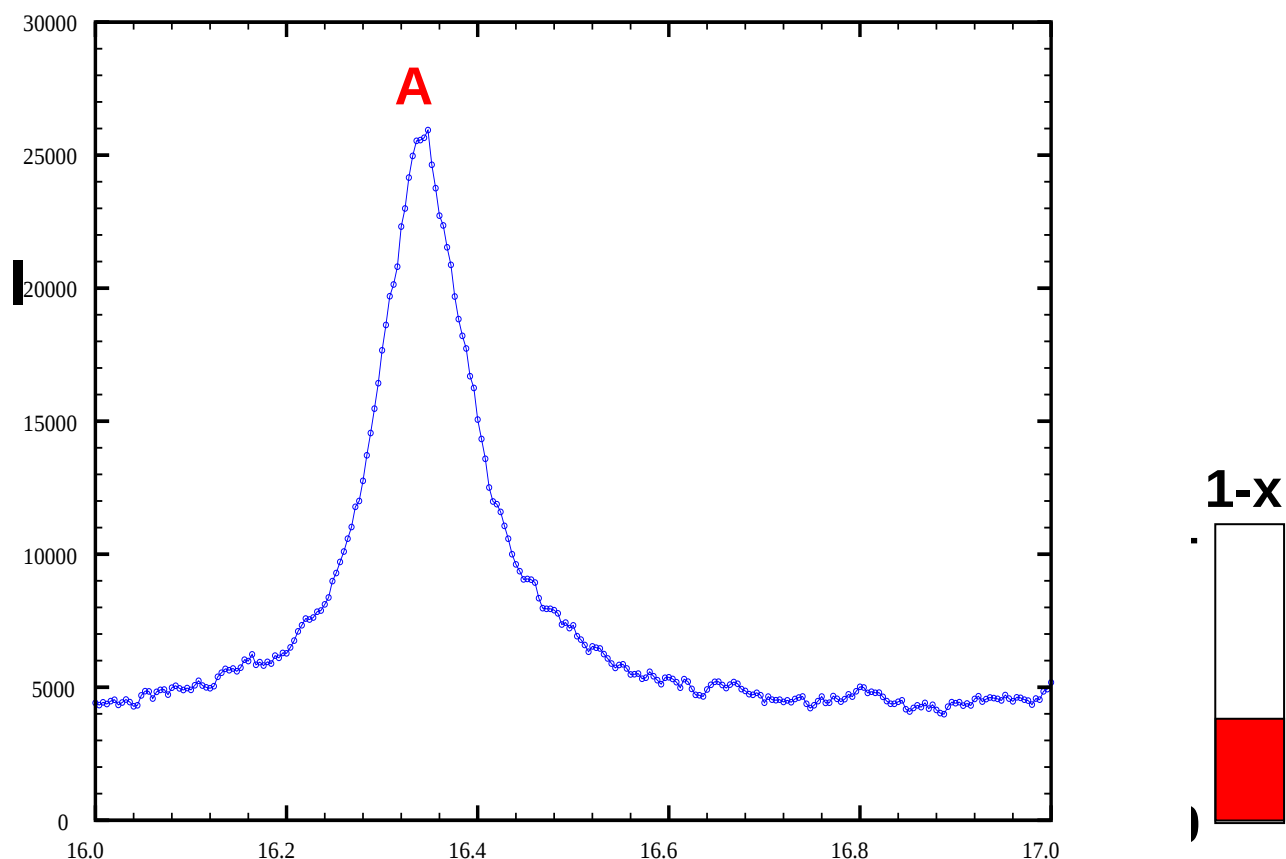
Design and performance of an electrochemical in-situ cell for high resolution full-pattern X-ray powder diffraction C. Baehtz, Th. Buhrmester, N.N. Bramnik, K. Nikolowski, H. Ehrenberg Solid State Ionics 176 (2005) 1647 – 1652

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



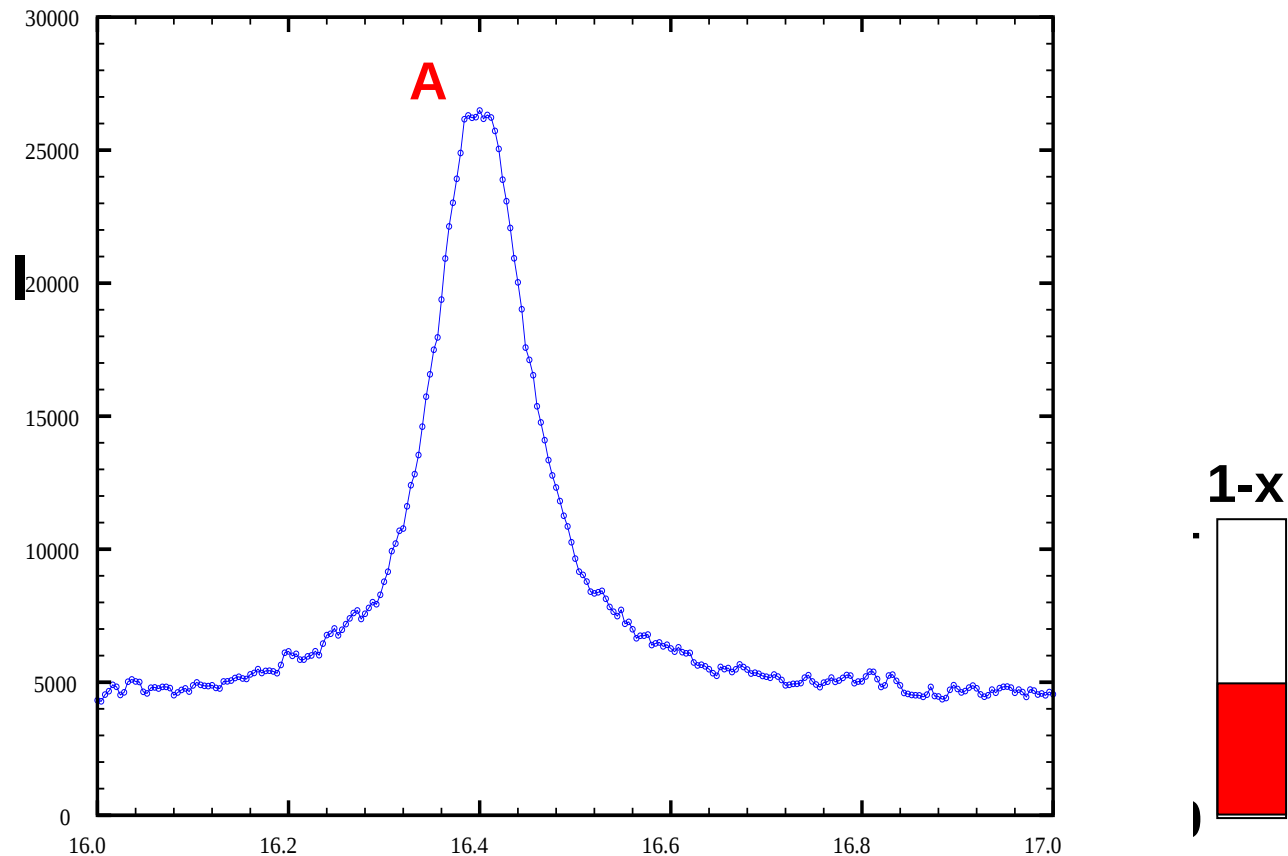
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



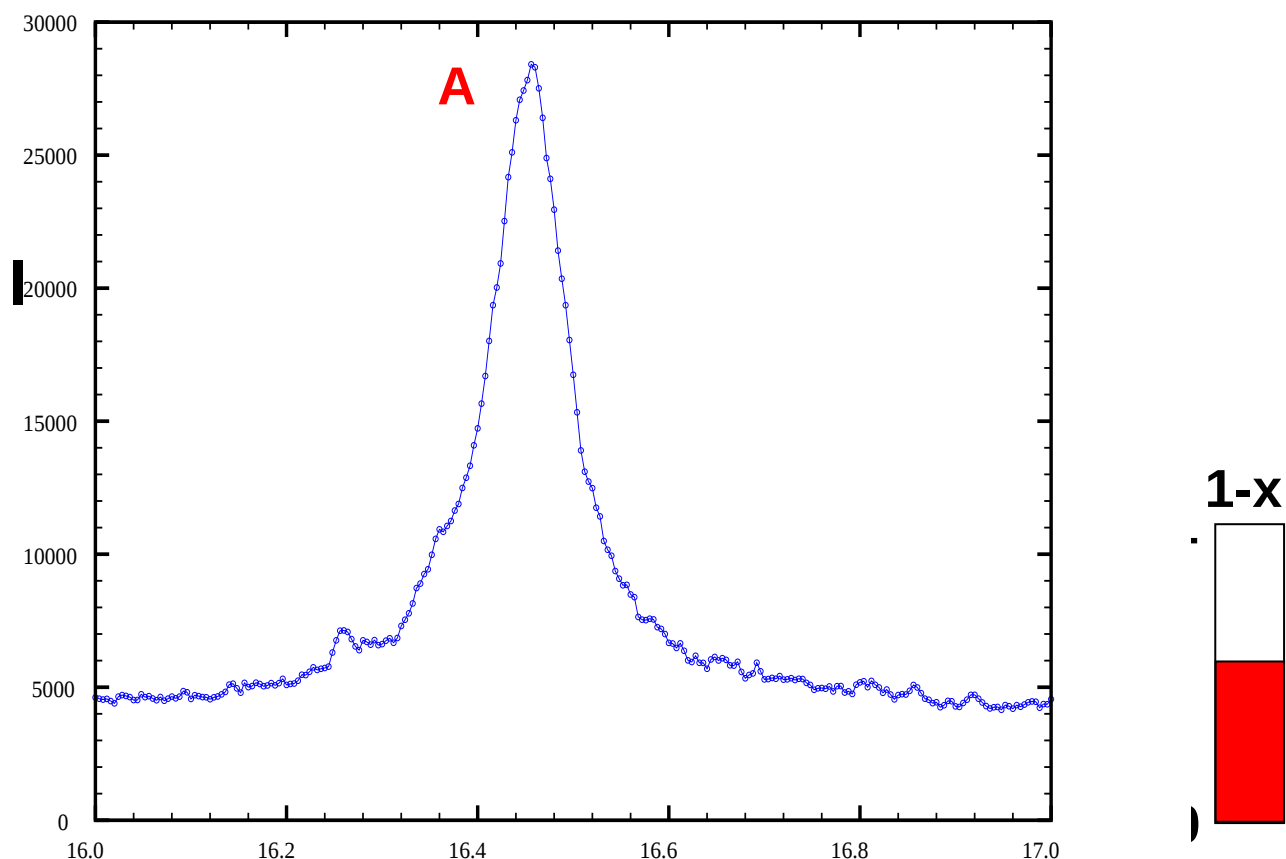
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



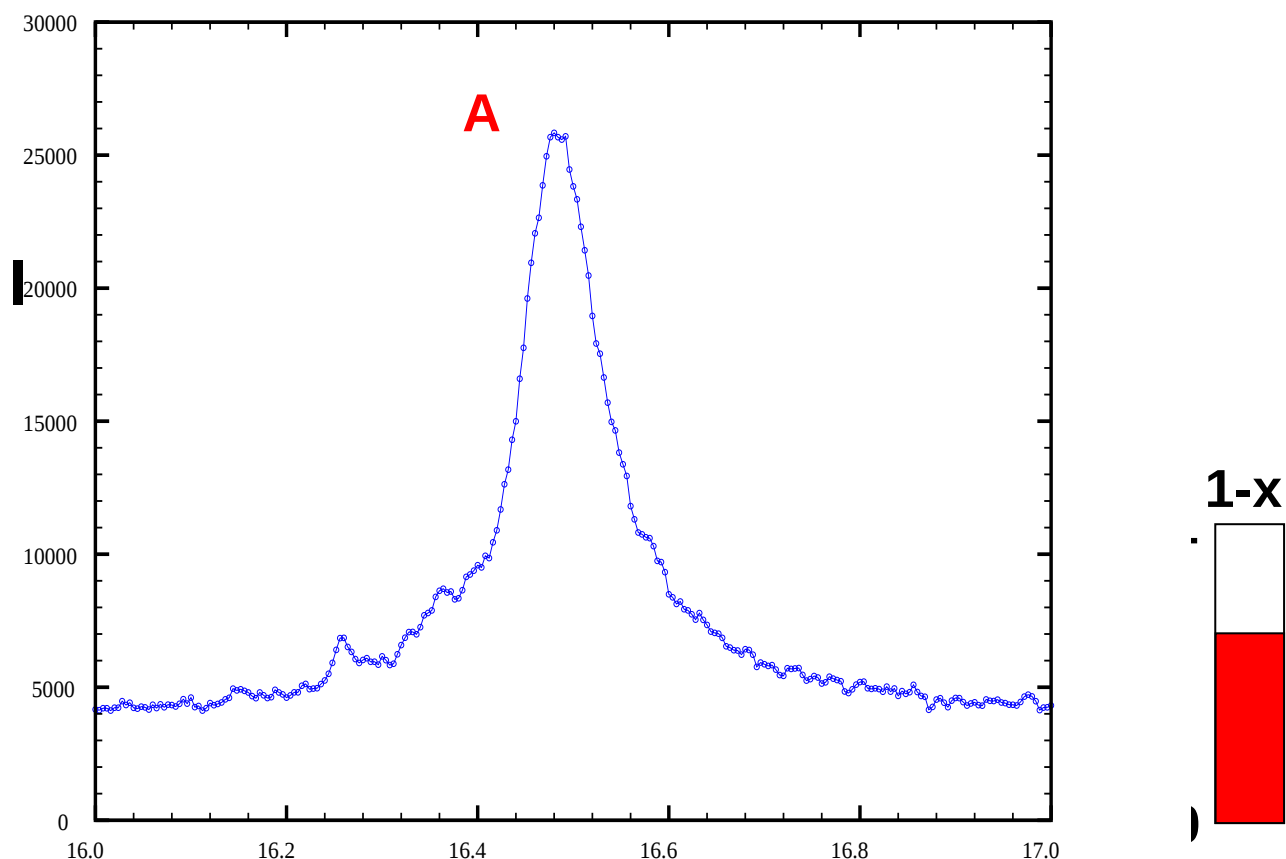
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



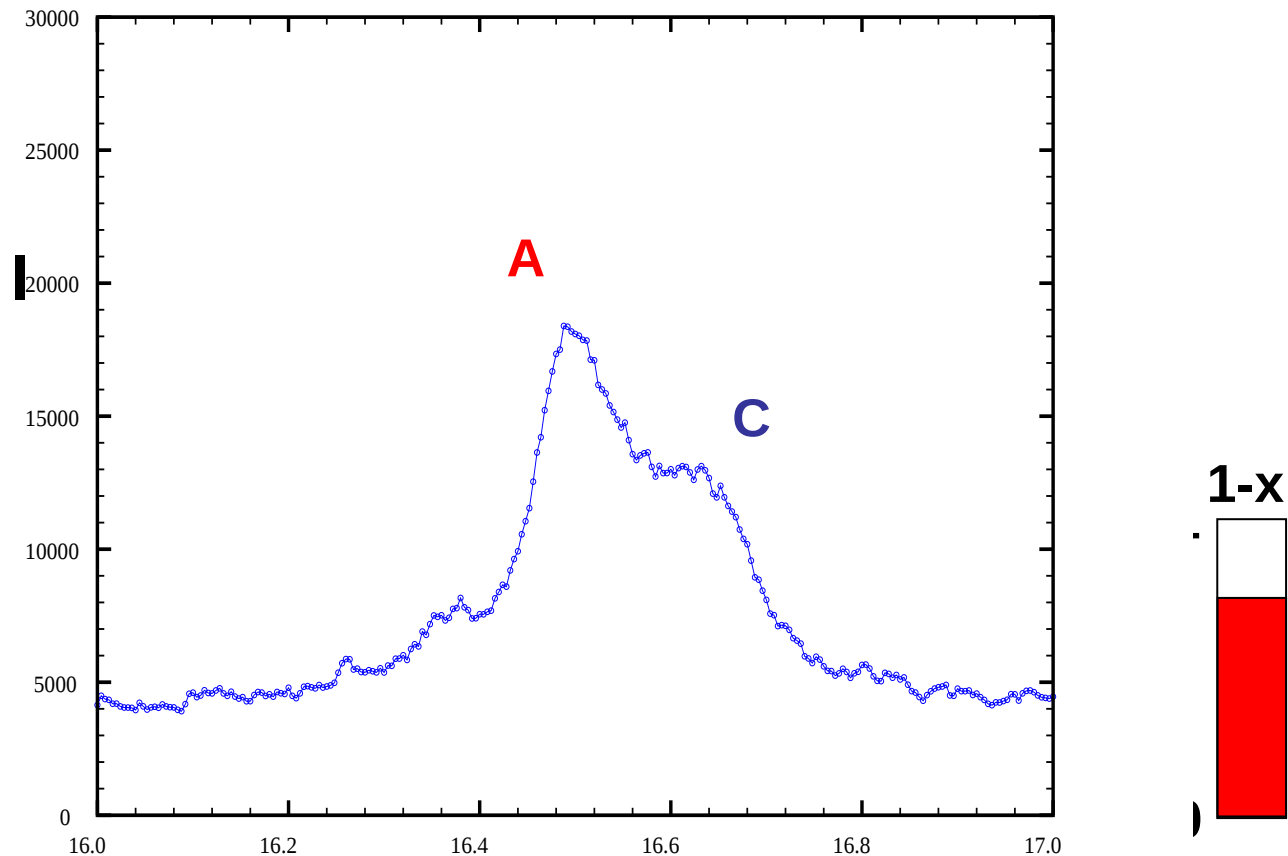
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



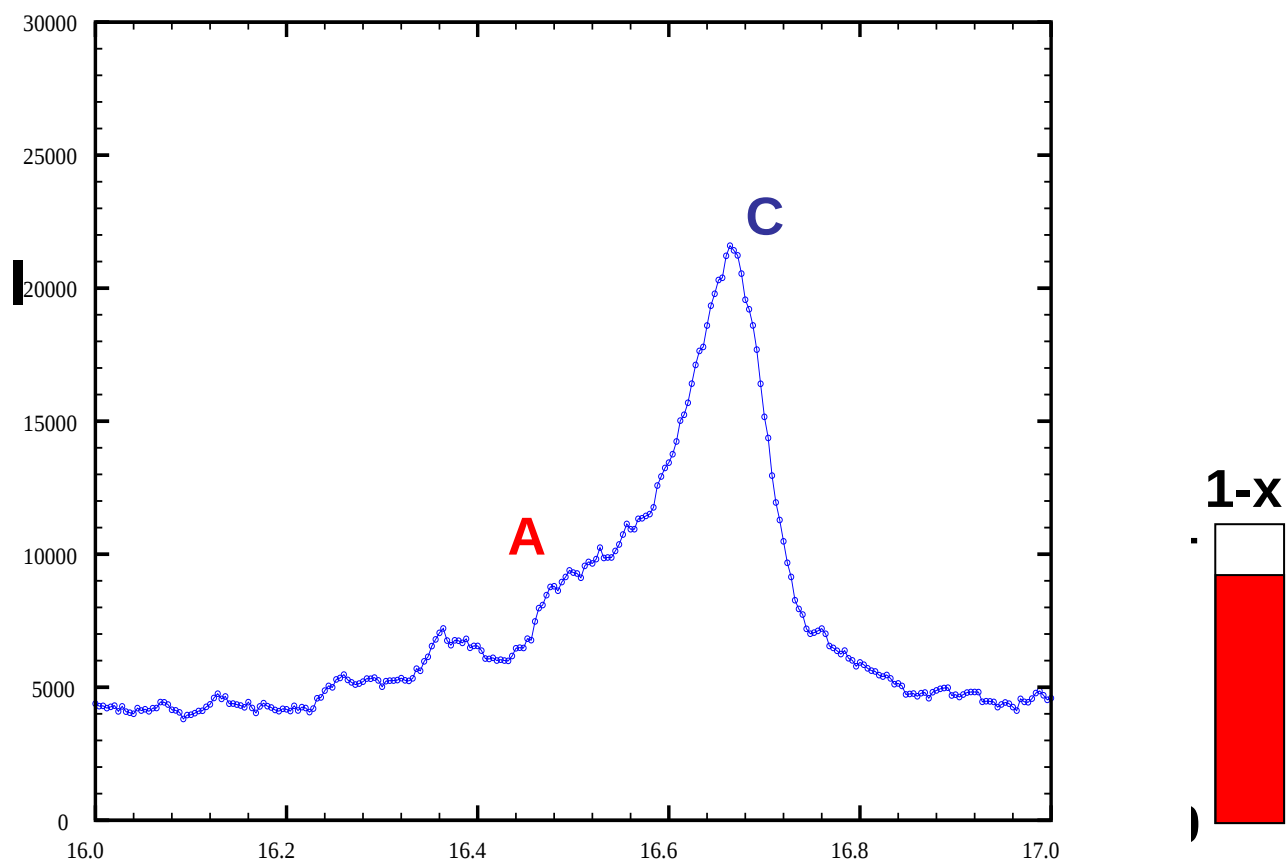
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



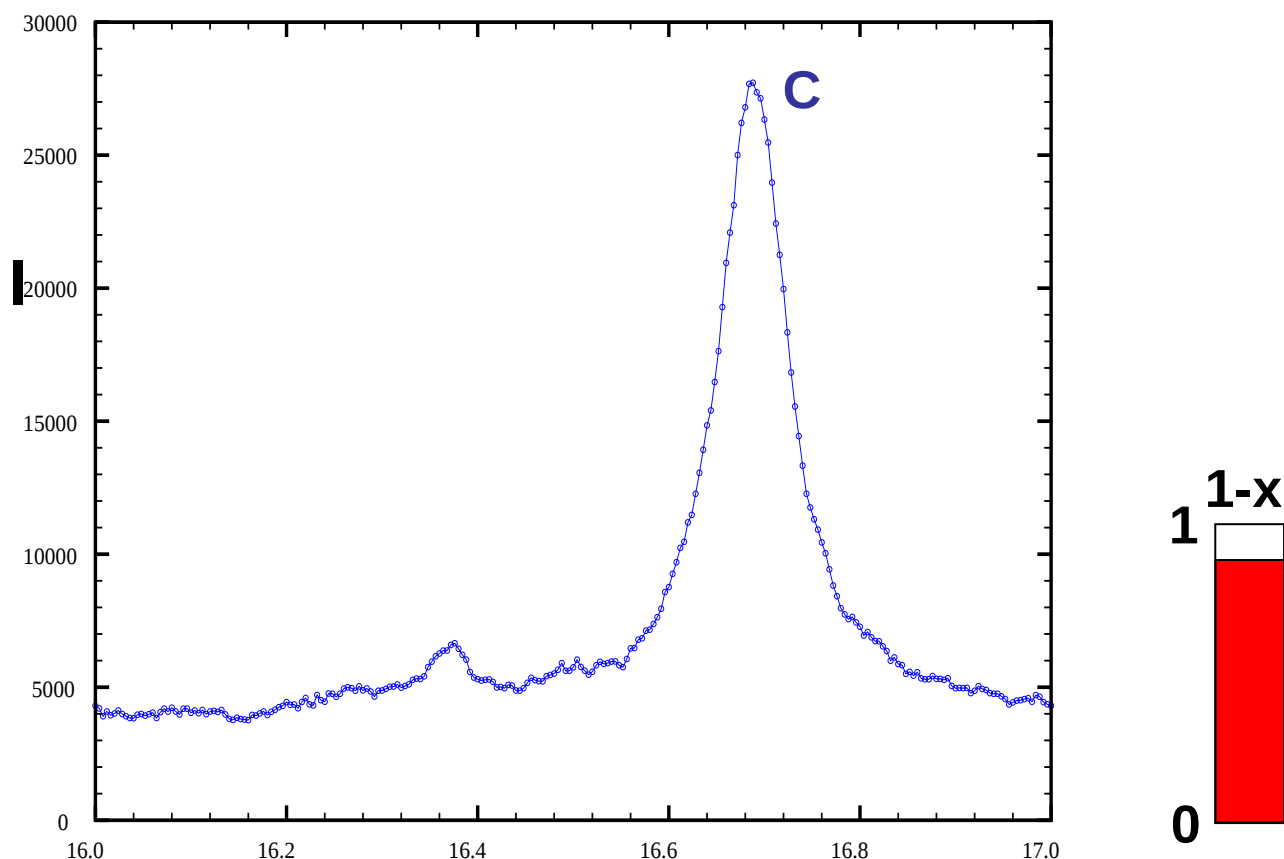
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



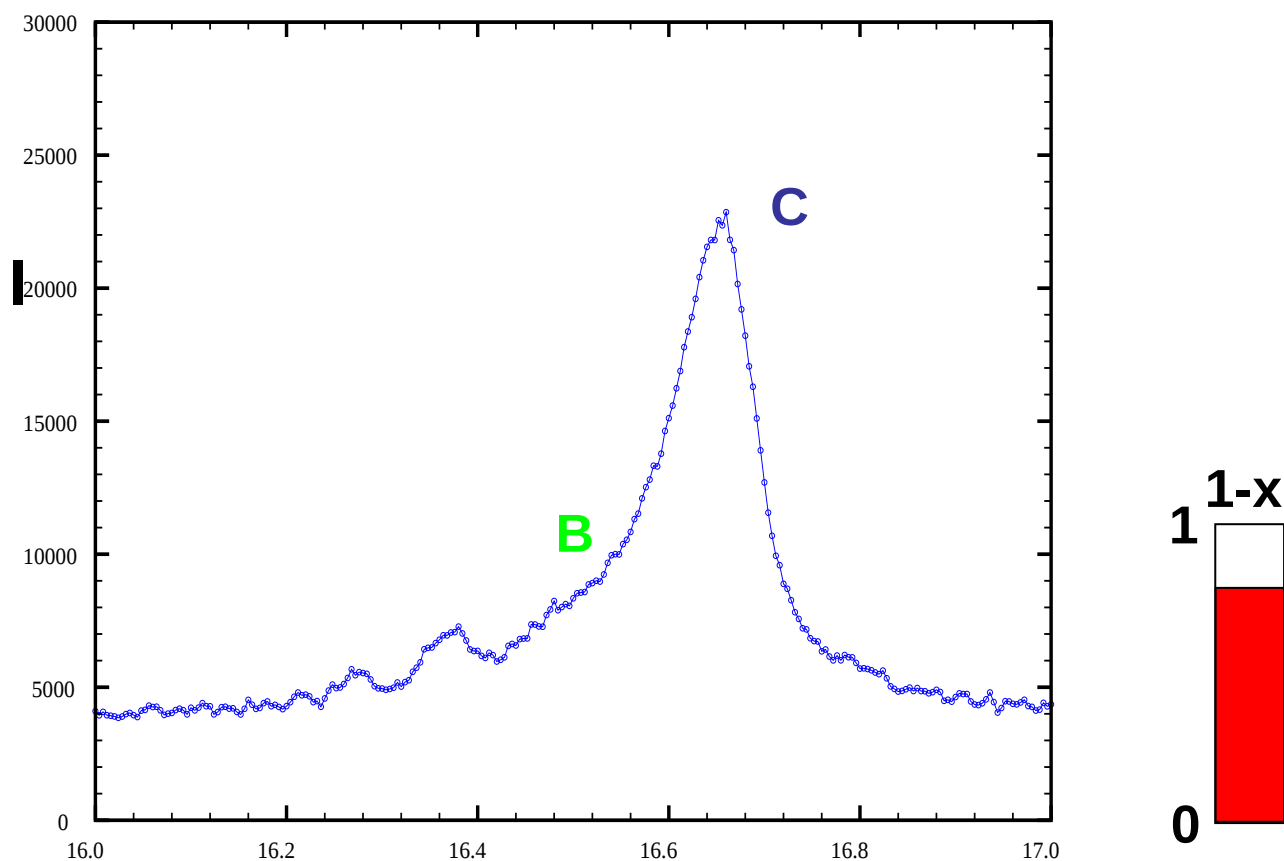
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



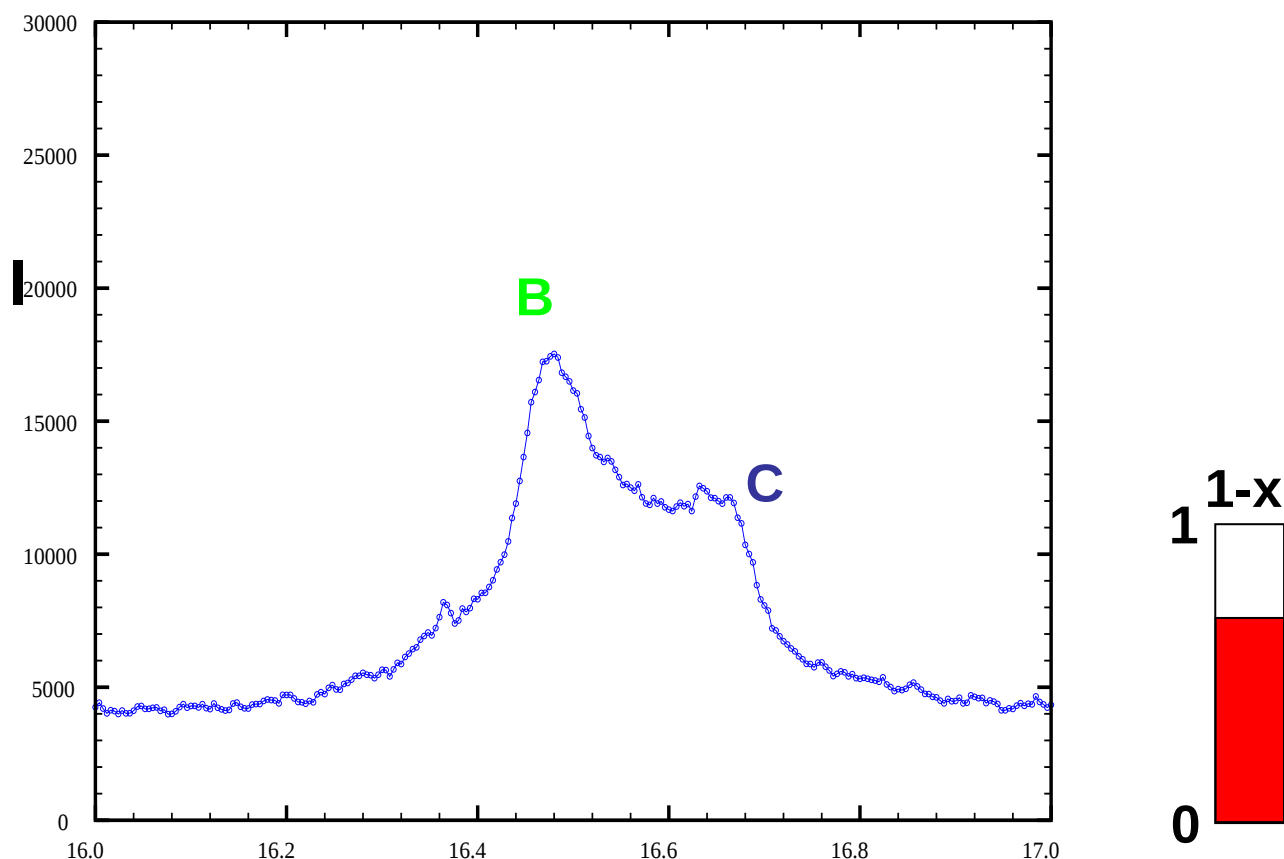
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



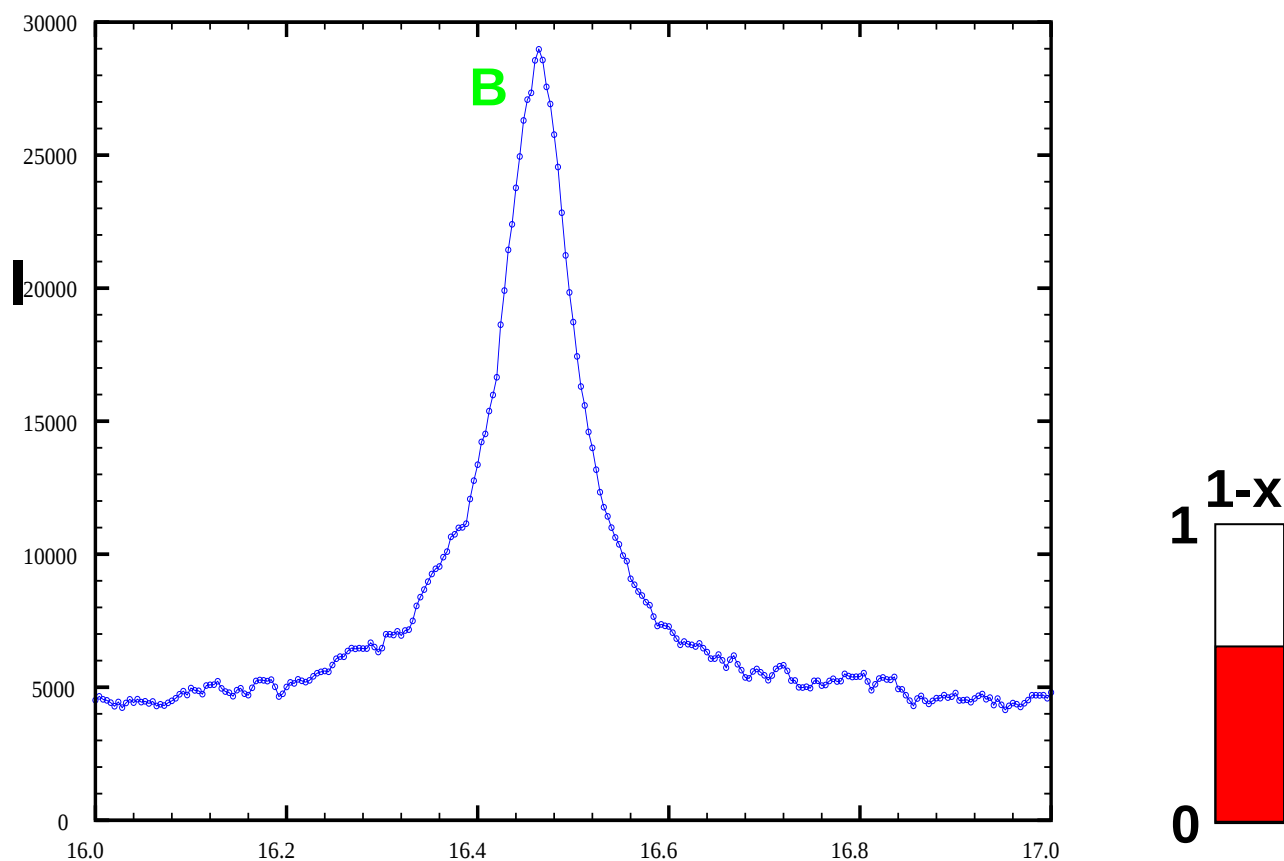
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



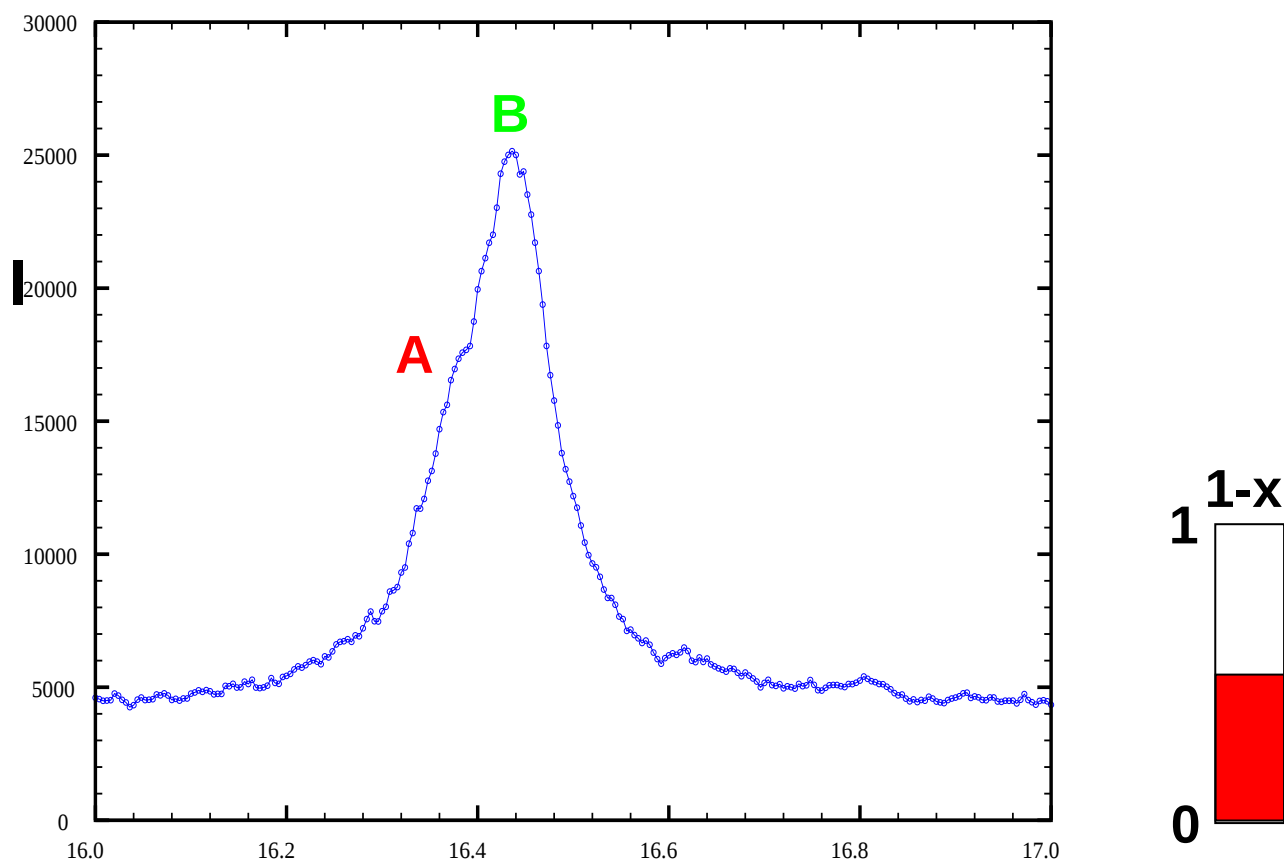
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



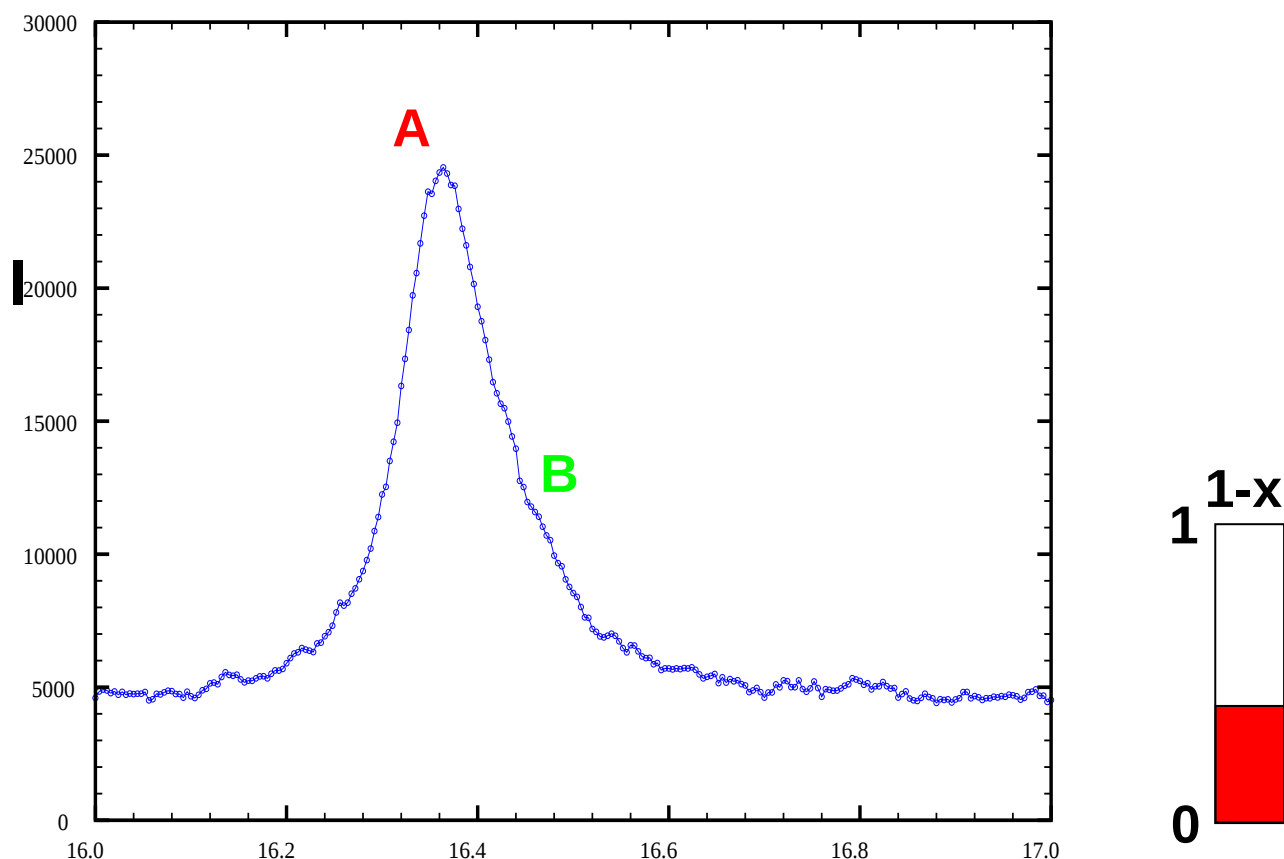
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



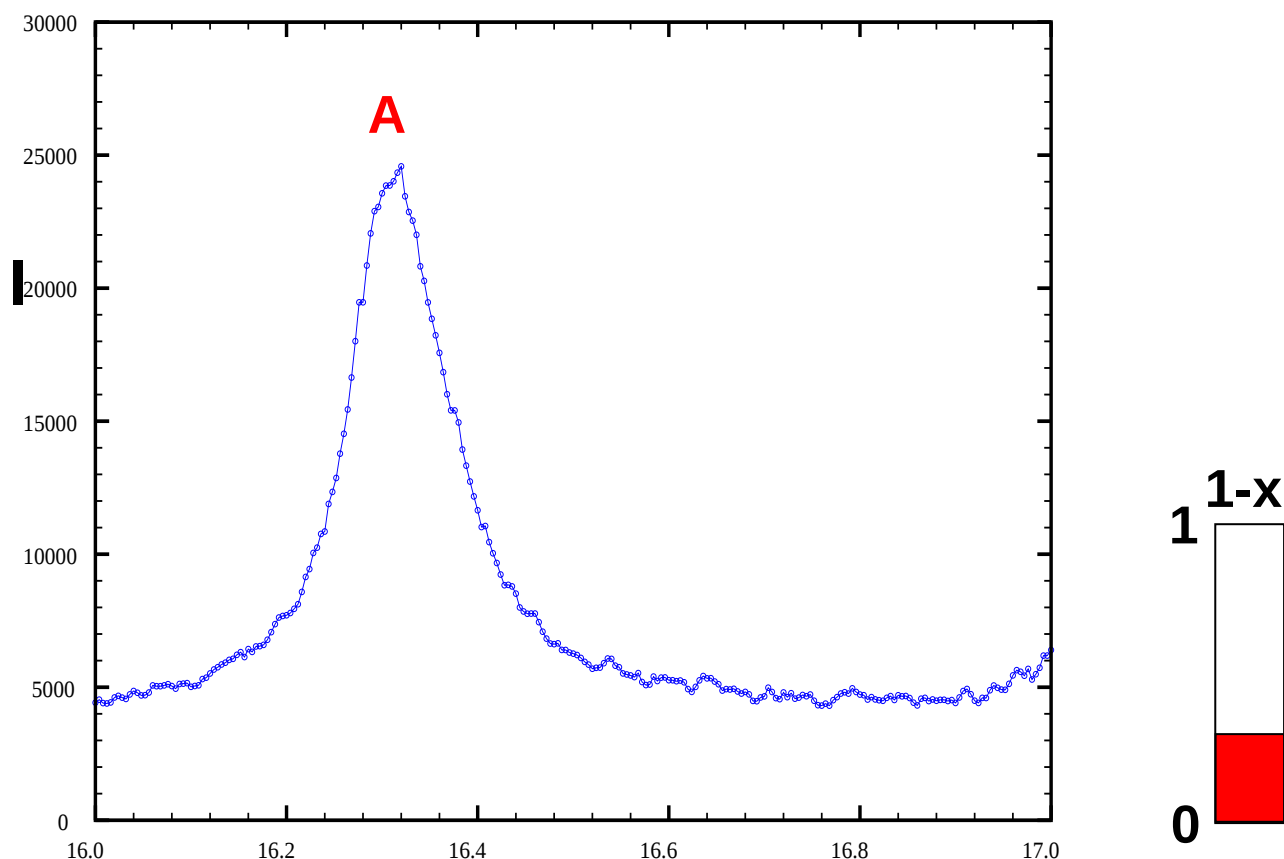
Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

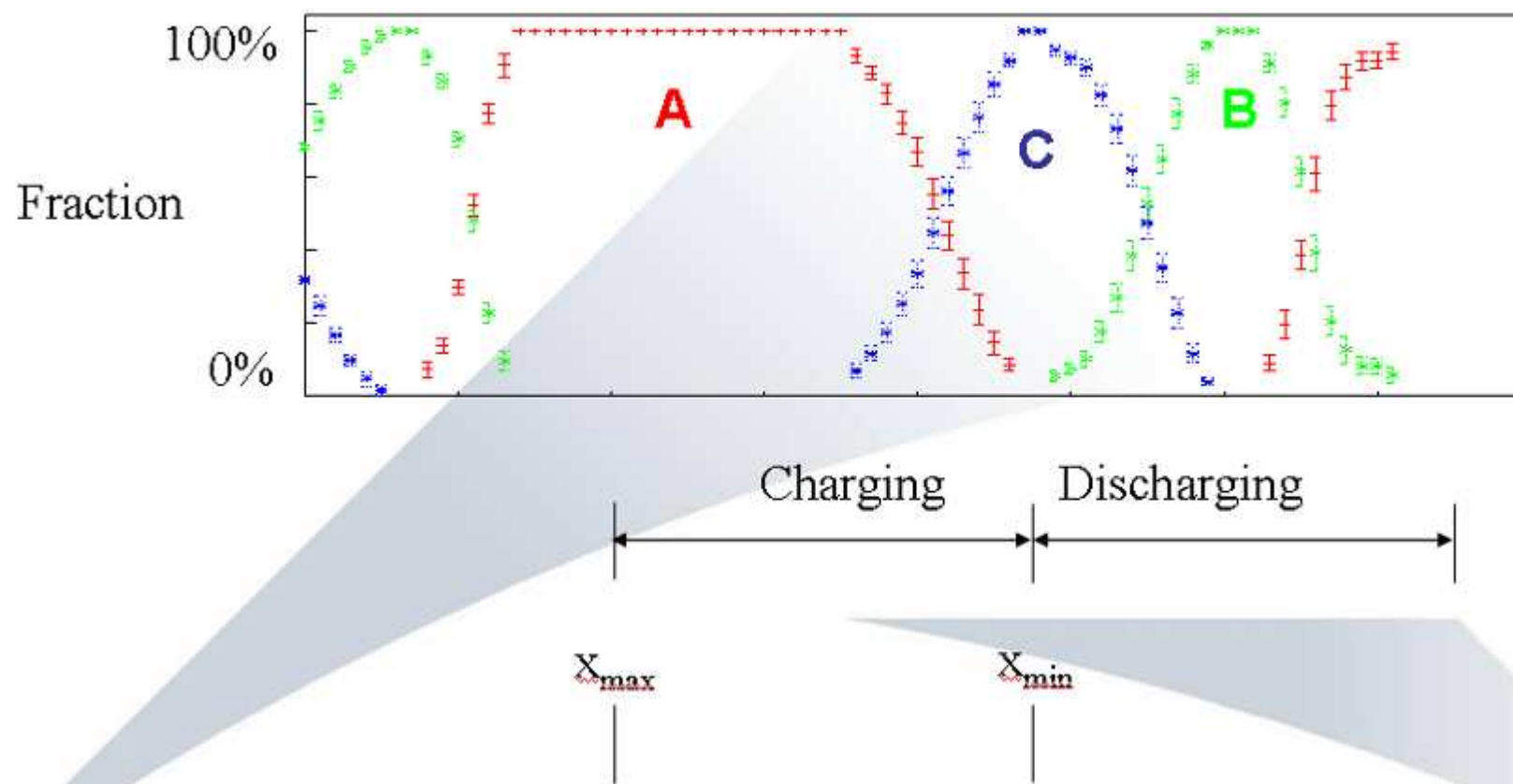
Secció del patró de difracció durant la càrrega i descàrrega de la bateria



Som capaços de veure els canvis de fase de $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ mentre la bateria es carrega o descarrega

Seqüència de fases (A,B,C) en $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$

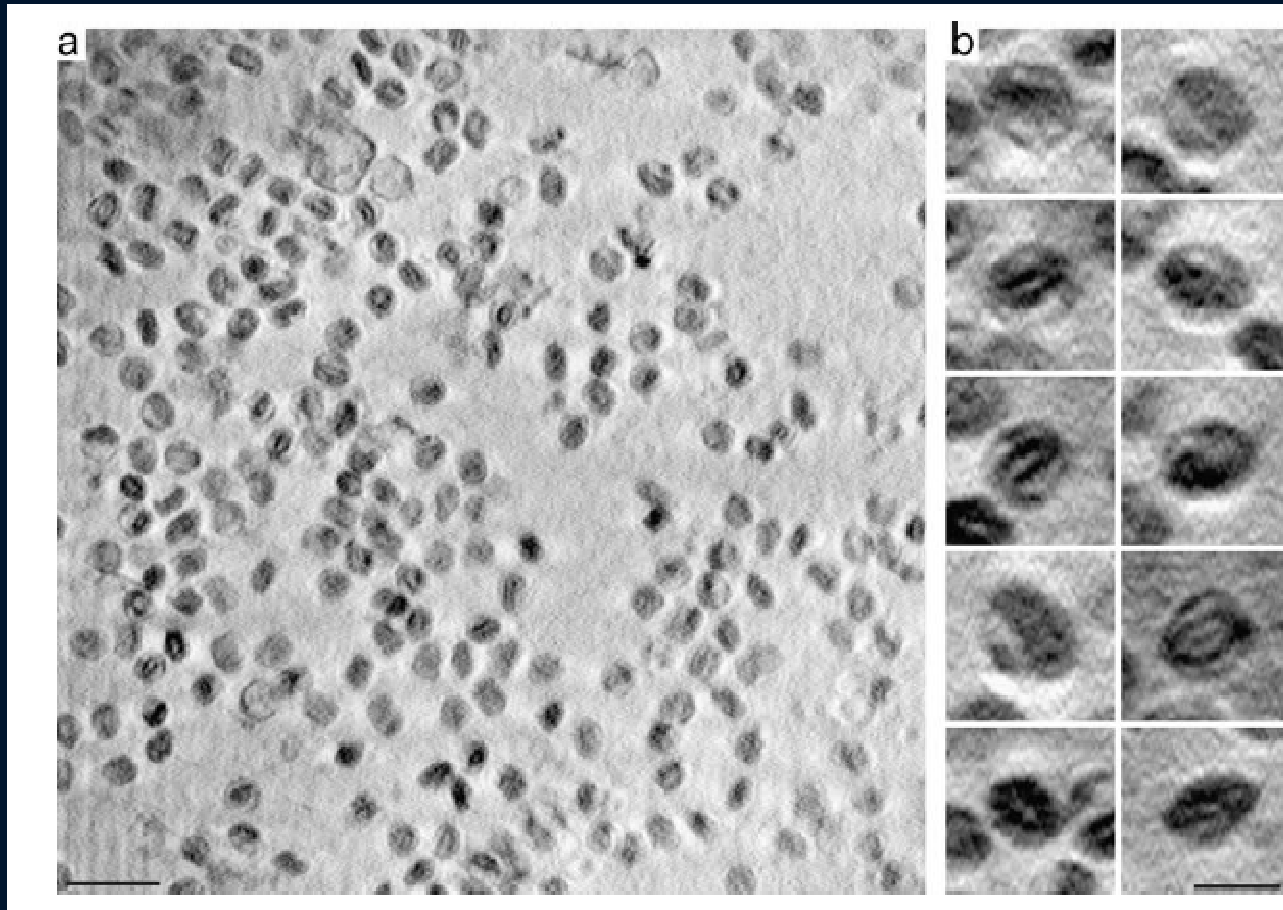
- L'estudi demostra que hi ha una fase (C) que s'ha d'evitar (amb dopatge) per a que la bateria funcioni òptimament



BL-09 MISTRAL



resolució 250-500 Å (25 - 50 nm)



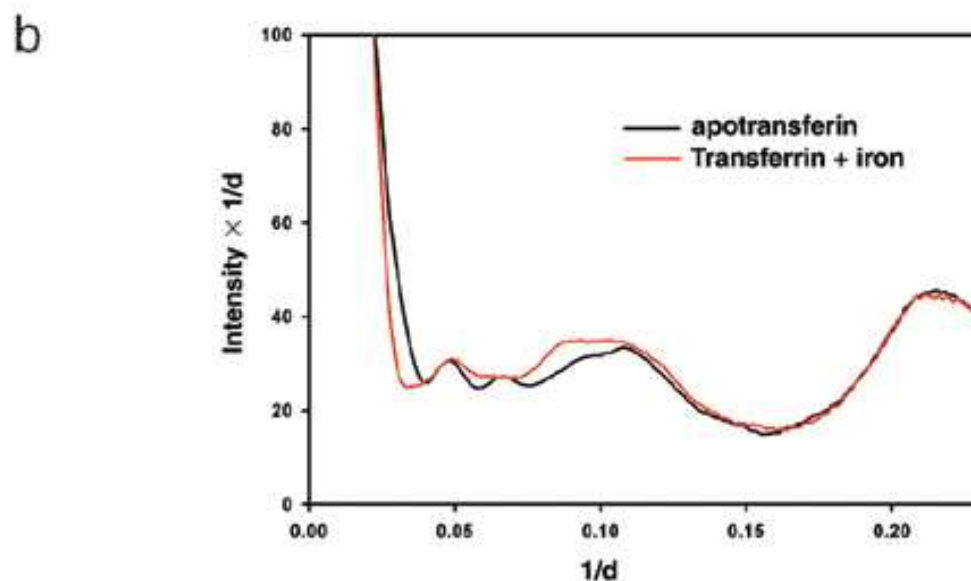
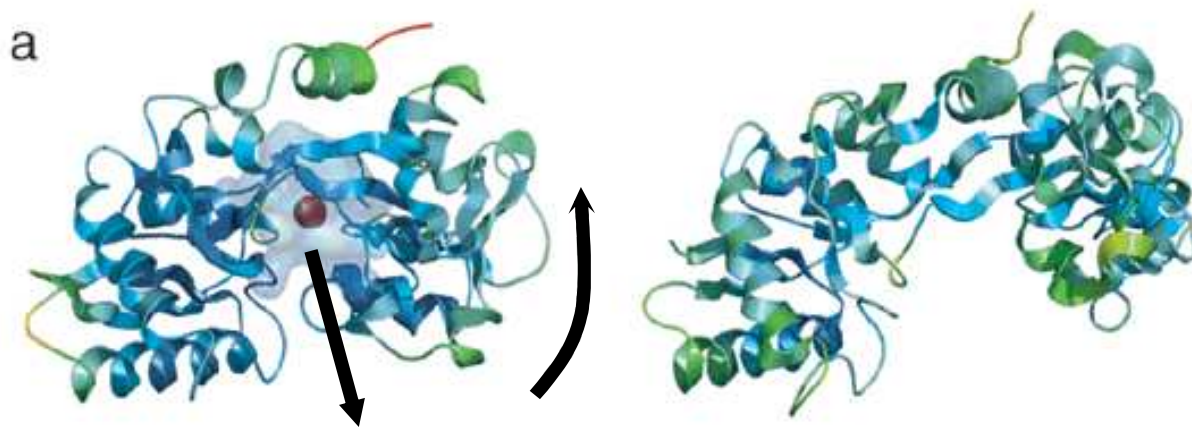
Reconstrucció tomogràfica de raigs X de partícules del virus vaccinia mesurades amb una placa de zona de 25 nm. (a) Tall oblic extret d'un tomograma. La barra d'escala representa 1 μm . (b) Talls centrals de subvolums extrets del tomograma, cadascun conté una partícula viral diferent. Detalls de l'interior del virus son visibles. La barra representa 300 nm.

BL11: NCD



resolució 5-5000 Å (0.5 - 500 nm)

Canvis estructurals causats a una proteïna per un lligand



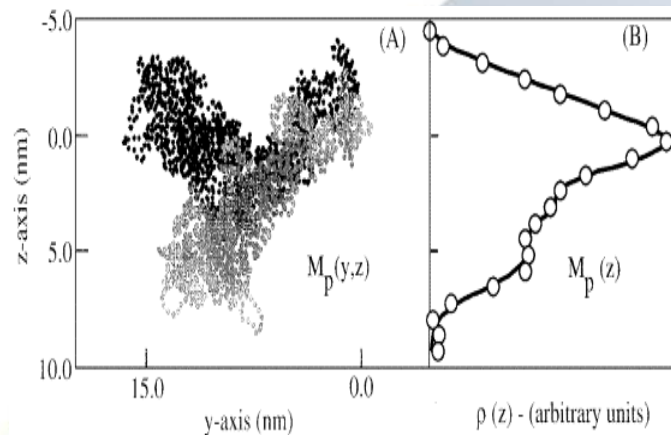
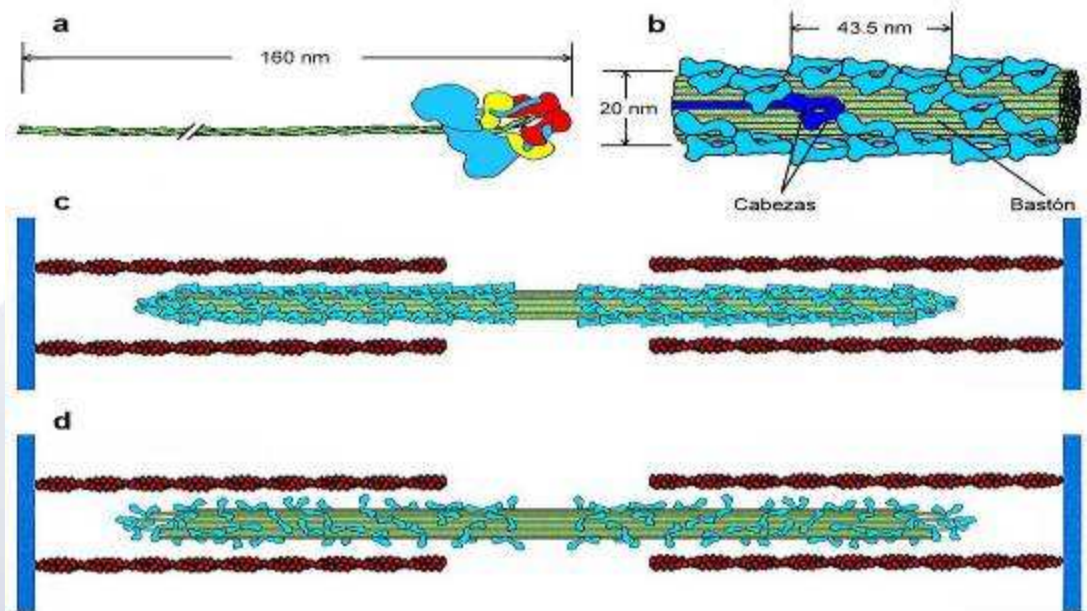
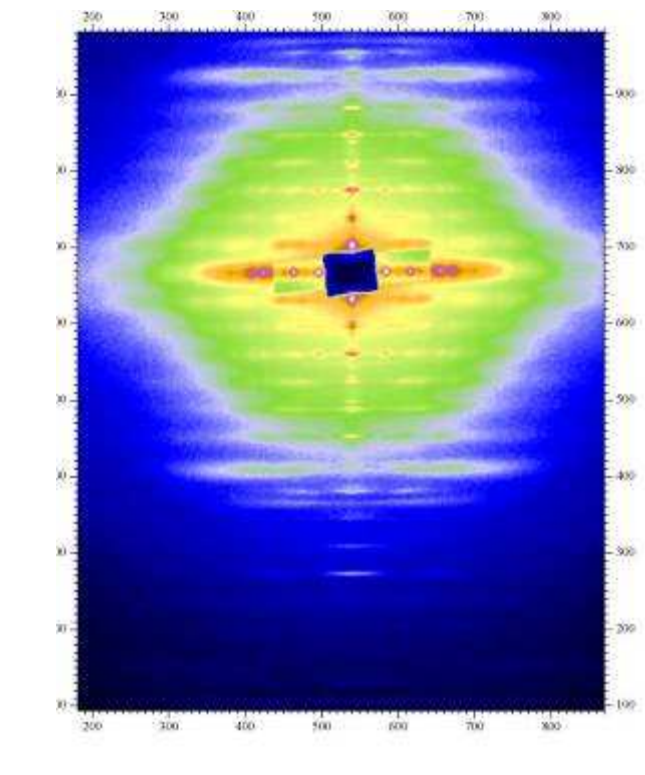
Nature Methods - **1**, 188 - 189 (2004)

PROTEIN BIOCHEMISTRY

X-ray vision reveals conformational changes

Michael Eisenstein

Estudi dels músculs



La difracció de raigs X a baixos angles ens proporciona informació a baixa resolució, amb la qual podem reconstruir el moviment a nivell atòmic de les proteïnes que formen els músculs.

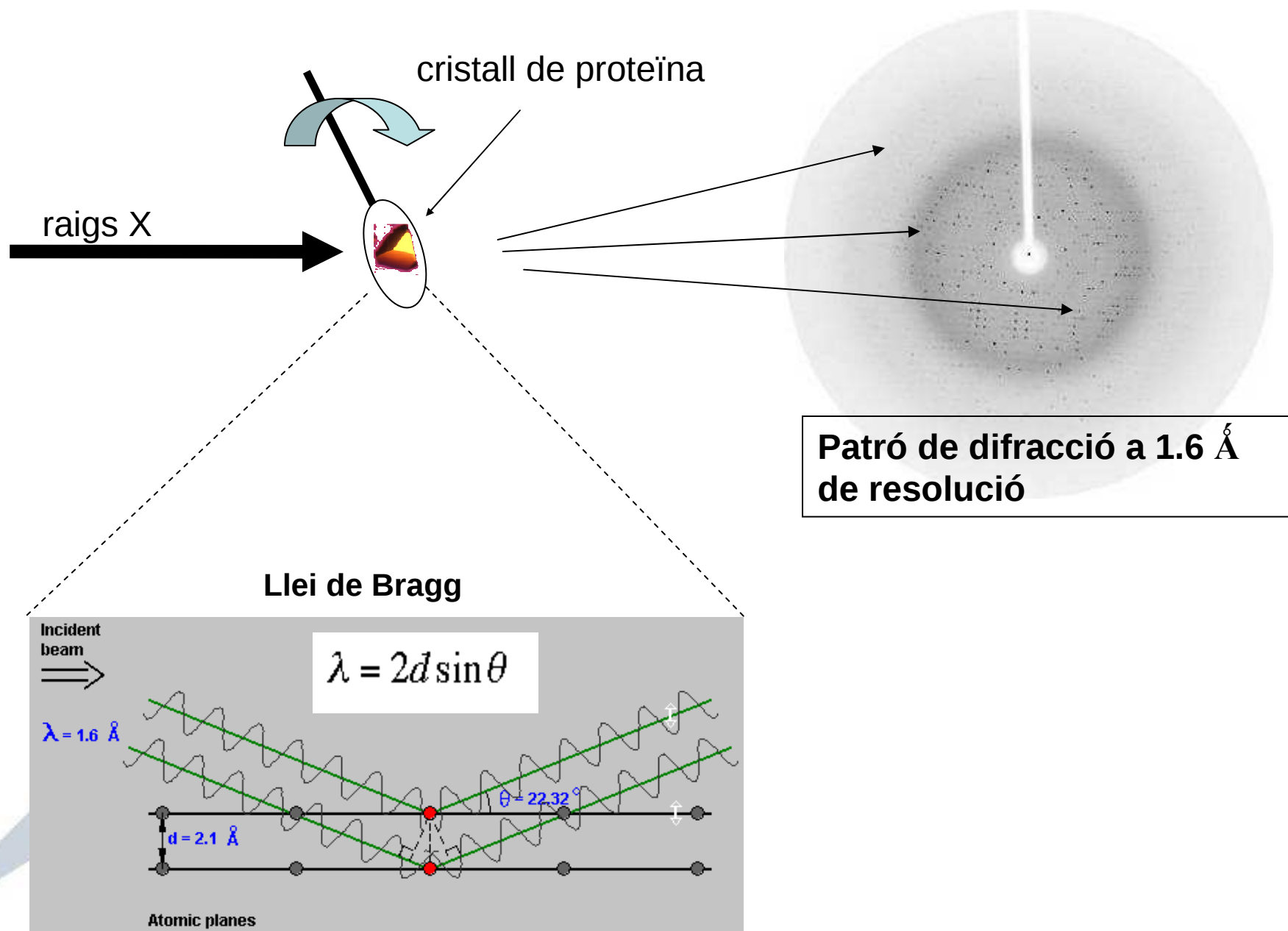


Aplicacions: Cristal·lografia de macromolècules

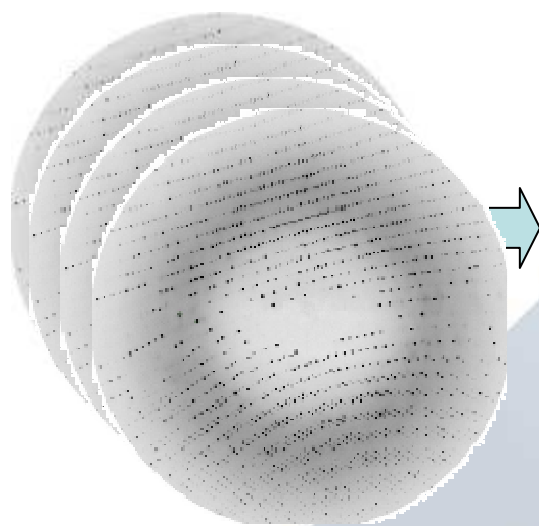
BL13: XALOC



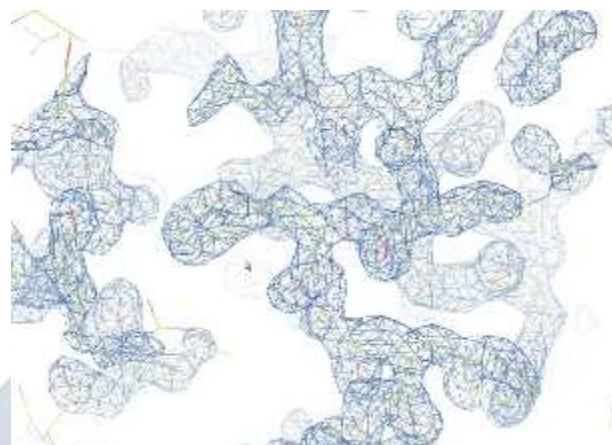
resolució 1-3 Å (0.1-0.3 nm)



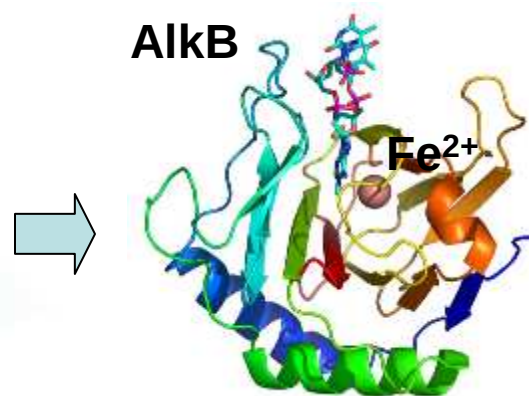
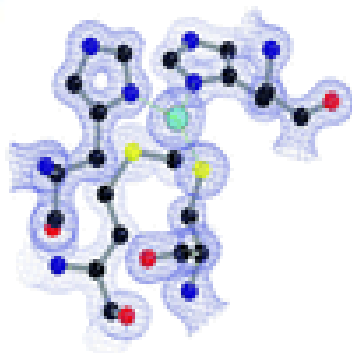
$$\frac{1}{V} \sum_{hkl} F(hkl) \exp[-2\pi i(hx + ky + lz)] = \rho(xyz)$$



centenars d'imatges
de difracció

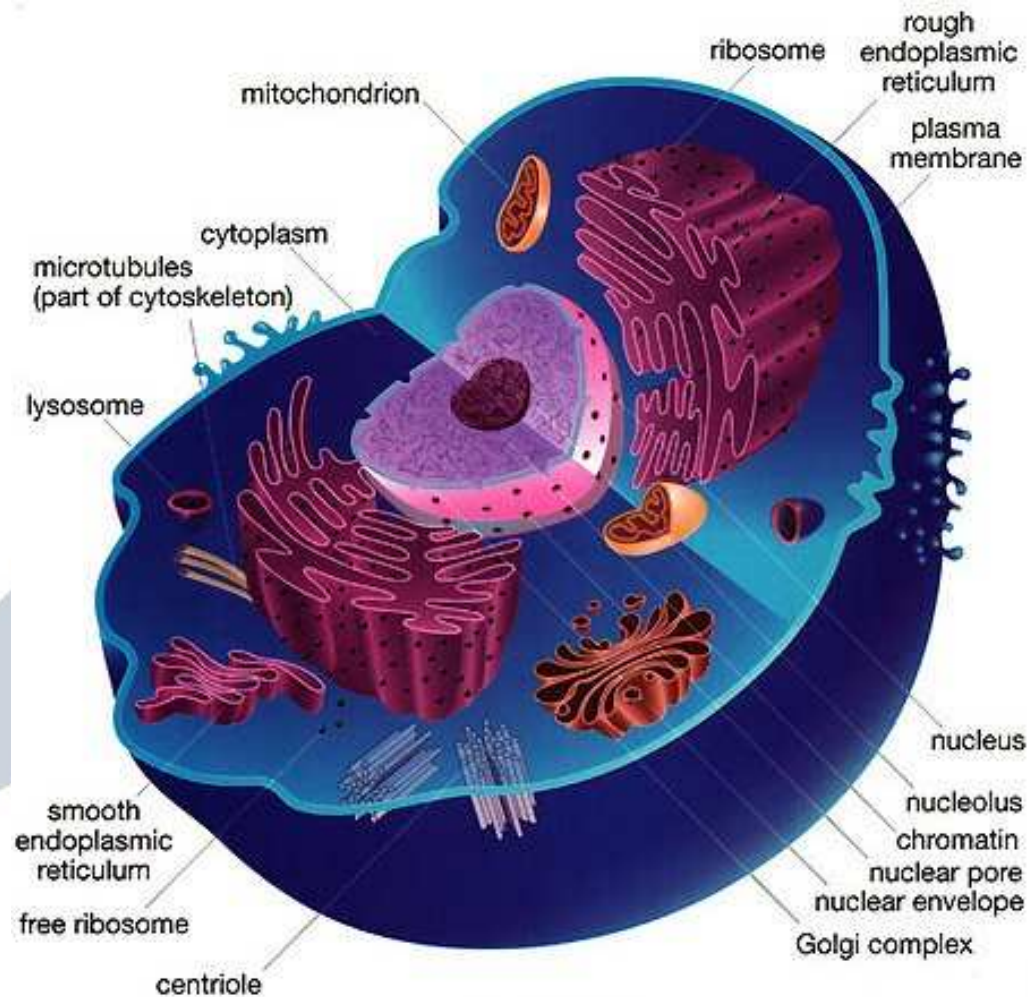


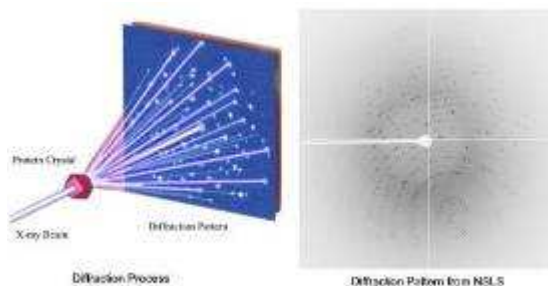
densitat electrònica
de la macromolècula



imatge tridimensional de
la macromolècula

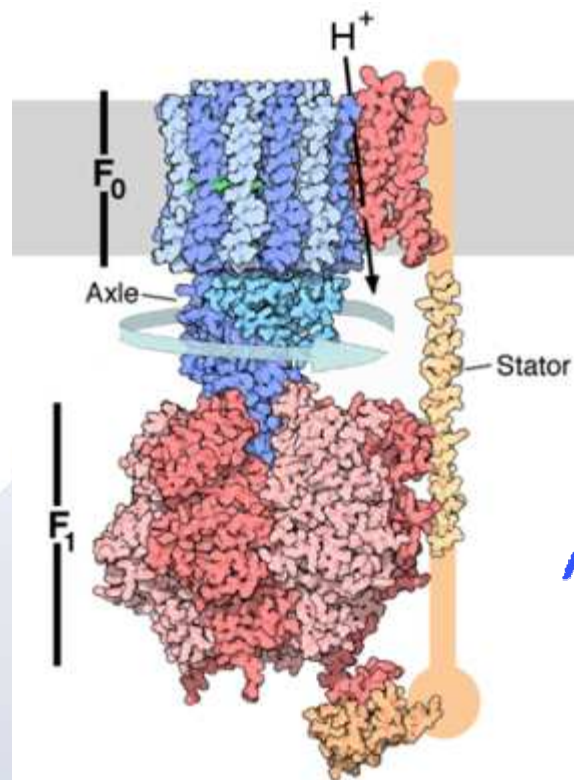
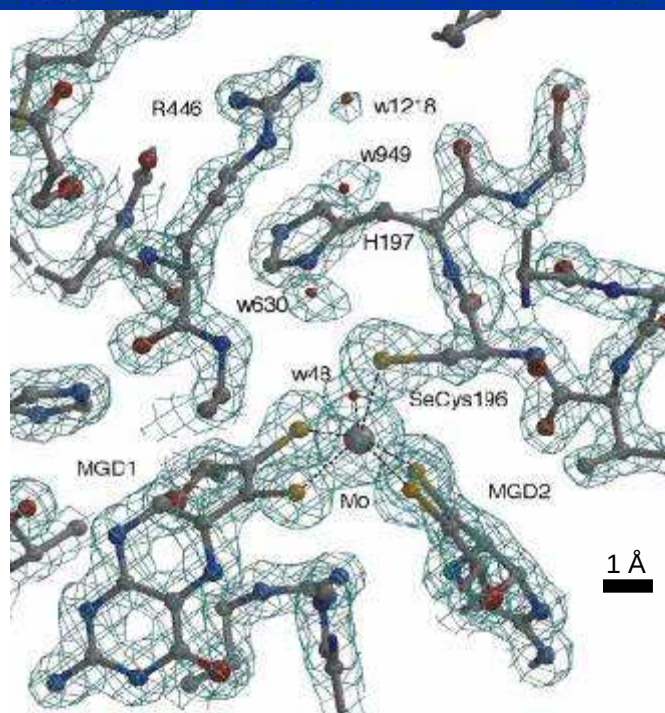
**Amb l'estructura 3D de les macromolècules
podem estudiar la vida a nivell atòmic/molecular**



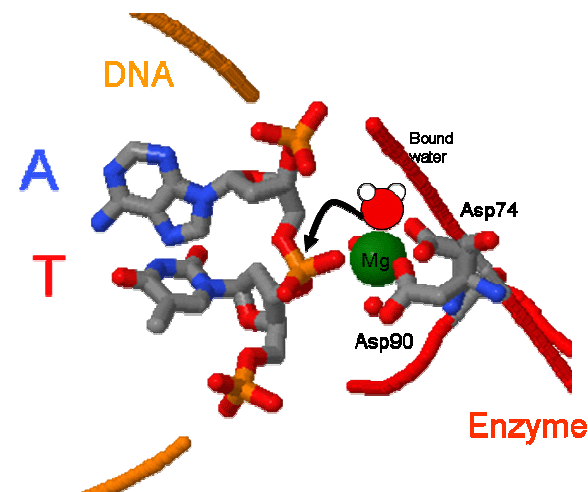


BL13-ALBA

$$\rho_{(xyz)} = (1/V) \sum |F_{(hkl)}| \cos[2\pi(hx + ky + lz) - \alpha_{(hkl)}]$$

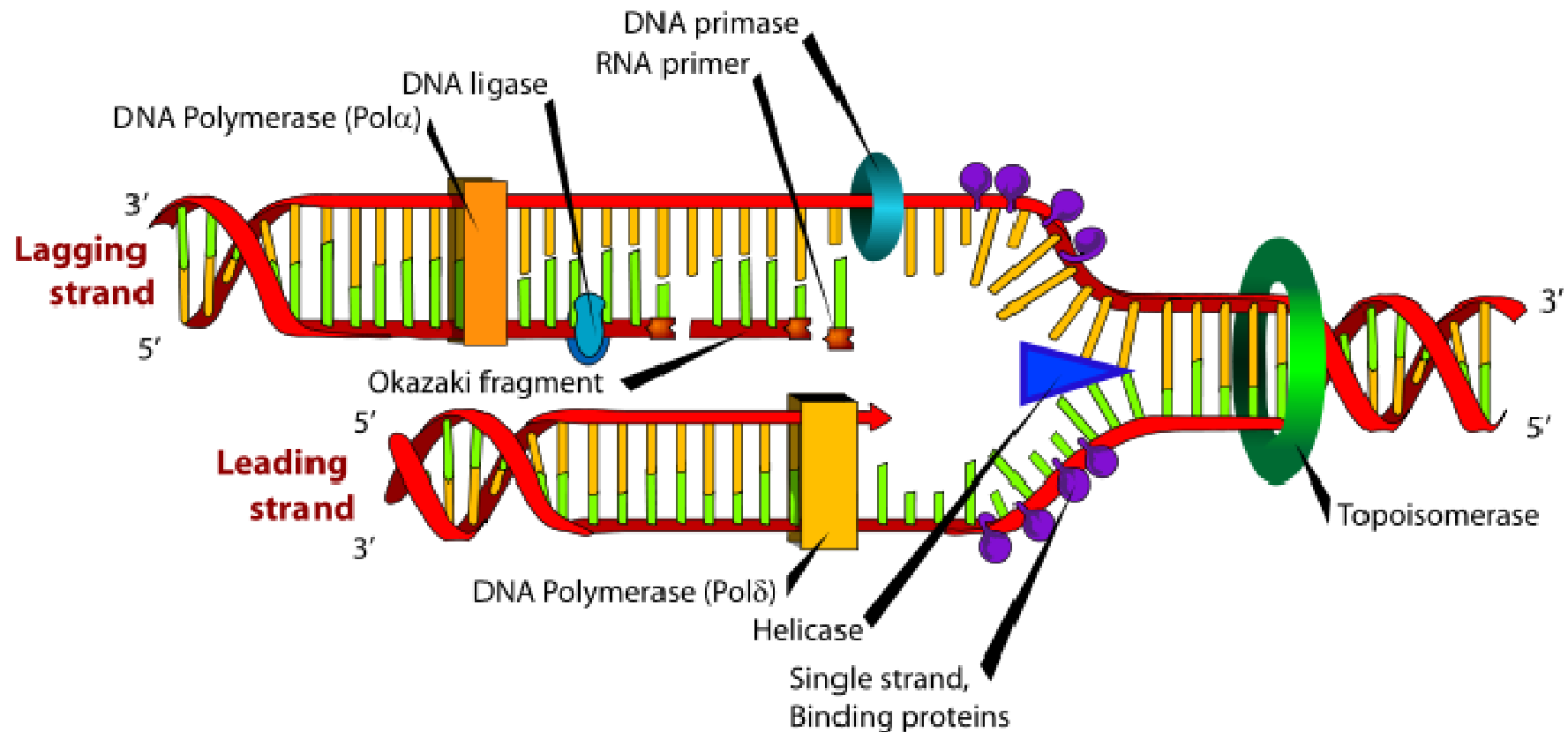


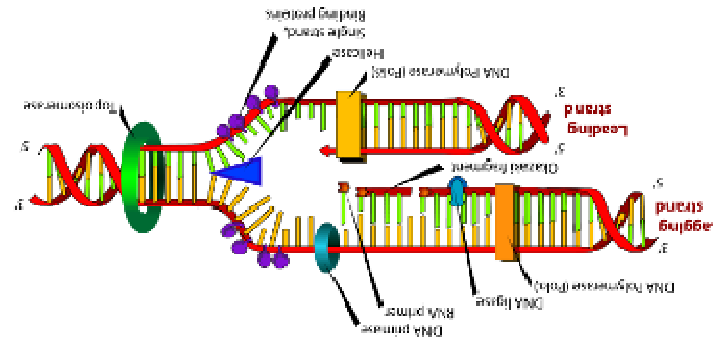
Abrahams JP, Leslie AG, Lutter R, Walker JE. Structure at 2.8 Å resolution of F1-ATPase from bovine heart mitochondria. Nature. 1994 Aug 25;370(6491):621-8.

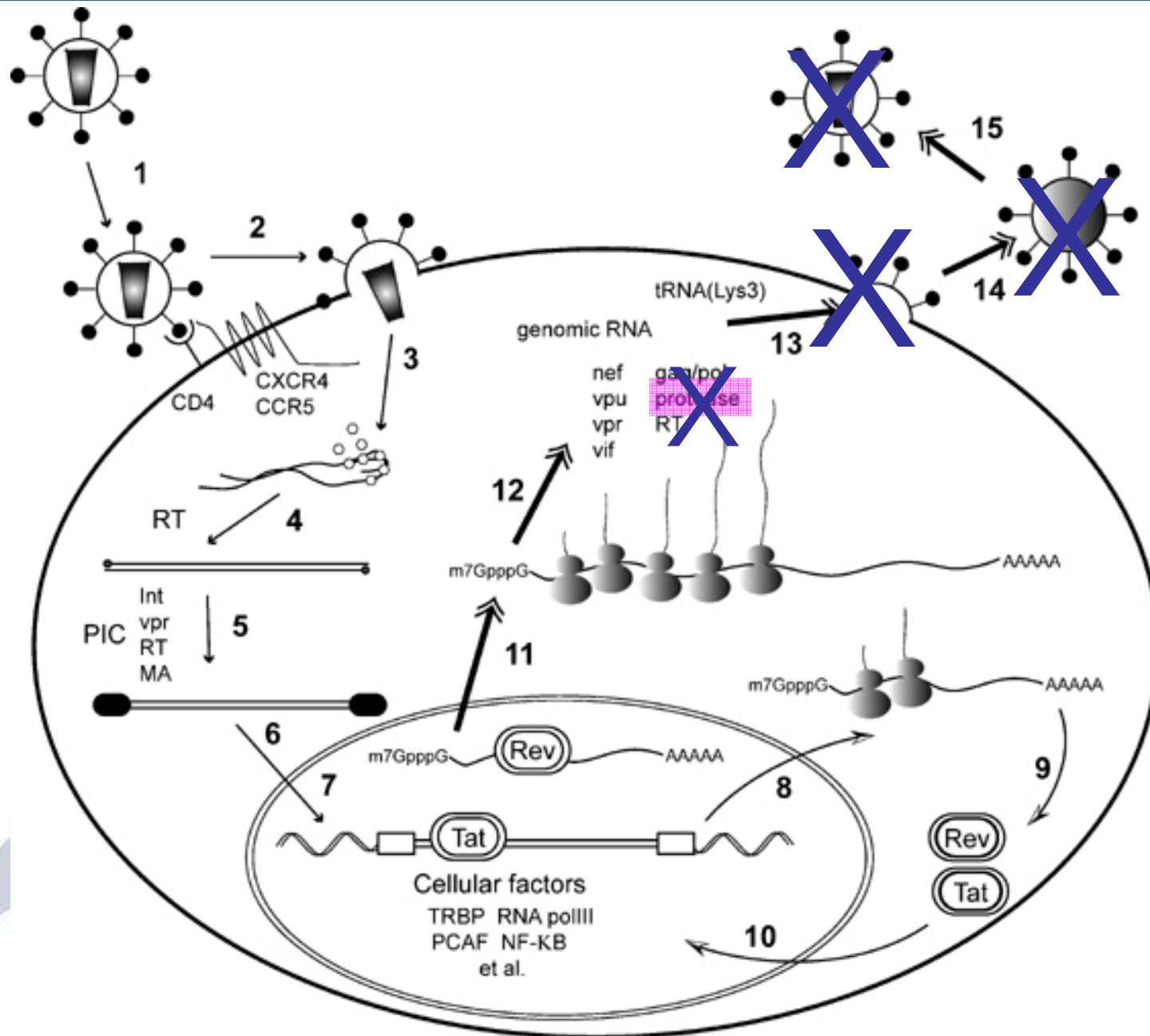


- ❖ Imatge d'alta resolució de la proteïna estudiada:
 - distàncies
 - conformació de residus, proteïna, lligand(s)
 - centres actius
 - comprensió del mecanisme d'acció
- ❖ Es pot utilitzar per provar molècules amb constants d'unió baixes (~mM) per a obtenir medicaments més potents i selectius

Exemple: replicació de l'ADN



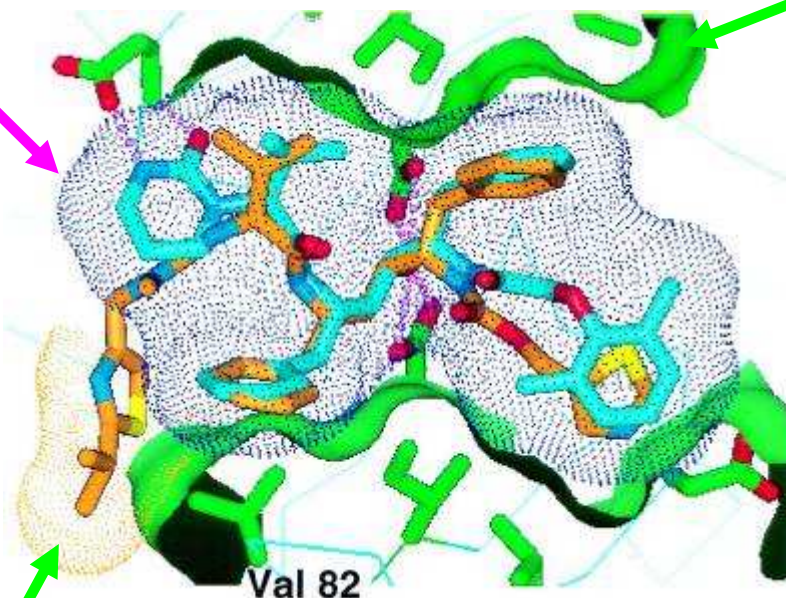




ABBOTT's Aluviran (Lopinavir®) Inhibidor proteasa VIH

Aluviran (núvol blau)

Proteasa del VIH



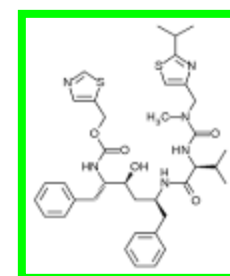
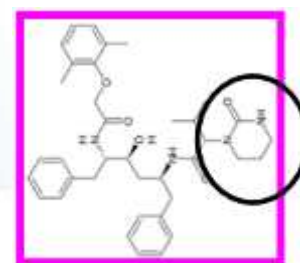
KALETRA® (aluviran & ritonavir)

Tractament contra VIH

Aprovat FDA 2000

\$400 millions de guanys al 2007

(Chicago Tribune, 2008)



K_i (pM)^a

Ritonavir (núvol verd)
interacciona amb
Val82

Protease	Aluviran	Ritonavir
Wild type	1.3	10
V82A	4.9	120
V82F	3.7	520
V82T	3.6	300

^a Values represent the mean of at least three determinations.

Soques del VIH resistent a l'Aluviran

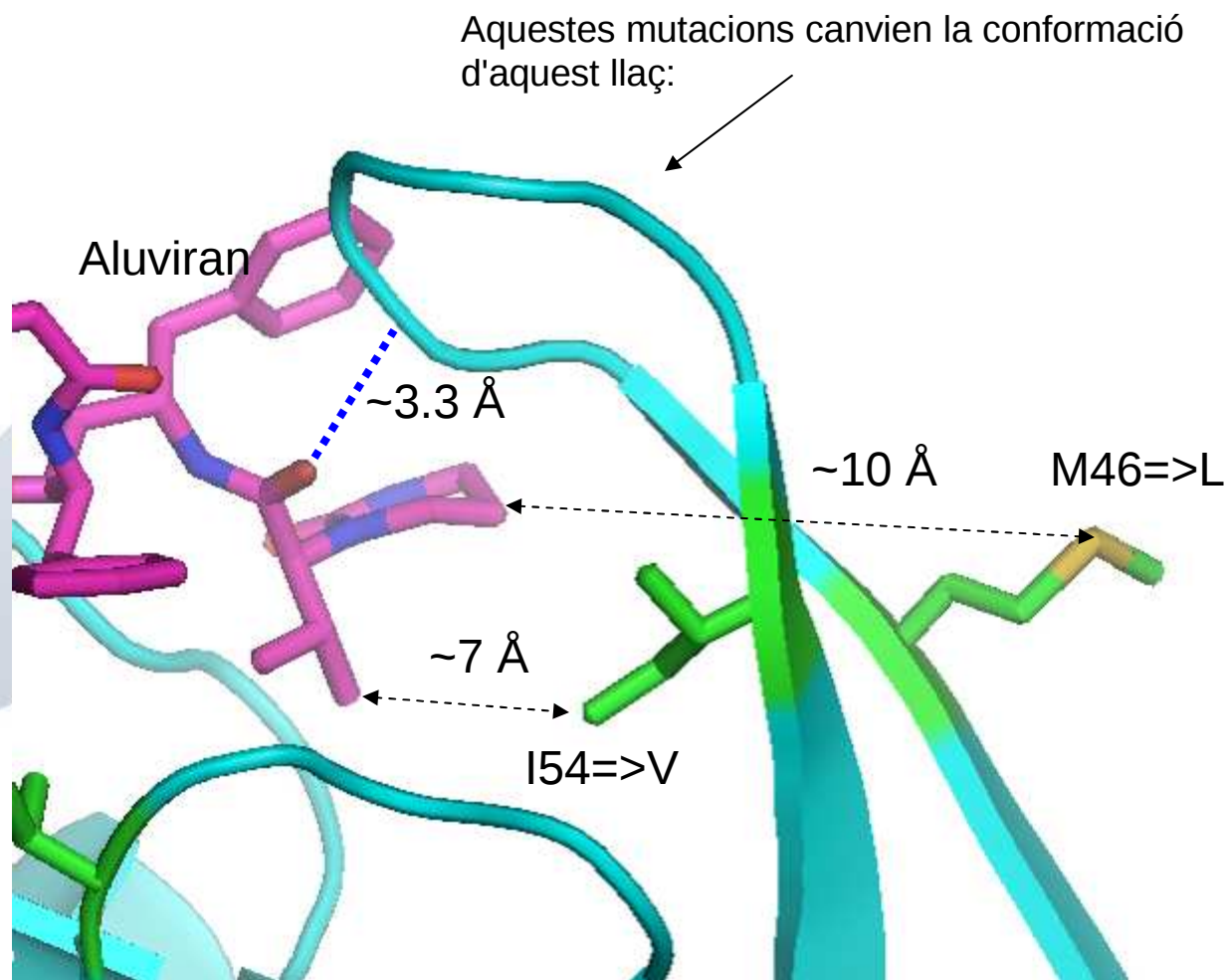
**Mutacions típiques
en la proteasa,
relacionades amb la
resistència a
l'Aluviran:**

M46L

I54V

V82A

[Mo et al. J. Virol. (2005)]



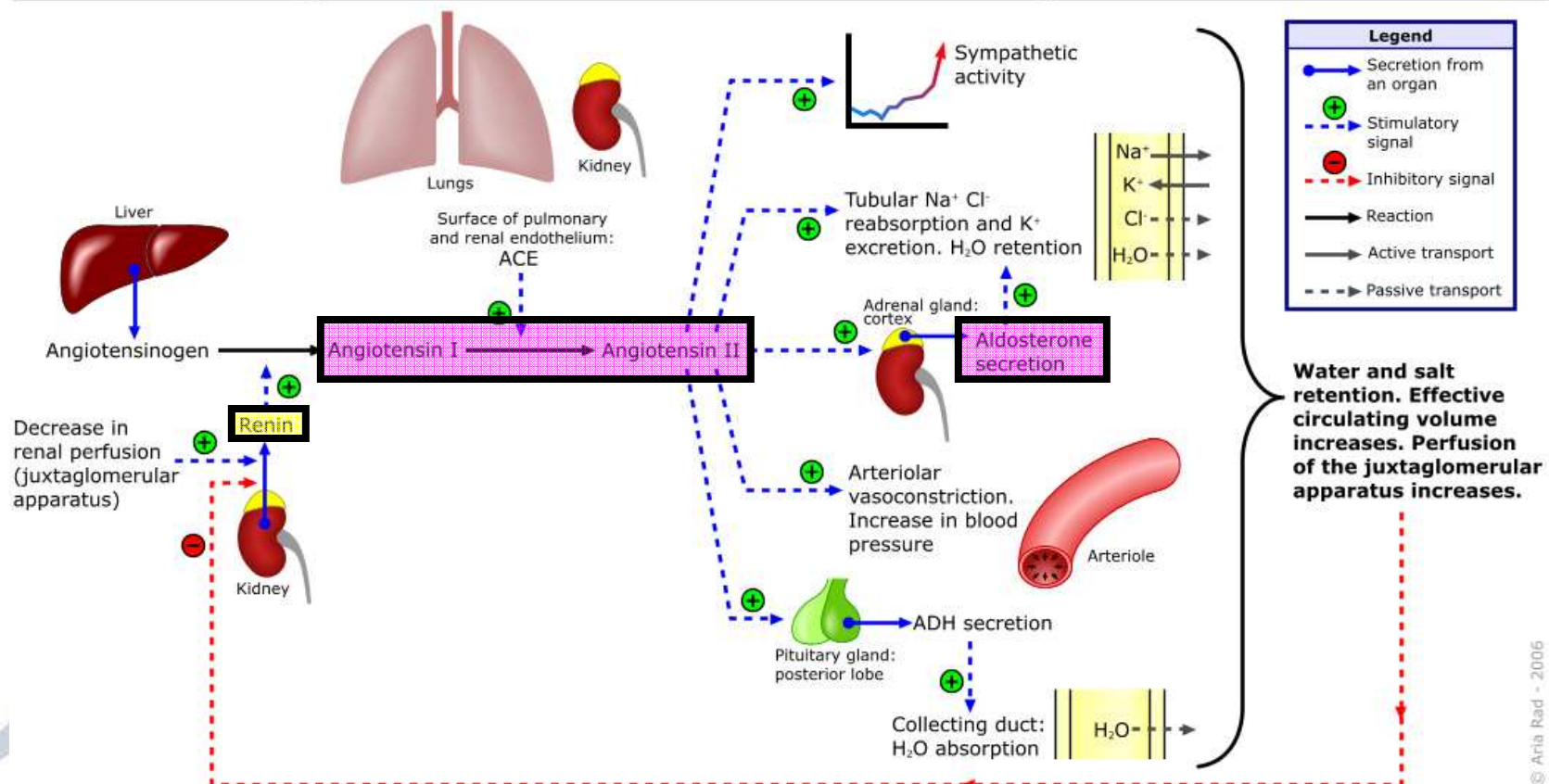
NOVARTIS's Aliskiren (Tekturna®): inhibidor renina

➤ Molts medicaments controlen la pressió arterial interferint l'activitat de l'angiotensina o la secreció d'aldosterona

➤ Aliskiren és el primer medicament que inhibeix directament la renina

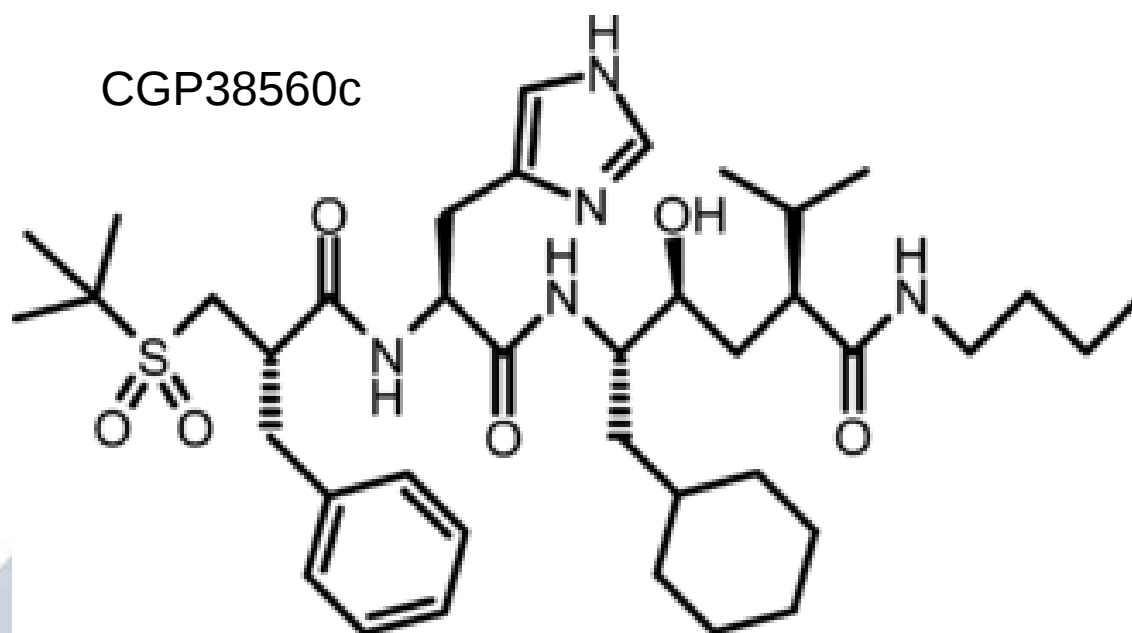
➤ Però si s'usen sovint, el cos augmenta la producció de renina.

Renin-angiotensin-aldosterone system



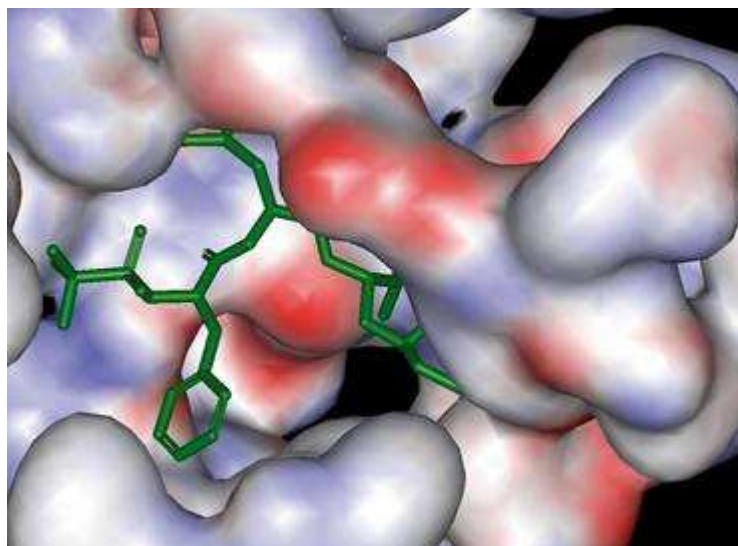
Inicialment, a partir del substrat endogen de la renina que és un pèptid (**D-R-V-Y-I-H-P-F-H-L-V-I-H-** ...) es desenvolupa el compost CGP38560 com a possible fàrmac inhibidor de la renina.

(x-F-H-x-V-x)

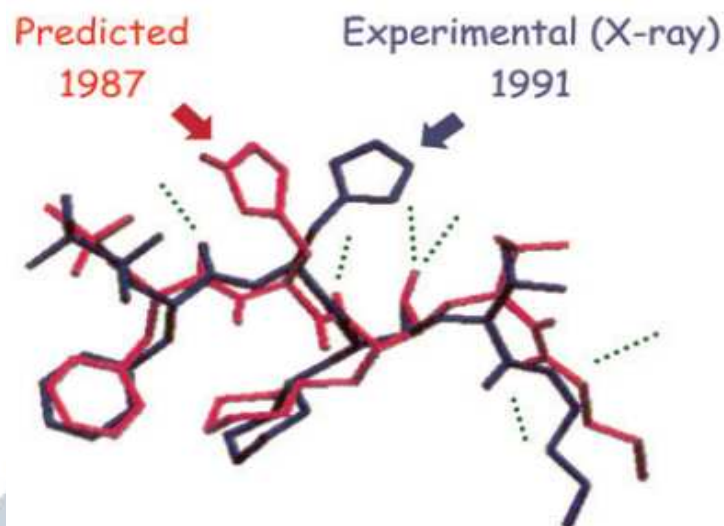


Però CGP38560 és retirat de la fase d'assaigs clínics per que:

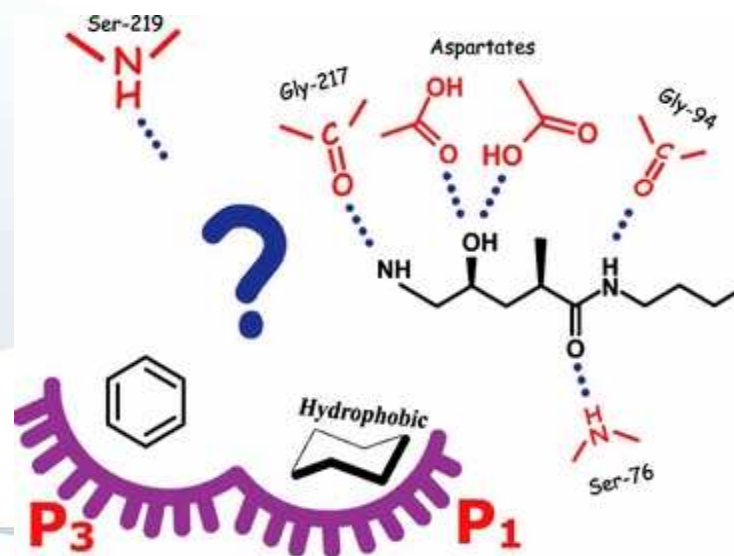
- l'absorció oral és molt baixa (< 1%)
- la secreció biliar (o expulsió del cos) és massa ràpida (el compost té una vida mitja de només 7 min en el cos).



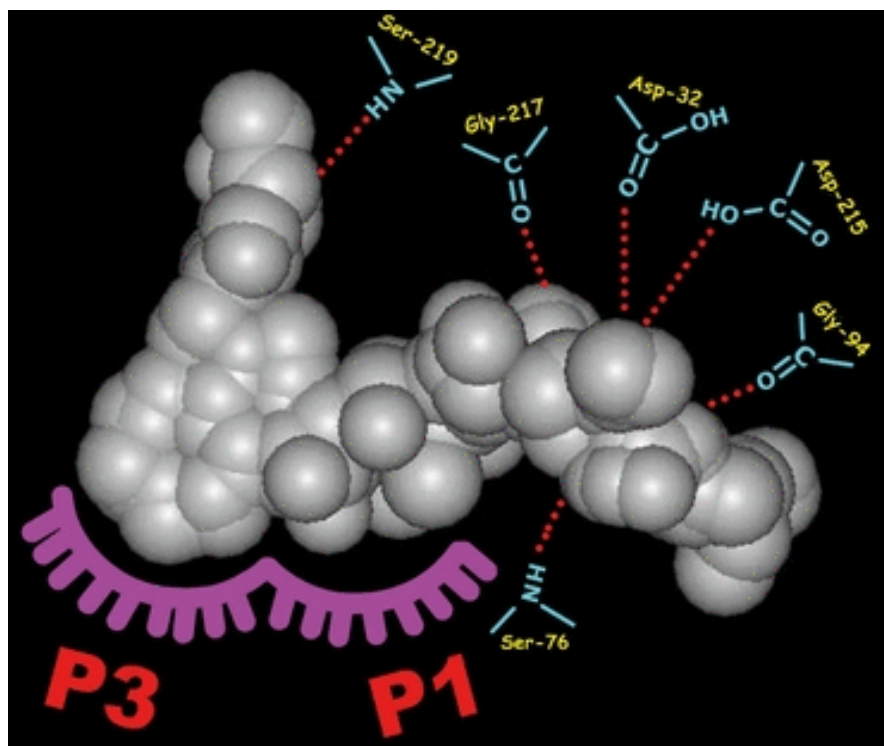
Per a trobar un nou compost/medicament es va utilitzar el modelatge 3D i “docking”, i es va poder identificar el complex renina-inhibidor més estable.



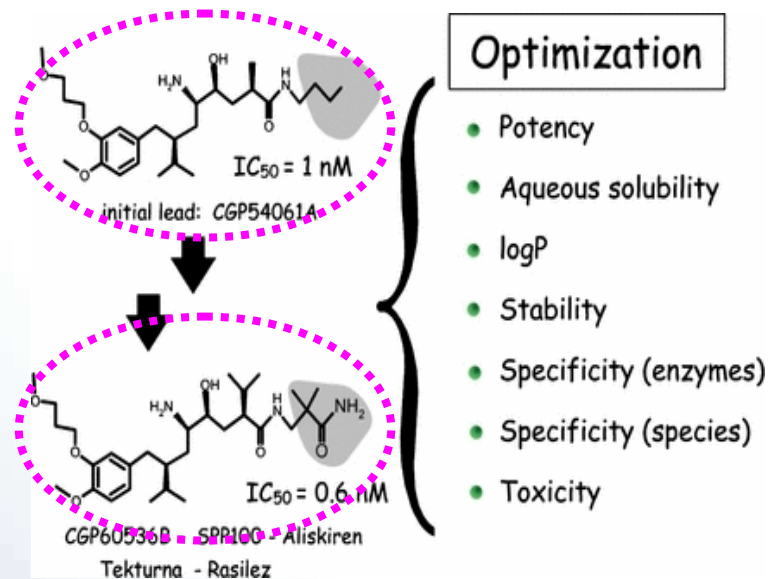
Interacció i conformació de CGP38560 amb la renina



A partir de l'estructura 3D se n'obtenen les característiques que ha de tenir un nou possible medicament/inhibidor de la renina.



Després d'optimitzar el compost, s'obté el medicament Tektura:



Tektura©:

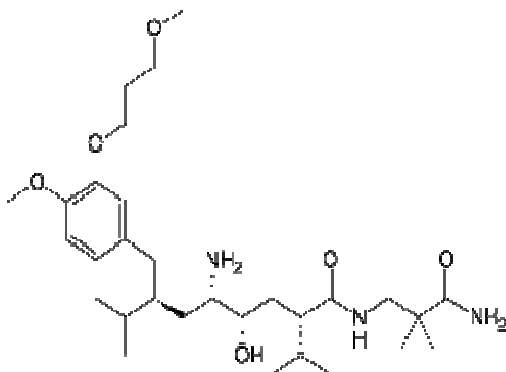
Tractament hipertensió

FDA aprovat el 2007

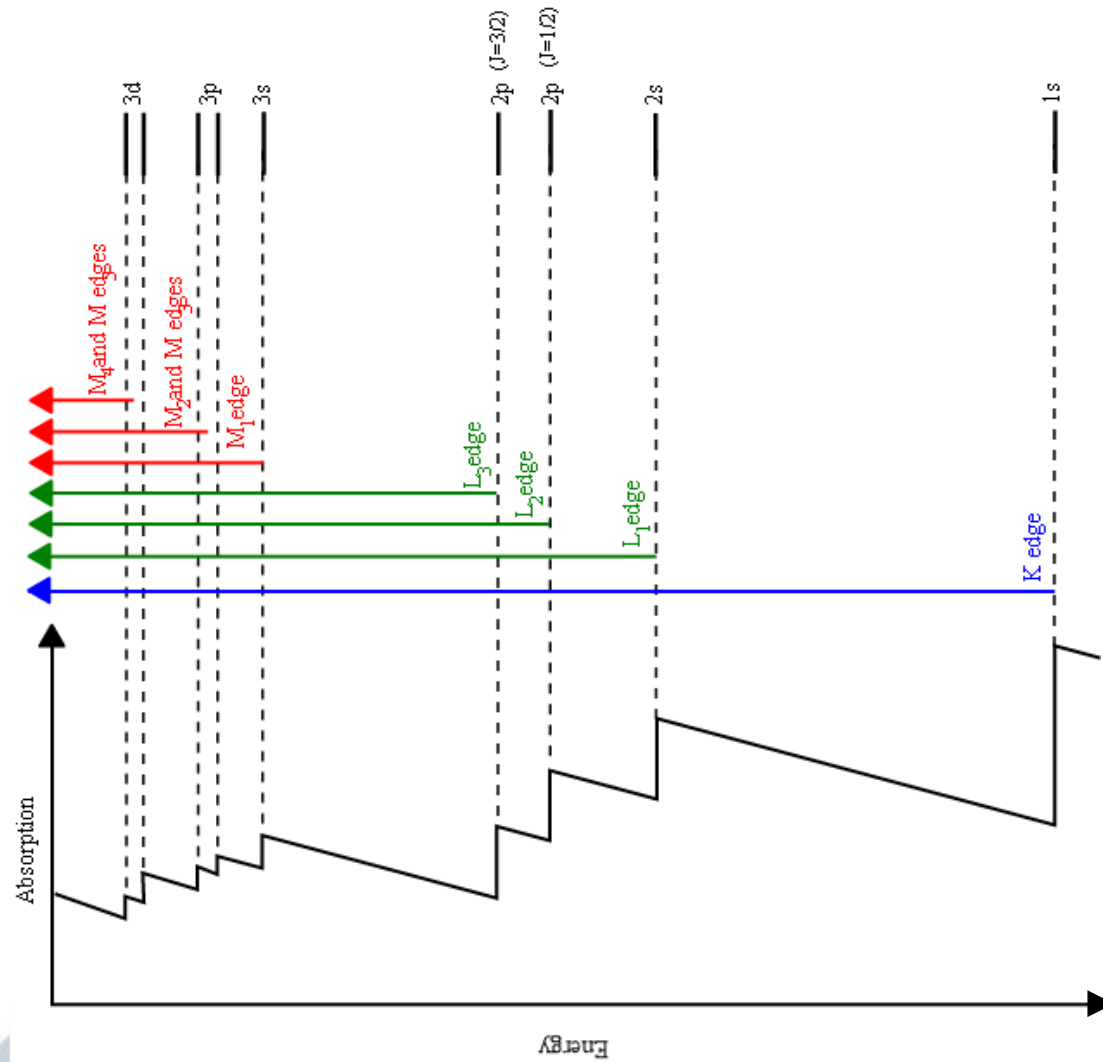
\$50 millions en 2008

(Trading Markets, 2009)

Enzyme	IC_{50} (nM)
Renin	0.6
Cathepsin D	5000
Cathepsin E	>10 000
Pepsin	>10 000
HIV-1 peptidase	>10 000





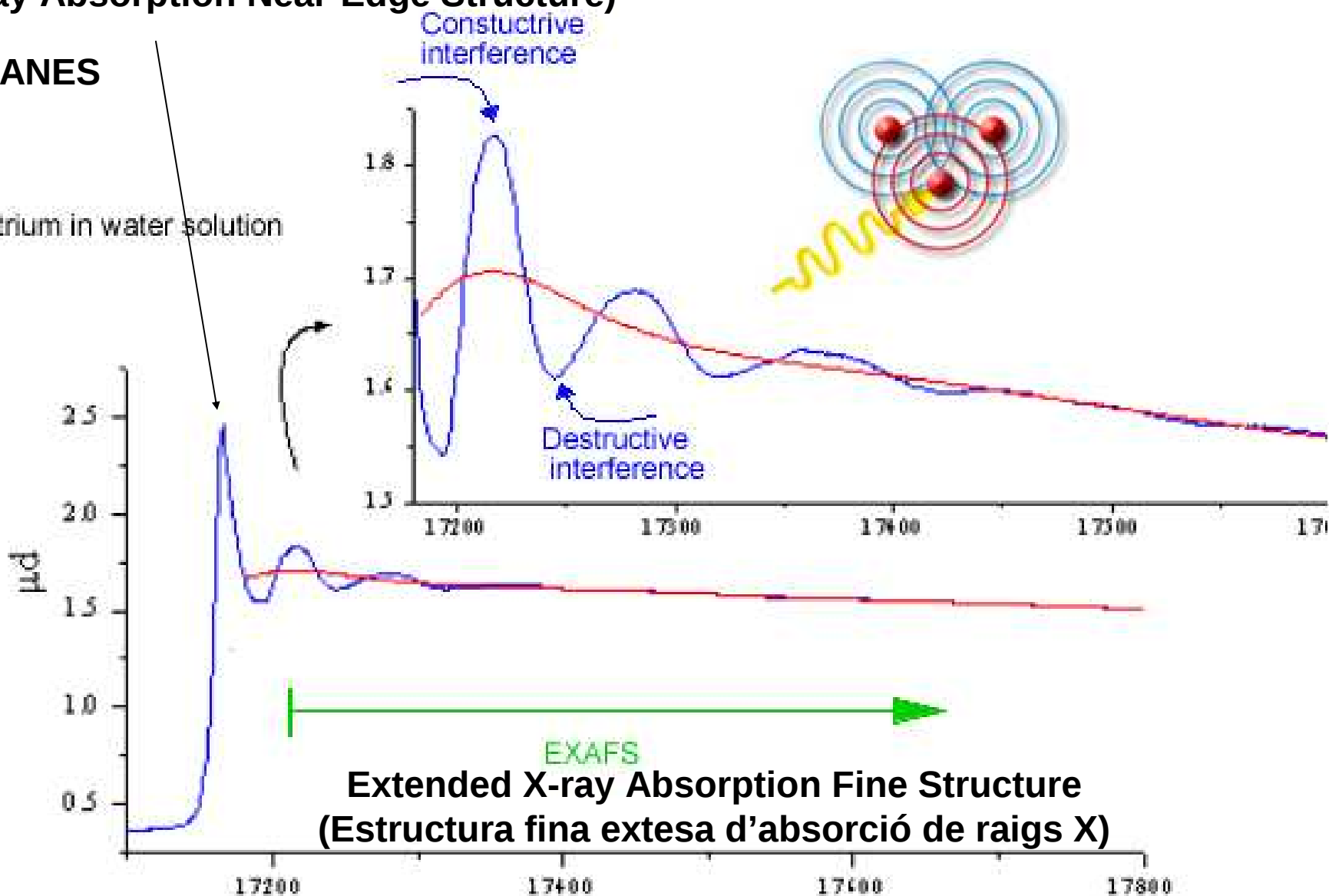


Cada element té una petjada dactilar característica d'absorció de raigs X

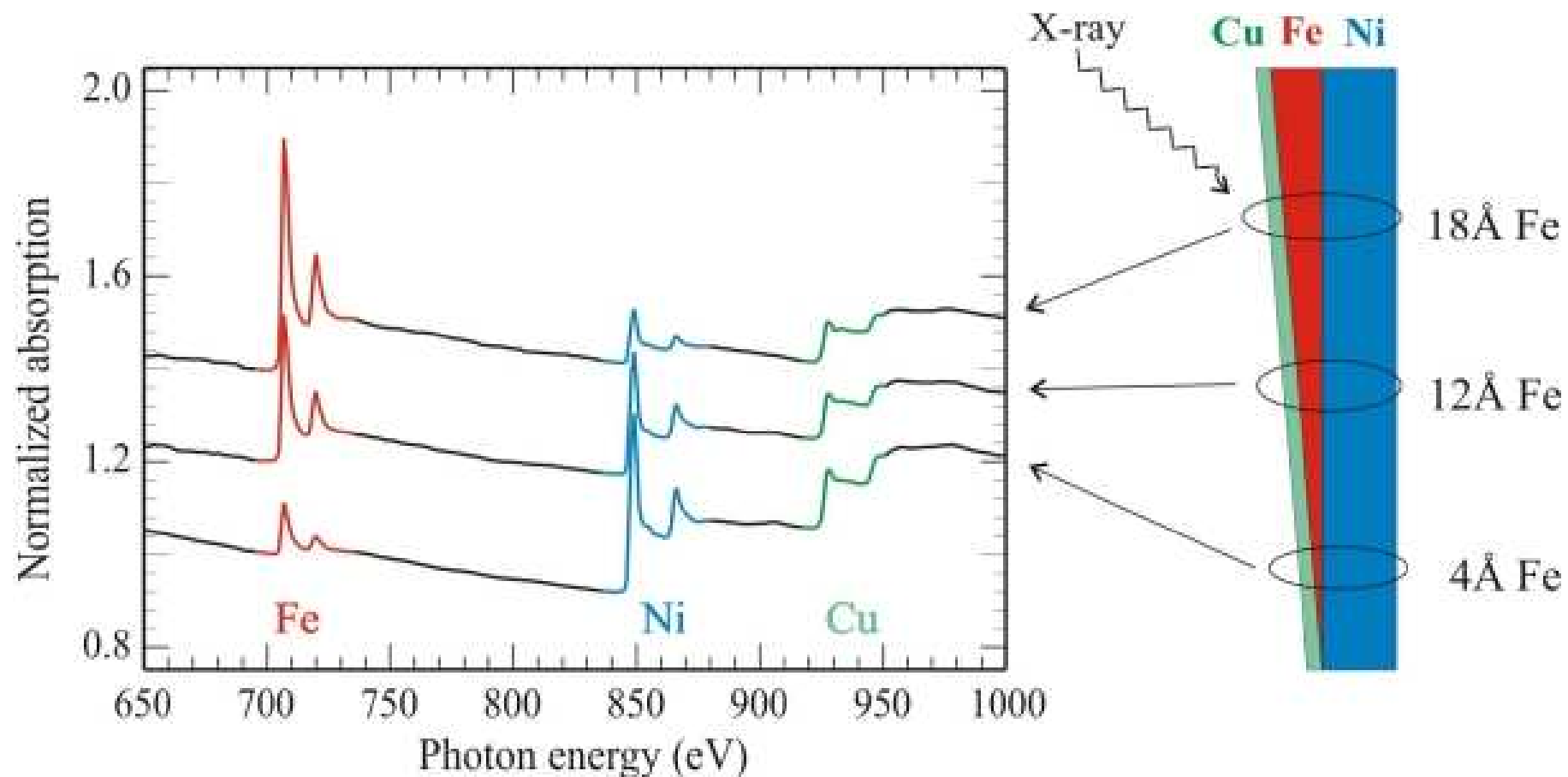
Estructura d'absorció de raigs X a prop del llindar (X-ray Absorption Near-Edge Structure)

XANES

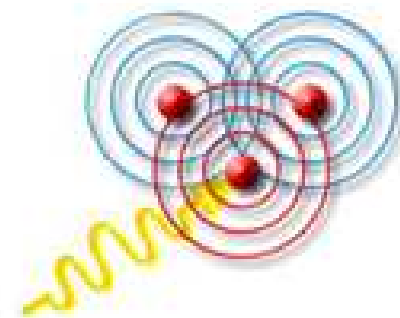
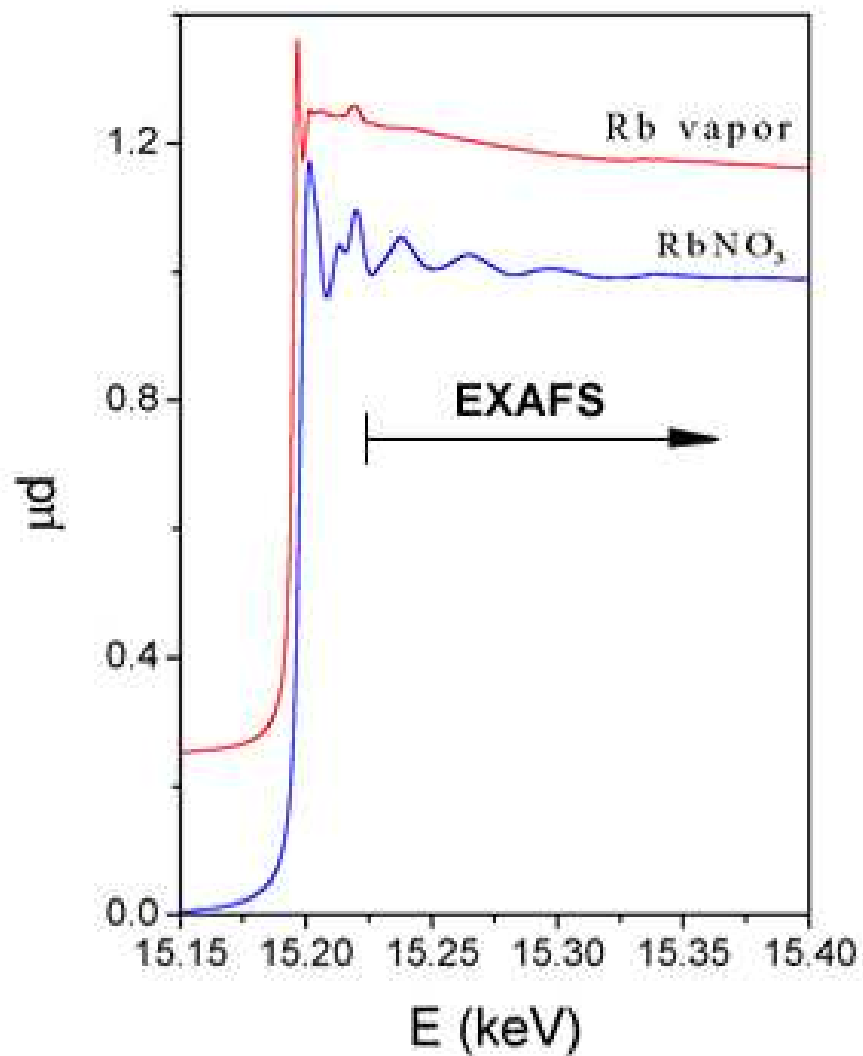
Yttrium in water solution



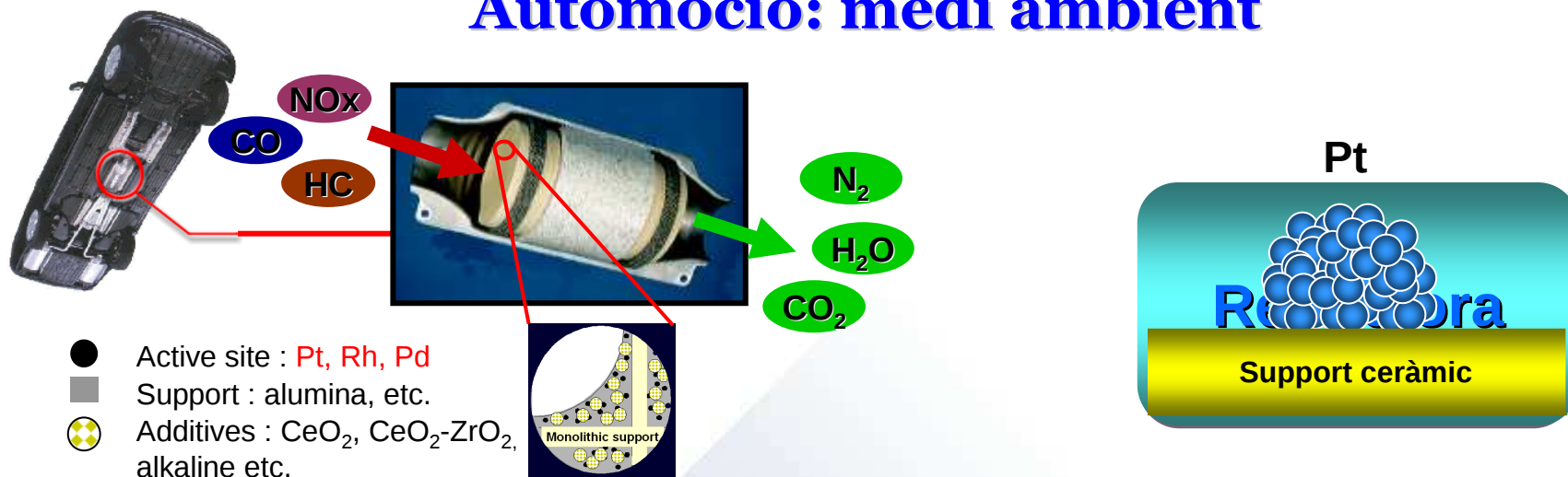
Els raigs X poden analitzar els materials capa per capa:



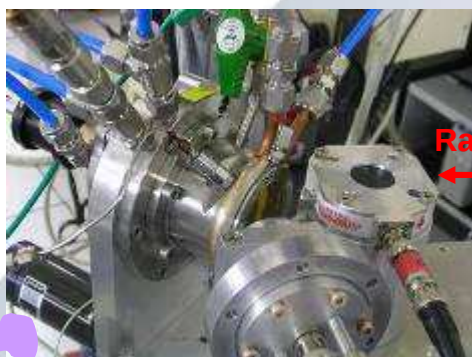
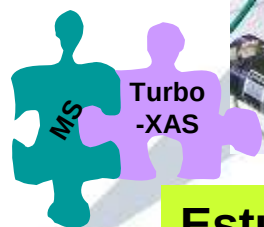
Exemple d'EXAFS



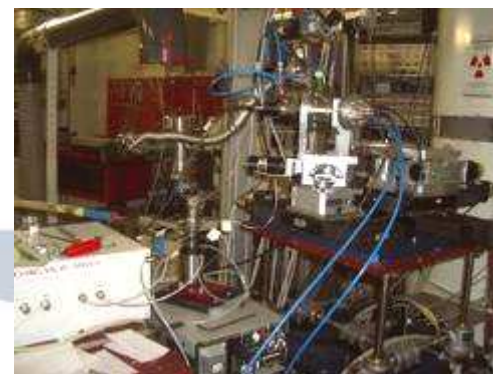
Automoció: medi ambient



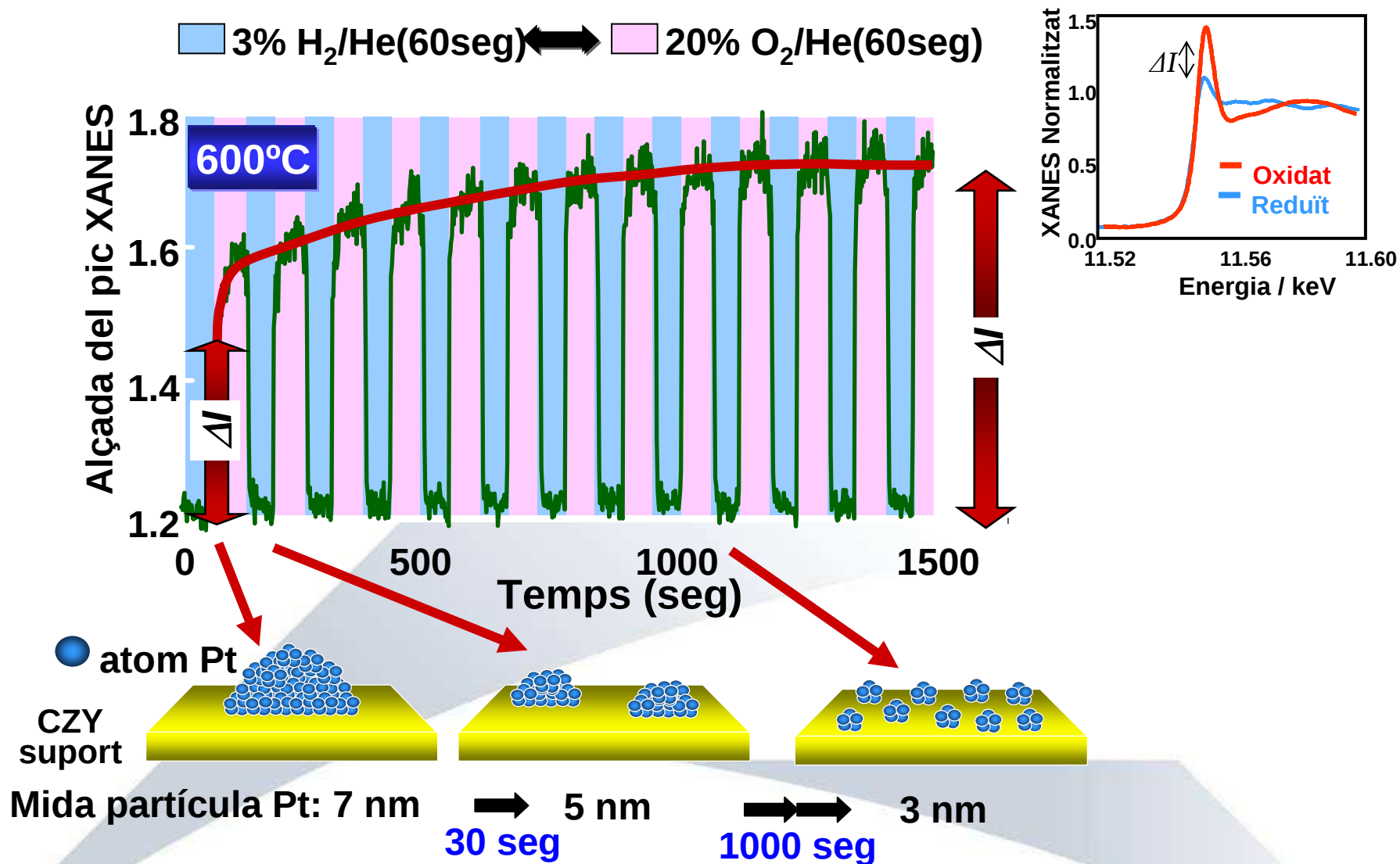
Aglomeració és la responsable principal de la desactivació dels convertidors catal-lítics (TWC)



Objectiu

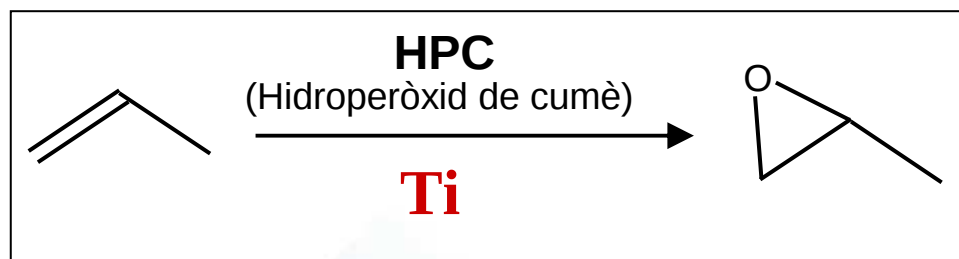


Estudi **dinàmic** i **in situ** via l'absorció de raigs X en fluorescència

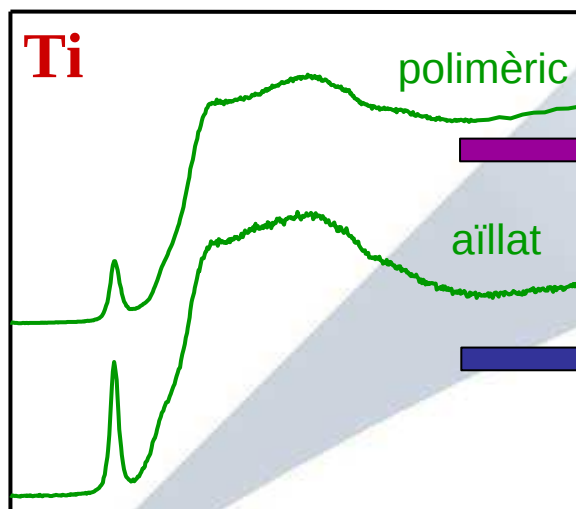


Y. Nagai et al., *Angew. Chem., Int. Ed.*, 47, 9306 (2008).
Y. Nagai et al., *Catalysis Today* (2009).

Indústria petroquímica: epoxidació de propil.lè

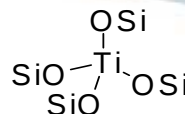
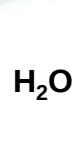
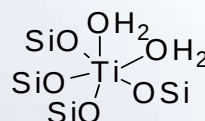


Ti en entorns aïllats (Ti-MCM-41)



Inactiu

Actiu



> 98% conversió

> 97% selectivitat

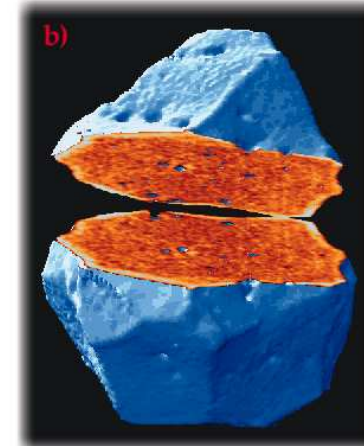
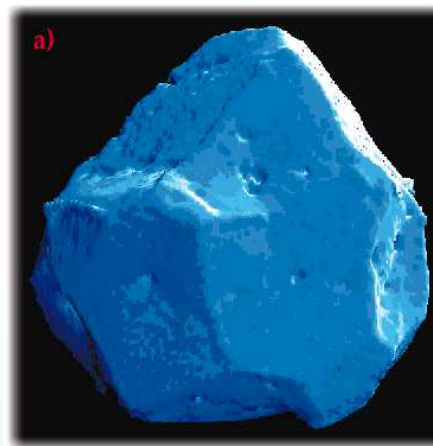
> 95% eficiència peròxid

Temps de vida del catalitzador > 1 any

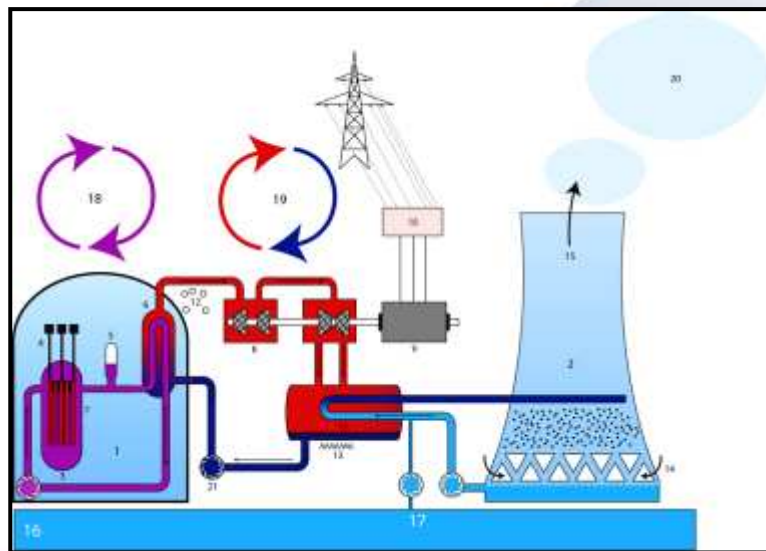
Actualment hi ha 3 plantes en el món emprant aquesta tecnologia per a la producció de l'òxid de propil.lè



Medi ambient: partícules d'urani alliberat a Xernòbil



canals - productes de fisió volàtils

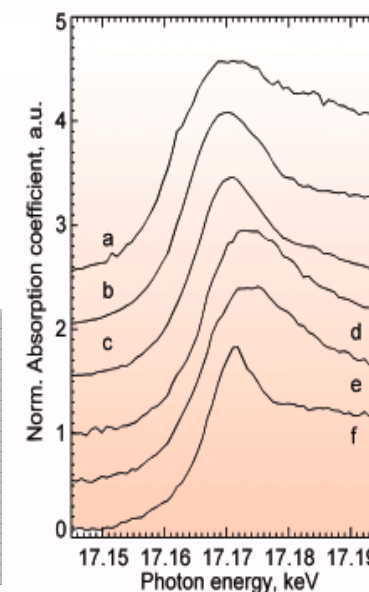


Salbu *et al.*, *JER* 64, 167-173 (2003).

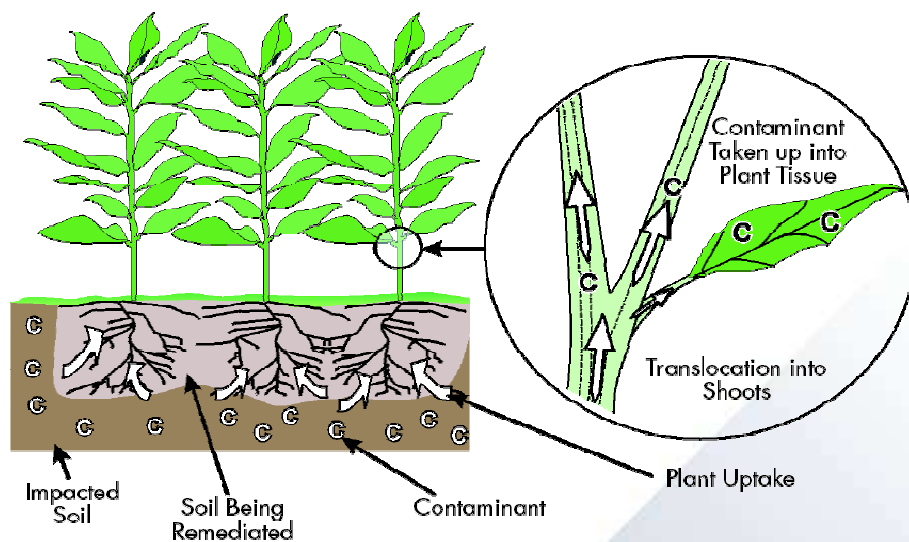
Estats d'oxidació U



Diferències en cinètica d'erosió, mobilitat i quocients de transferència al sòl - vegetació



Medi ambient: fito-remediació o extracció de la contaminació del sol

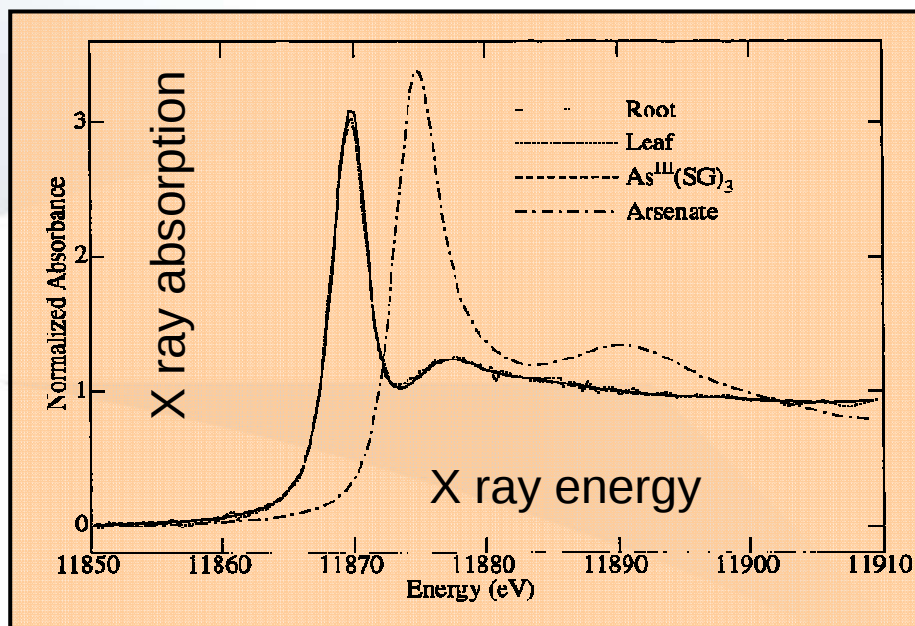


Om Parkash Dhankher *et al*
-NATURE Biotechnology 2002

Planta transgènica
"mustard plant"

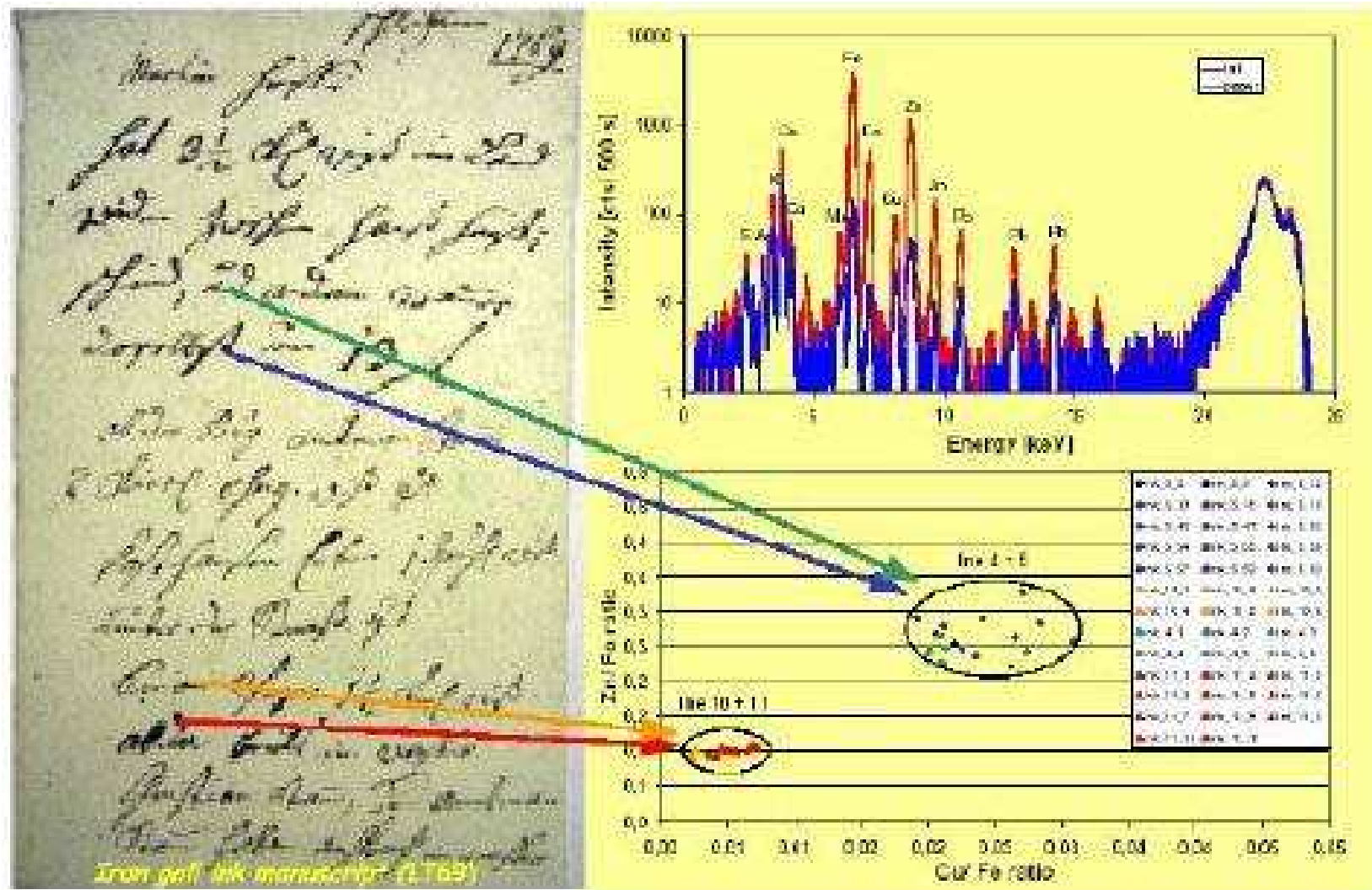
Acumula 2–4
vegades més **Arsènic**
en fulles i tall

Espectroscòpia
d'absorció
de raigs X



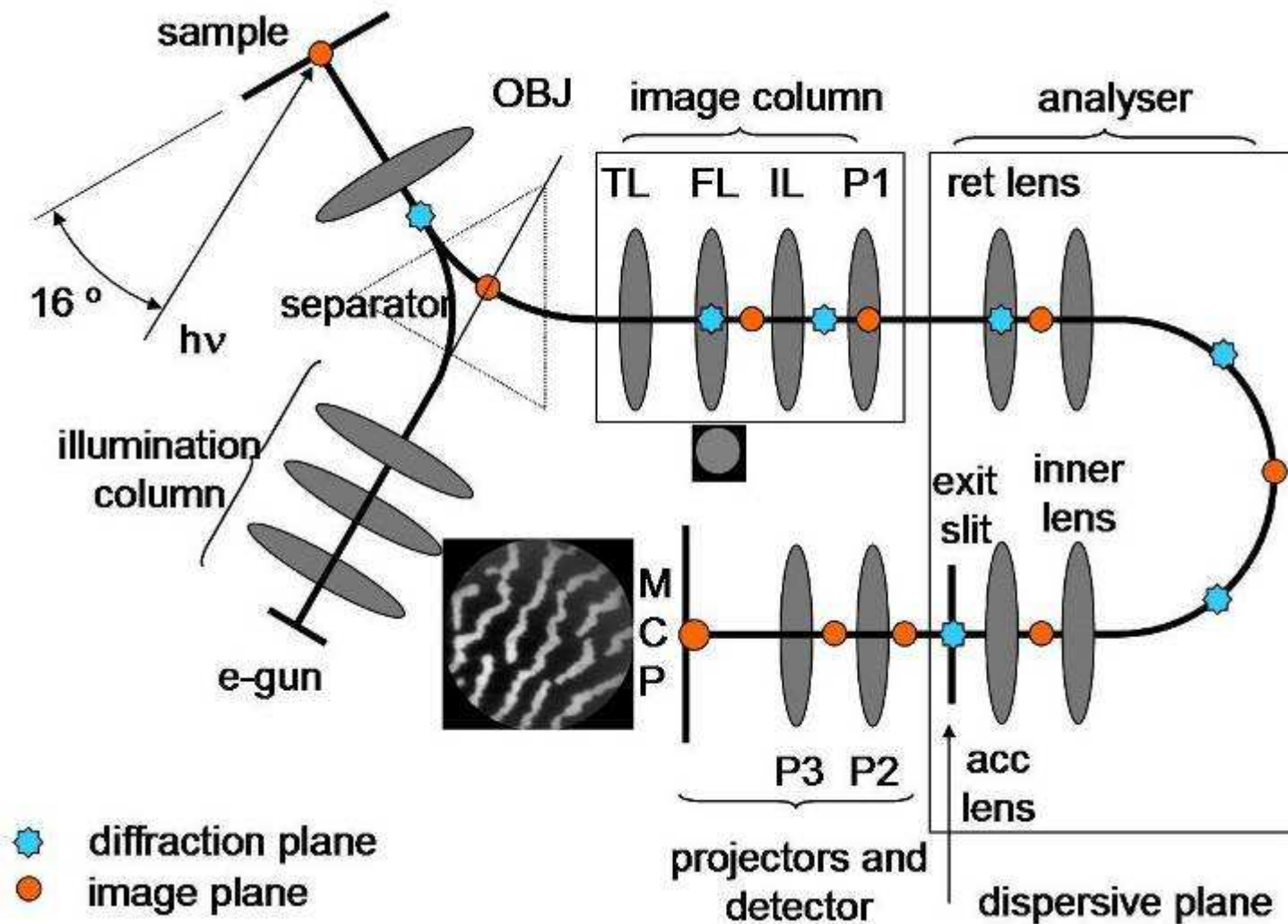
Stanford Synchrotron Radiation Laboratory

Art: conservació d'un manuscrit de l'any 1769



L'anàlisi per microfluorescència permet distingir les diferents tintes utilitzades. Aquesta informació és valuosa per establir el mètode de conservació dels documents històrics.





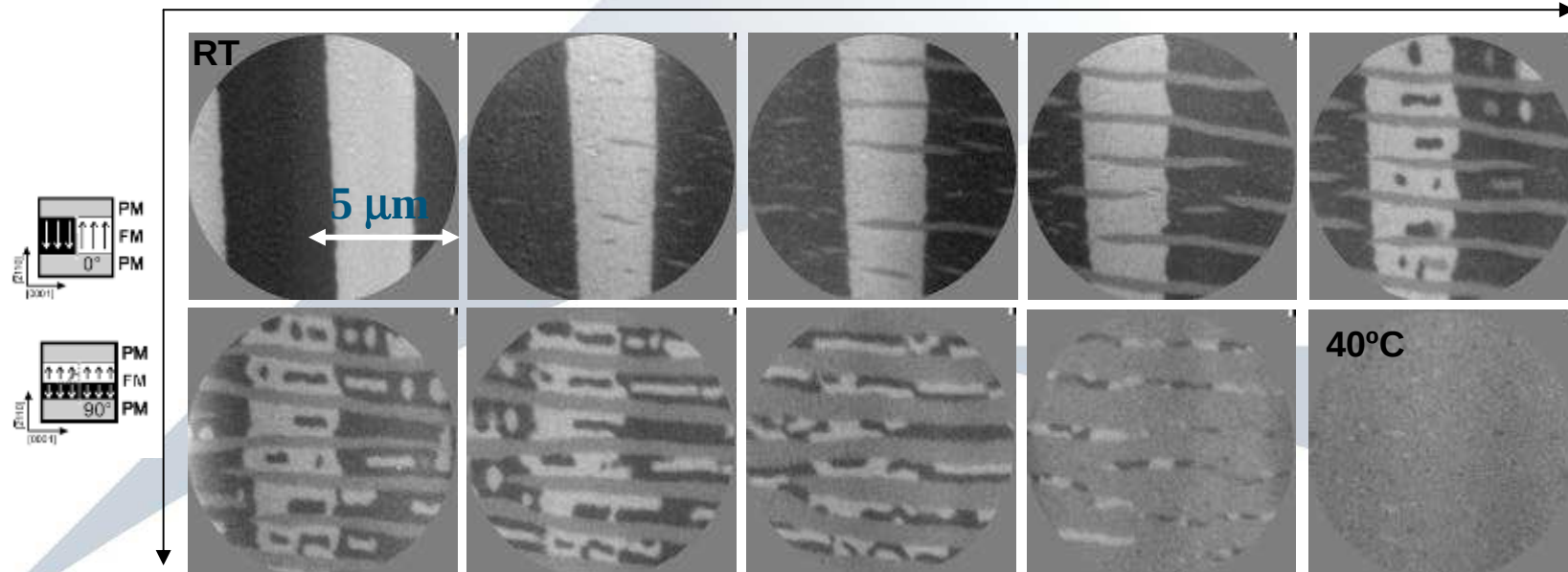
Com podem fabricar un transistor d'espín?

- lectors de discs durs molt més petits i segurs
- utilitzar l'espín electrònic per a guardar informació (MRAM) enlloc de la càrrega

Transicions de fase en films de MnAs sobre GaAs (100): α -hexagonal ferromagnètic a β -ortoròmbic paramagnètic fase per sobre de 40°C

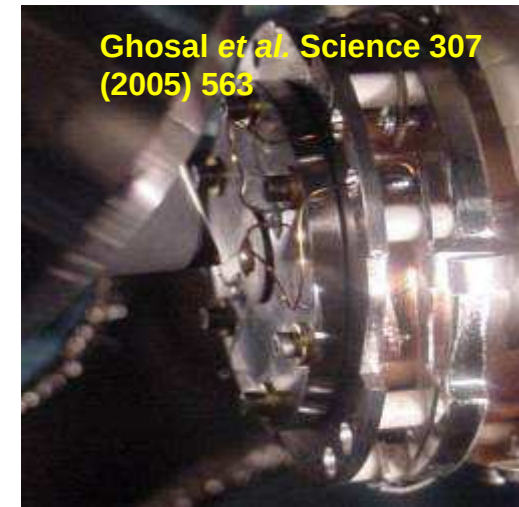
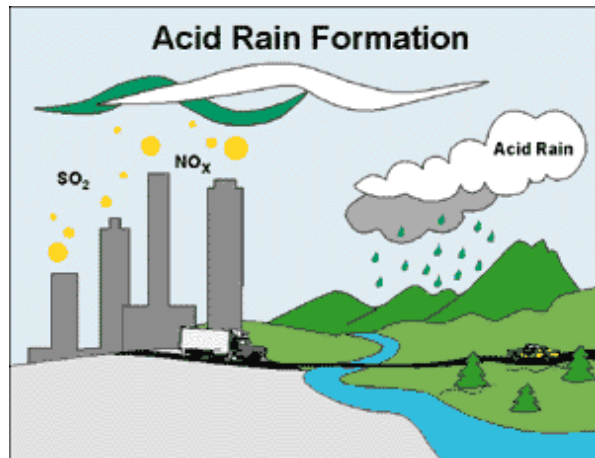
XMCD-PEEM Mn llindar d'absorció L_3

Augment de temperatura



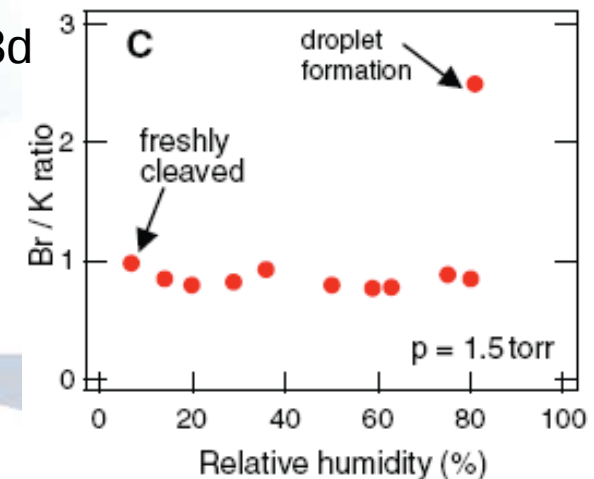
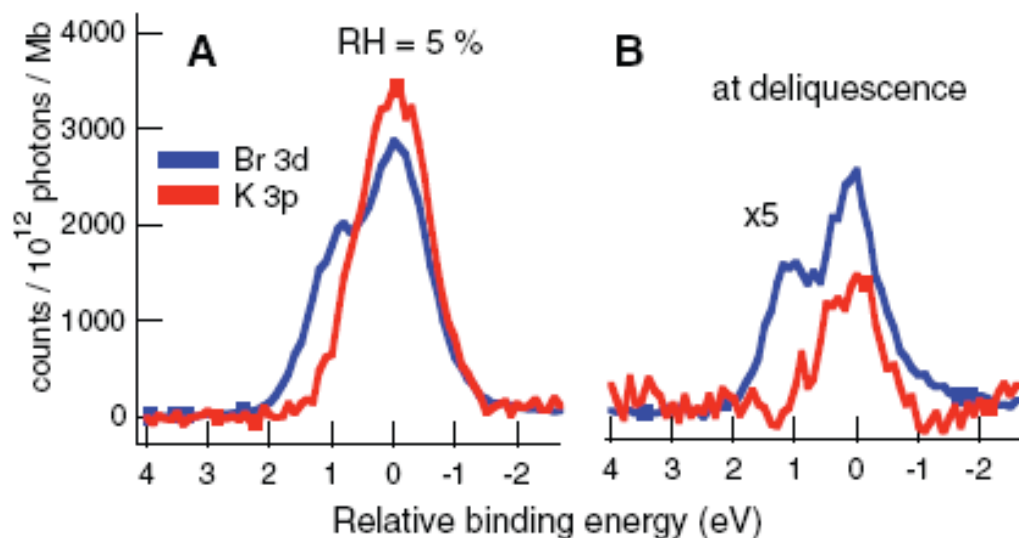
Bauer et al. J. Vac. Sci. Technol. B 20, 2539 (2002)

Medi ambient: com es comporten les gotes del mar? d'on surt la pluja àcida?
com podem estudiar la química de l'atmosfera?



Ghosal et al. Science 307
(2005) 563

Espectres de fotoemissió dels orbitals 3d (Br) i 3p (K) 3d



Quan es forma una gota, s'ha detectat que els ions bromur es concentren fins a 3 vegades que en la dissolució (exemple: gotes produïdes per una ona al mar).



Aplicacions: Absorció ressonant i dispersió

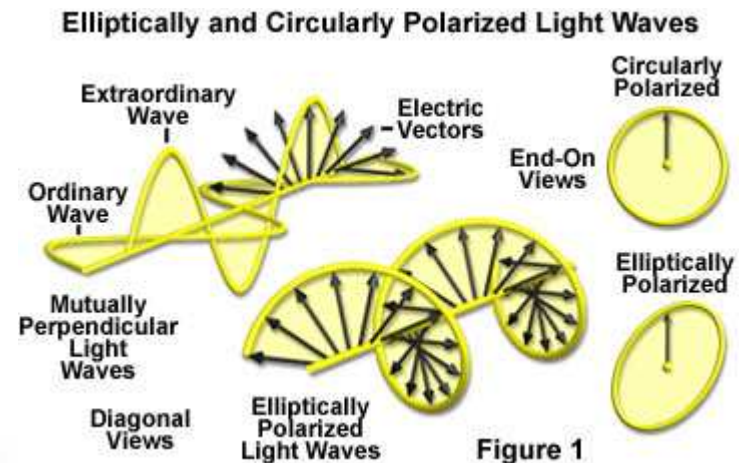
BL29: BOREAS



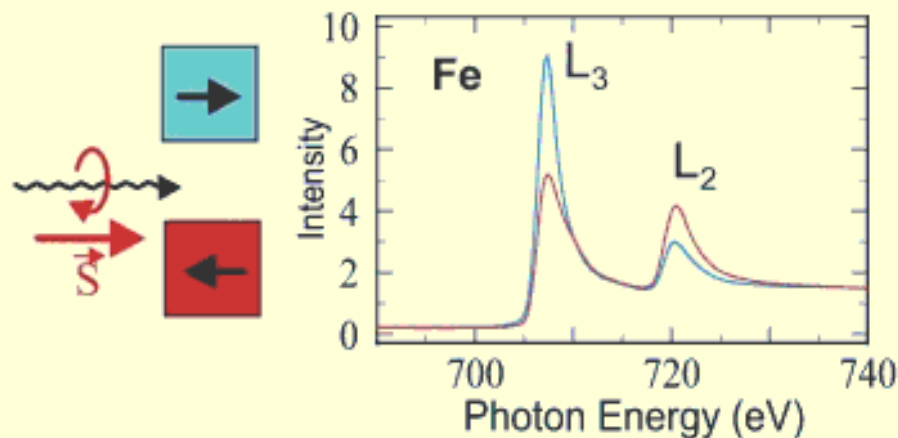
Els raigs X polaritzats es poden utilitzar per a caracteritzar materials magnètics i els seus dominis.

Els materials ferromagnètics es caracteritzen amb llum polaritzada circularment (dreta o esquerra) i els antiferromagnètics amb llum polaritzada linealment (horitzontal o vertical).

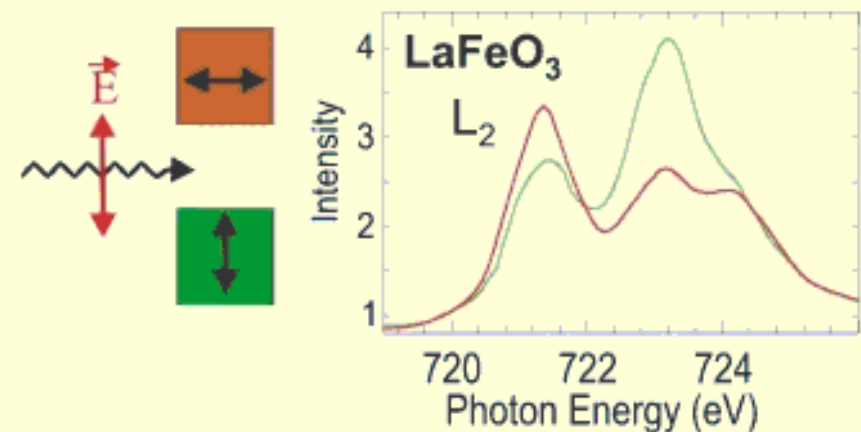
raigs X polaritzats



Circular Dichroism - Ferromagnets

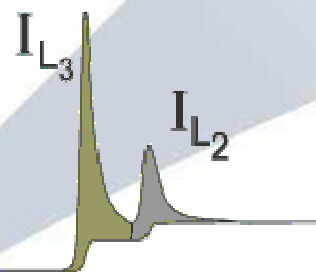
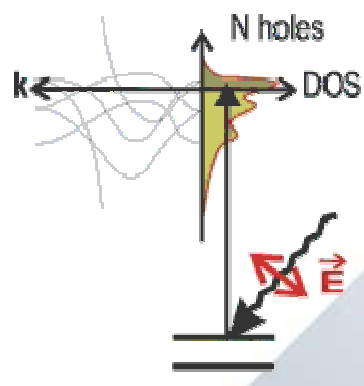


Linear Dichroism - Antiferromagnets

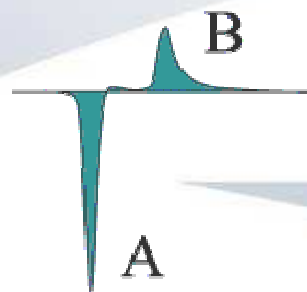
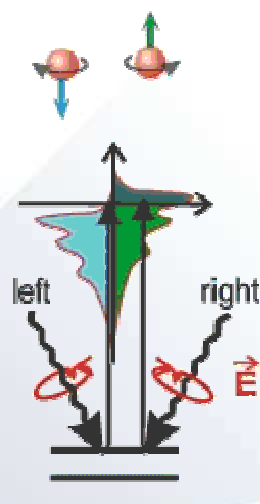


Spin and Orbital Moments: X-Ray Magnetic Circular Dichroism

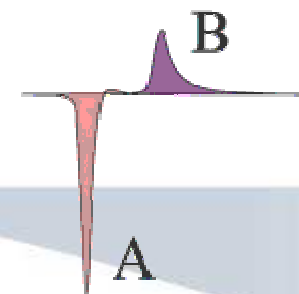
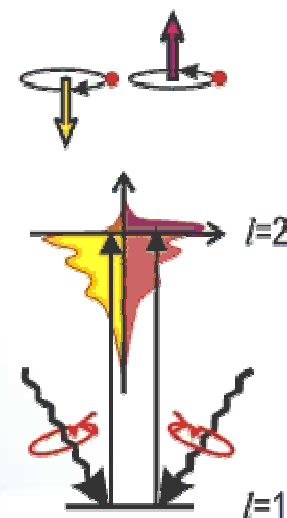
(a) d-Orbital Occupation



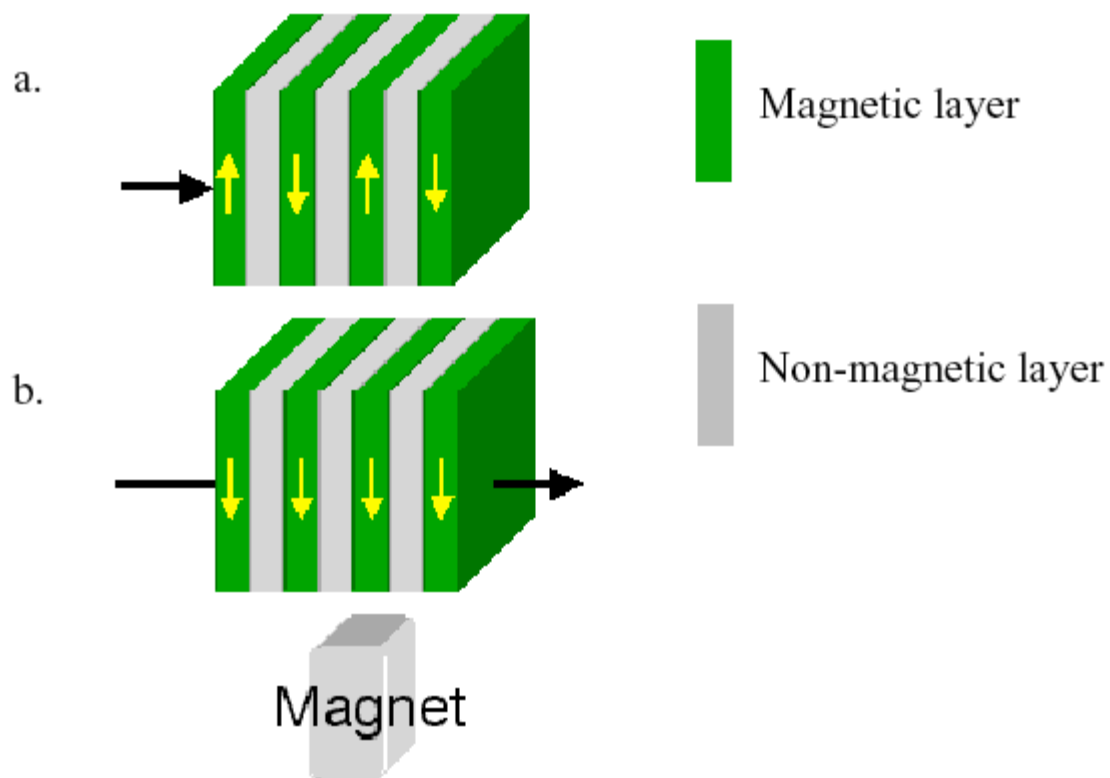
(b) Spin Moment



(c) Orbital Moment



La magnetoresistència gegant

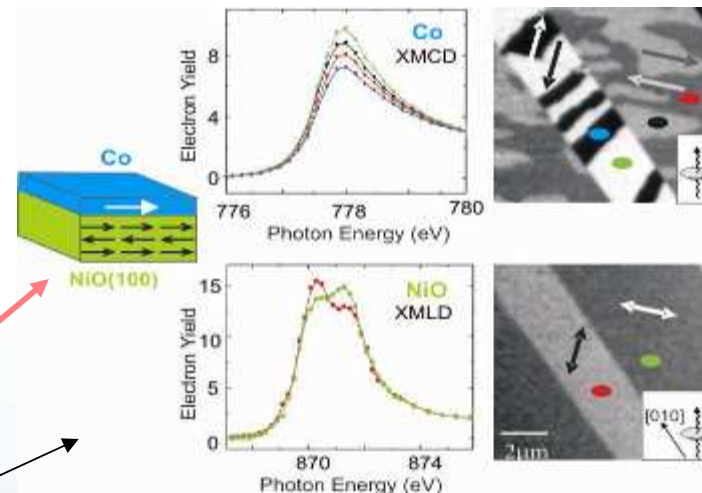


La informació avui en dia l'escribim amb bits magnètics

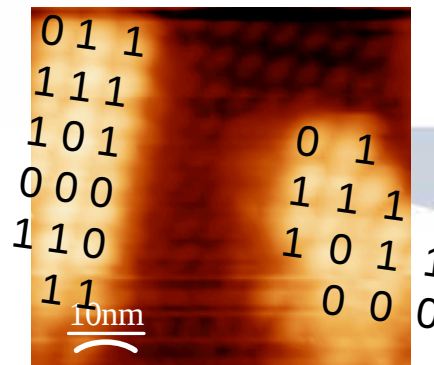
Els discs durs estan basats en la magnetoresistència gegant (premi Nobel física 2007)



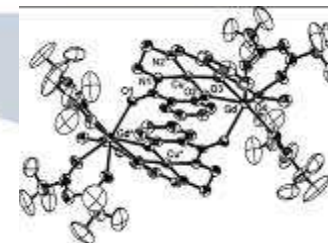
(Photo: IBM hard disk drive)



SYNCHROTRON X-RAYS USED FOR MAGNETIC ANALYSIS AND IMAGING IN NANOTECHNOLOGY: XMCD SPECTROSCOPY AND XMCD-MICROSCOPY (X-PEEM)
(Stohr, Sholl et al, ALS, Berkeley)



El somni de la nanotecnologia són els bits atòmics.



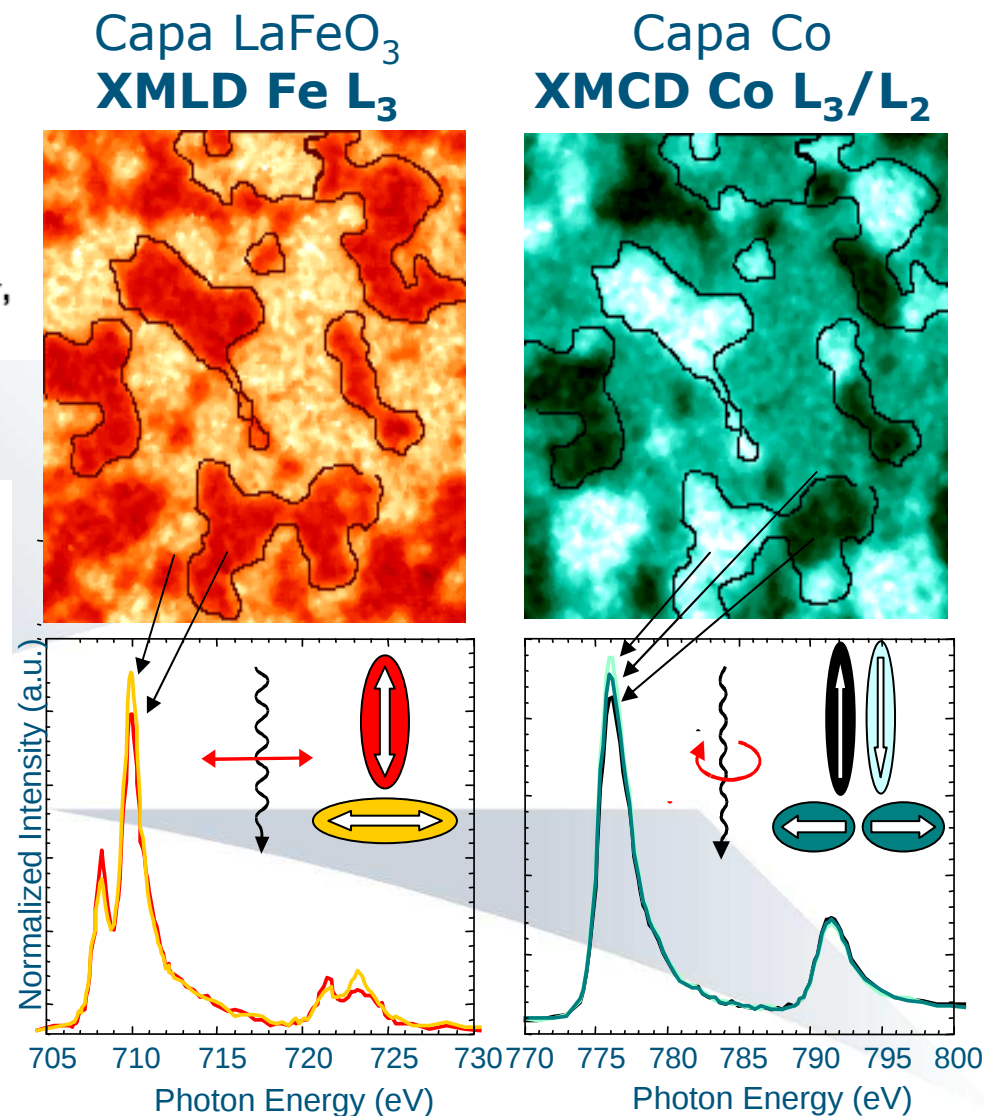
Com funcionen els capçals dels discs durs?

Direct observation of the alignment of ferromagnetic spins by antiferromagnetic spins

F. Nolting*, A. Scholl*, J. Stöhr†, J. W. Seo‡§, J. Fompeyrine§, H. Siegwart§, J.-P. Locquet§, S. Anders*, J. Lüning†, E. E. Fullerton†, M. F. Toney†, M. R. Scheinfein|| & H. A. Padmore*

Nature, 405 (2000), 767.

Figure 1 Images and local spectra from the antiferromagnetic and ferromagnetic layers for 1.2-nm Co on $\text{LaFeO}_3/\text{SrTiO}_3(001)$. **a**, Fe L-edge XMLD image; **b**, Co L-edge XMCD image. The contrast in the images arises from antiferromagnetic domains in LaFeO_3 (**a**) and ferromagnetic domains in Co (**b**) with in-plane orientations of the antiferromagnetic axis and ferromagnetic spins as indicated below the images. The spectra shown underneath were recorded in the indicated areas and illustrate the origin of the intensity contrast in the PEEM images.



Gràcies!