

PETITE HISTOIRE  
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

9 – LA RADIOACTIVITÉ  
« ARTIFICIELLE »

Alain Bouquet

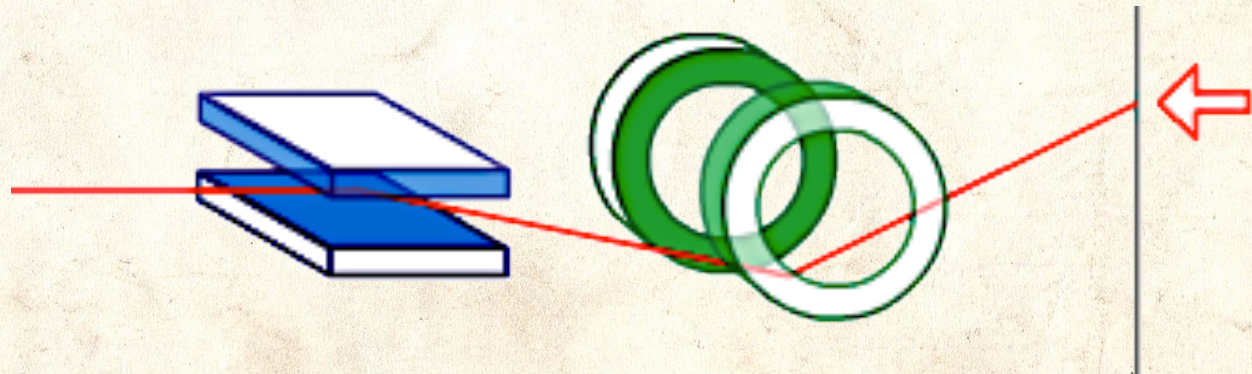
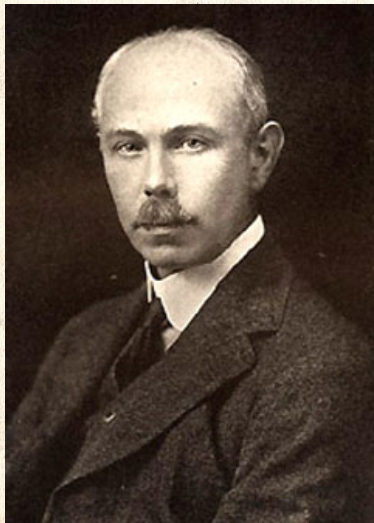
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

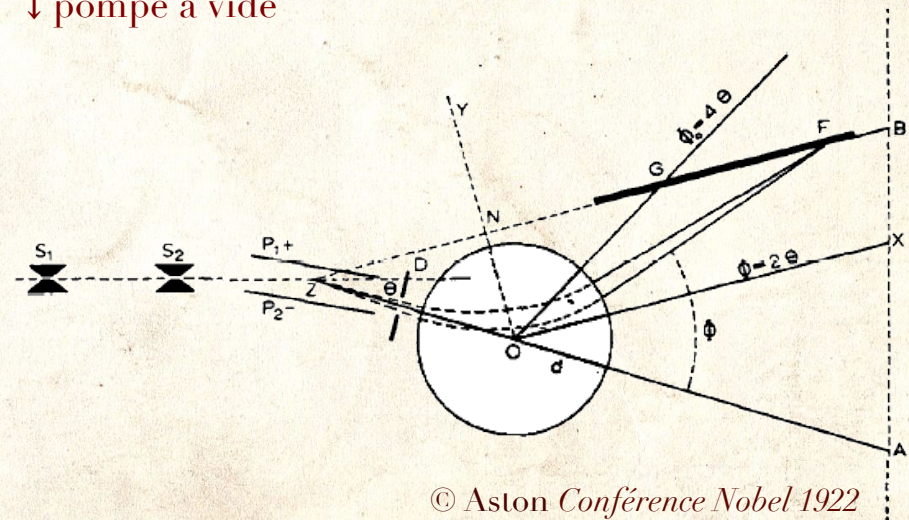
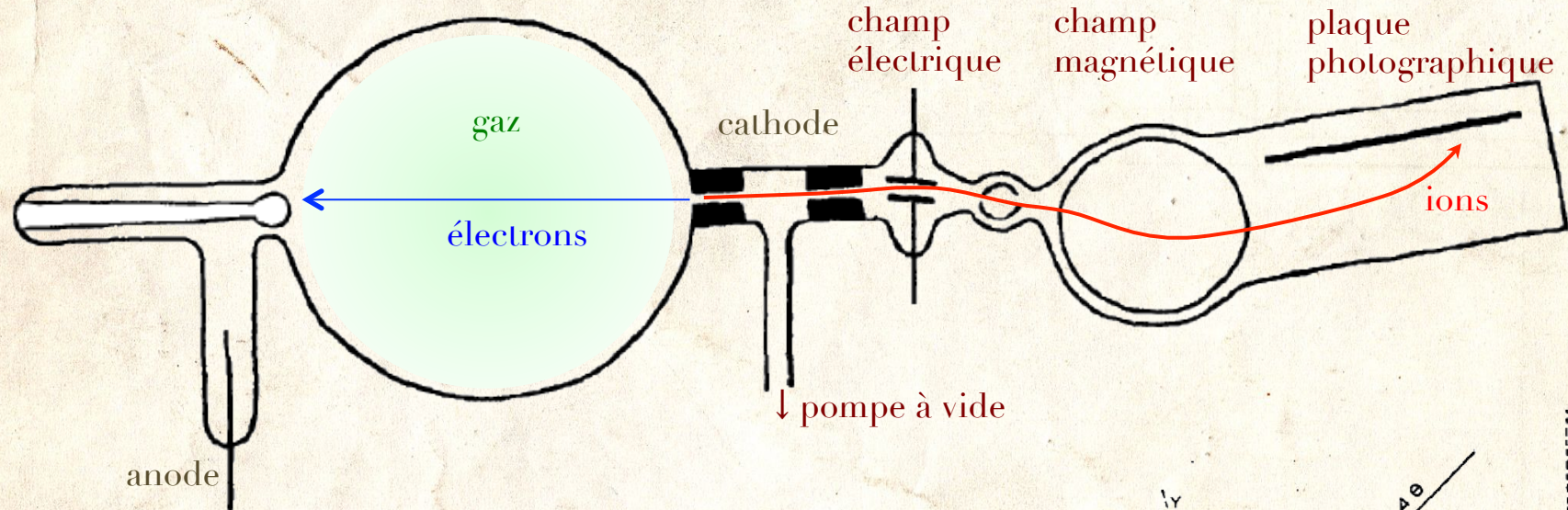
# FRANCIS ASTON ET LA MASSE DES NOYEAUX

# FRANCIS ASTON ET LE SPECTROMÈTRE DE MASSE

- Assistant de J.J. Thomson au Cavendish
- Étude des « rayons canaux »
- Soddy : isotopie pour les noyaux lourds radioactifs
- Thomson et Aston : isotopie du néon 20 et du néon 22
- Le spectromètre de masse
  - champ électrique  $\Rightarrow$  déviation  $\sim e/m V$
  - champ magnétique  $\Rightarrow$  déviation  $\sim e/m V^2$
  - mesure séparée des déviations  $\Rightarrow$  séparément  $e/m$  et  $V$
  - ou compenser l'influence de la vitesse sur une déviation électrique par son influence sur une déviation magnétique  $\Rightarrow$  tous les corps de même  $m/e$  aboutissent au même point



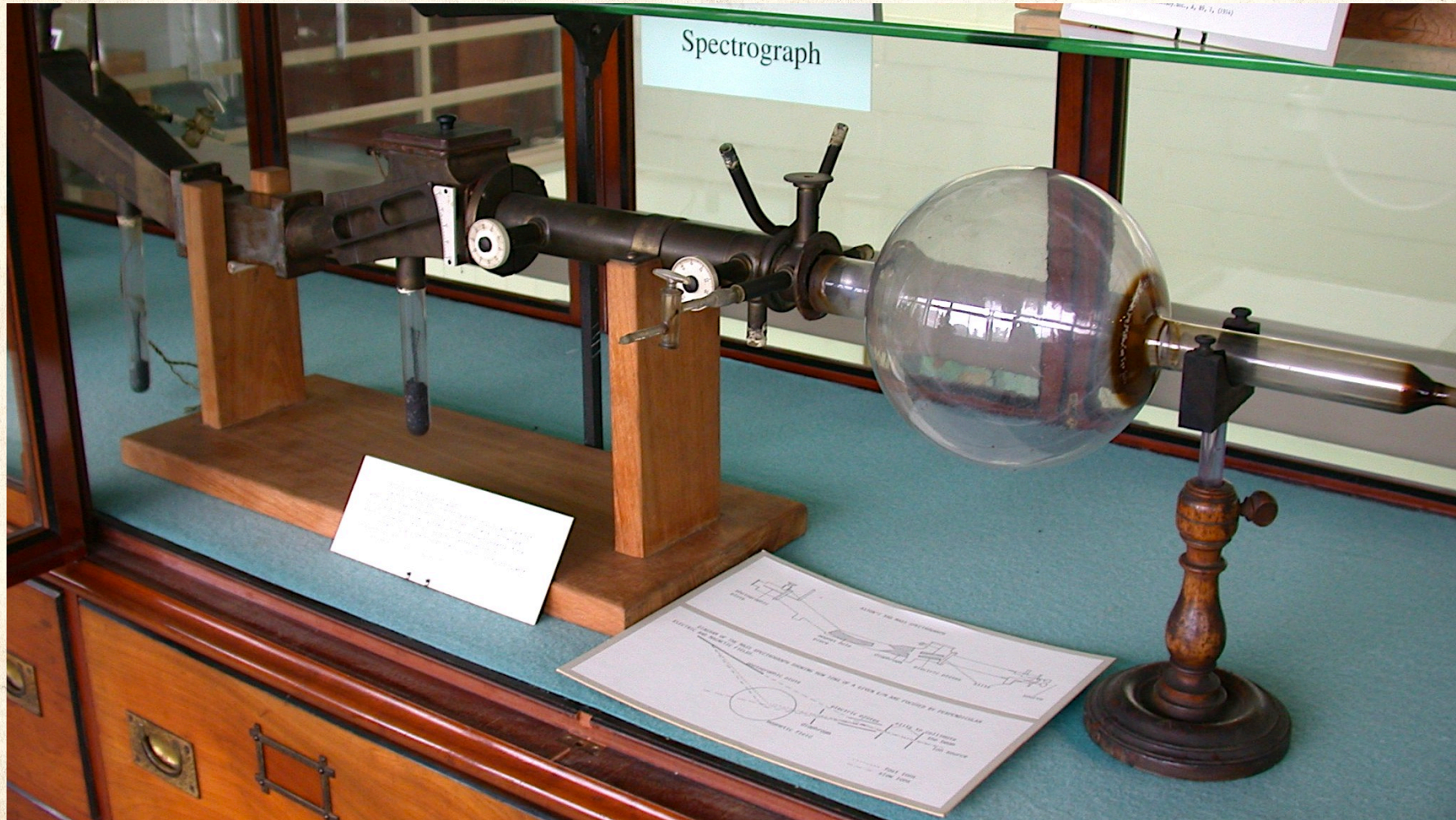
# LE SPECTROGRAPHE DE MASSE D'ASTON



Par la suite, possibilité d'ions négatifs (par capture d'électrons)

© Aston Conférence Nobel 1922

# LE (3<sup>o</sup>) SPECTROGRAPHE DE MASSE D'ASTON



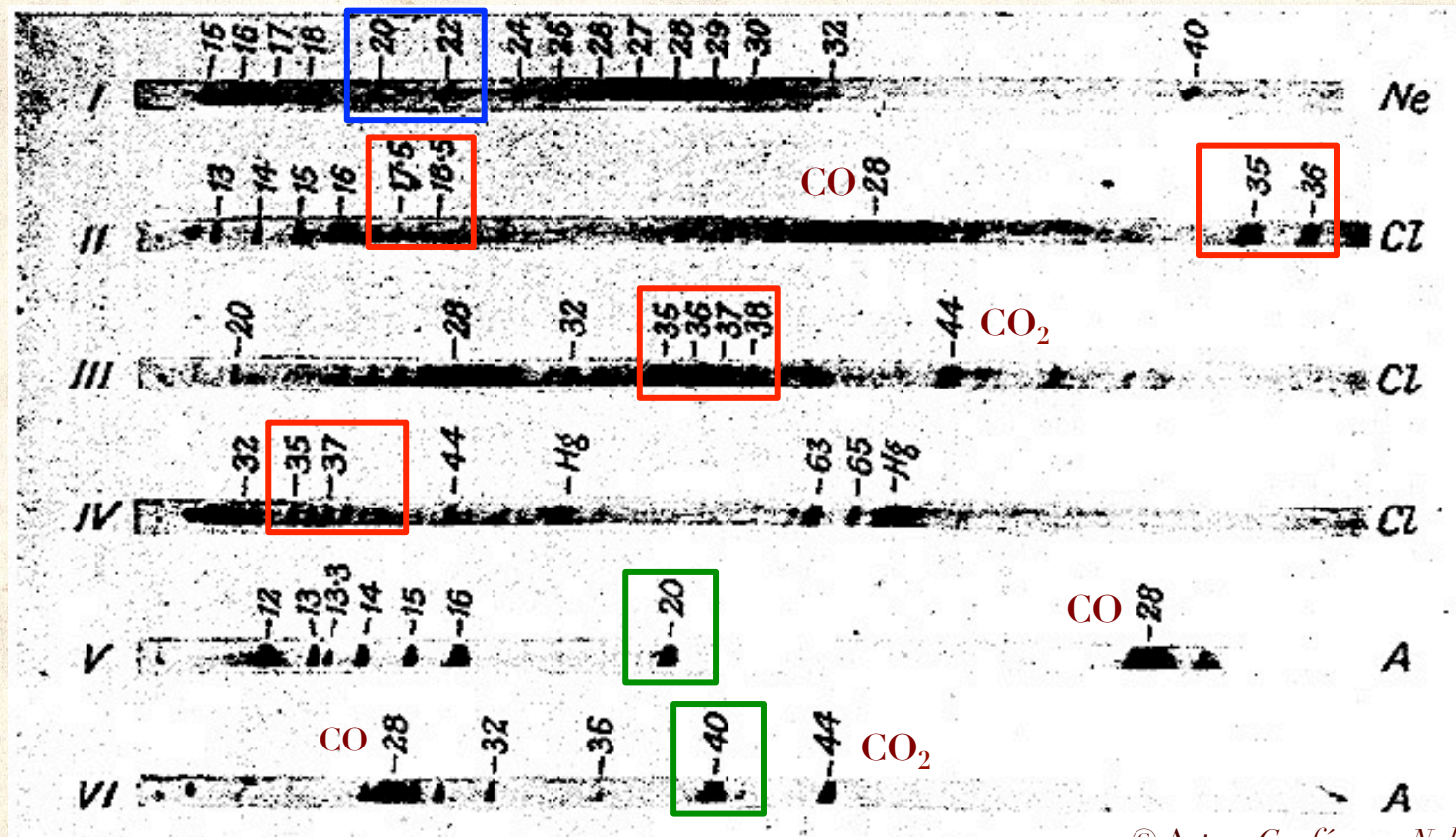
# DES ISOTOPES (PRESQUE) PARTOUT

## ○ Exemples

- néon 20 et néon 22
- chlore 35 et chlore 37

## ○ Subtilités

- $\text{HCl}^+$  → lignes à 36 et 38
- $\text{Cl}^{++}$  → lignes à 17,5 et 18,5
- Ar → lignes à 40 et à 20



© Aston Conférence Nobel 1922

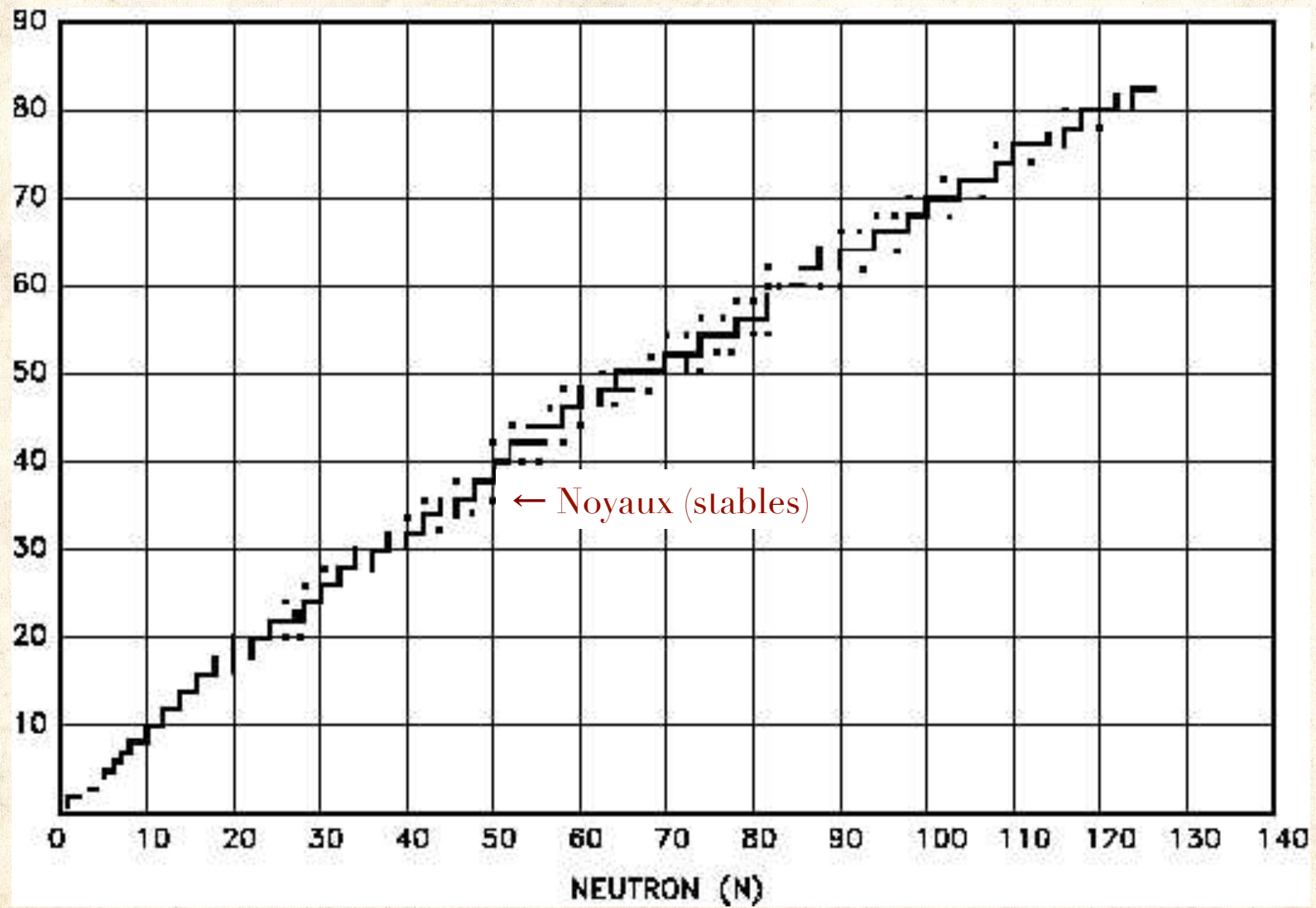
# RÉSULTATS ESSENTIELS

- Le nombre d'isotopes d'un élément est limité
- Les masses des isotopes sont tous des nombres entiers (à 1/1000 près)
- *Ou presque* → défaut de masse ⇔ énergie de liaison (courbe d'Aston, 1923)
- À la seule exception de l'hydrogène ⇔ absence d'une énergie de liaison
- ⇒  $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 7 \times 10^{14} \text{ J/kg}$
- Les masses atomiques non-entières sont dues à la superposition de différents isotopes

Table of elements and isotopes.

Element	Atomic number	Atomic weight	Minimum number of isotopes	Masses of isotopes in order of intensity
H	1	1.008	1	1.008
He	2	3.99	1	4
Li	3	6.94	2	7, 6
Be	4	9.1	1	9
B	5	10.9	2	11, 10
C	6	12.00	1	12
N	7	14.01	1	14
O	8	16.00	1	16
F	9	19.00	1	19
Ne	10	20.20	2	20,22
Na	11	23.00	1	23
Mg	12	24.32	3	24,25,26
Al	13	26.96	1	27
Si	14	28.3	2	28,29,(30)
P	15	31.04	1	31
S	16	32.06	1	32
Cl	17	35.46	2	35,37
A	18	39.88	2	40,36
K	19	39.10	2	39,41
Ca	20	40.07		40, 44
Fe	26	55.84	(1)	56,(54)?
Ni	28	58.68		58,60
Zn	30	65.37	(4)	64,66,68,70
As	33	74.96	1	75
Se	34	79.2	6	80,78,76,82,77,74
Br	35	79.92	2	79,81
Kr	36	82.92	6	84,86,82,83,80,78

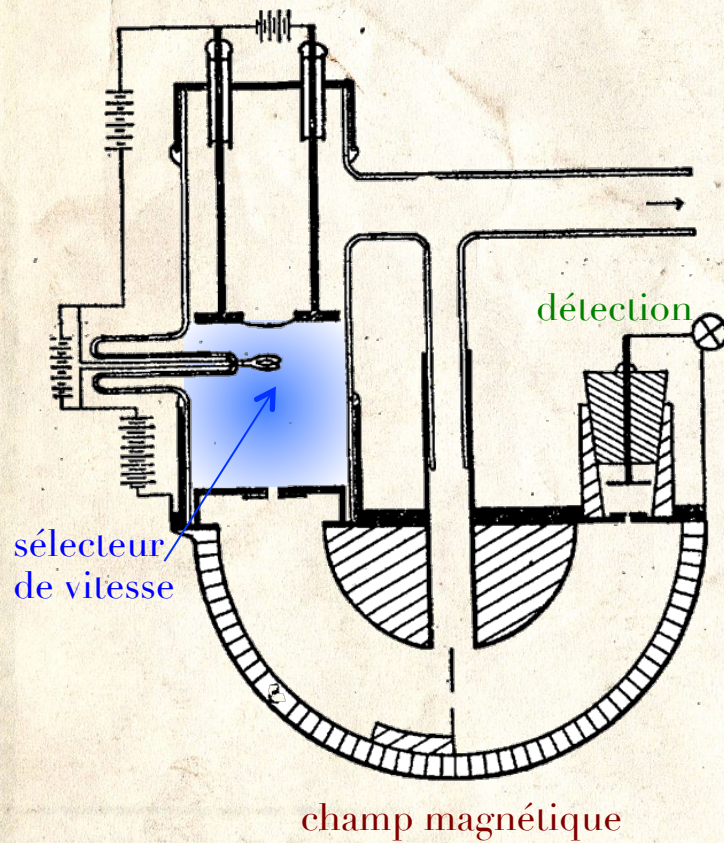
# TABLE DES ISOTOPES



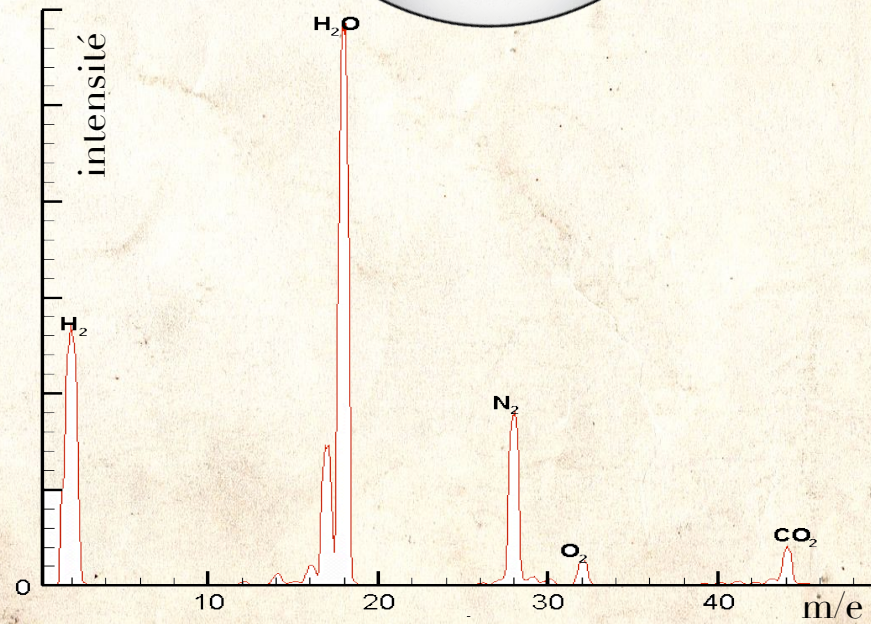
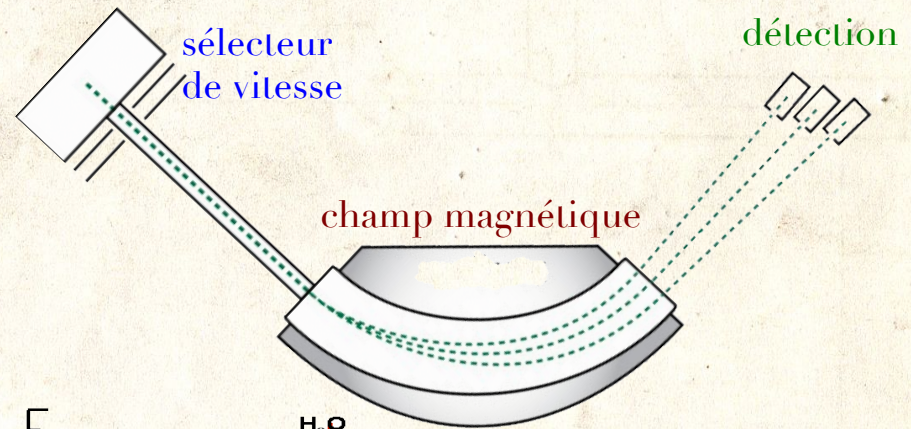


# PROGRÈS EN SPECTROMÉTRIE DE MASSE

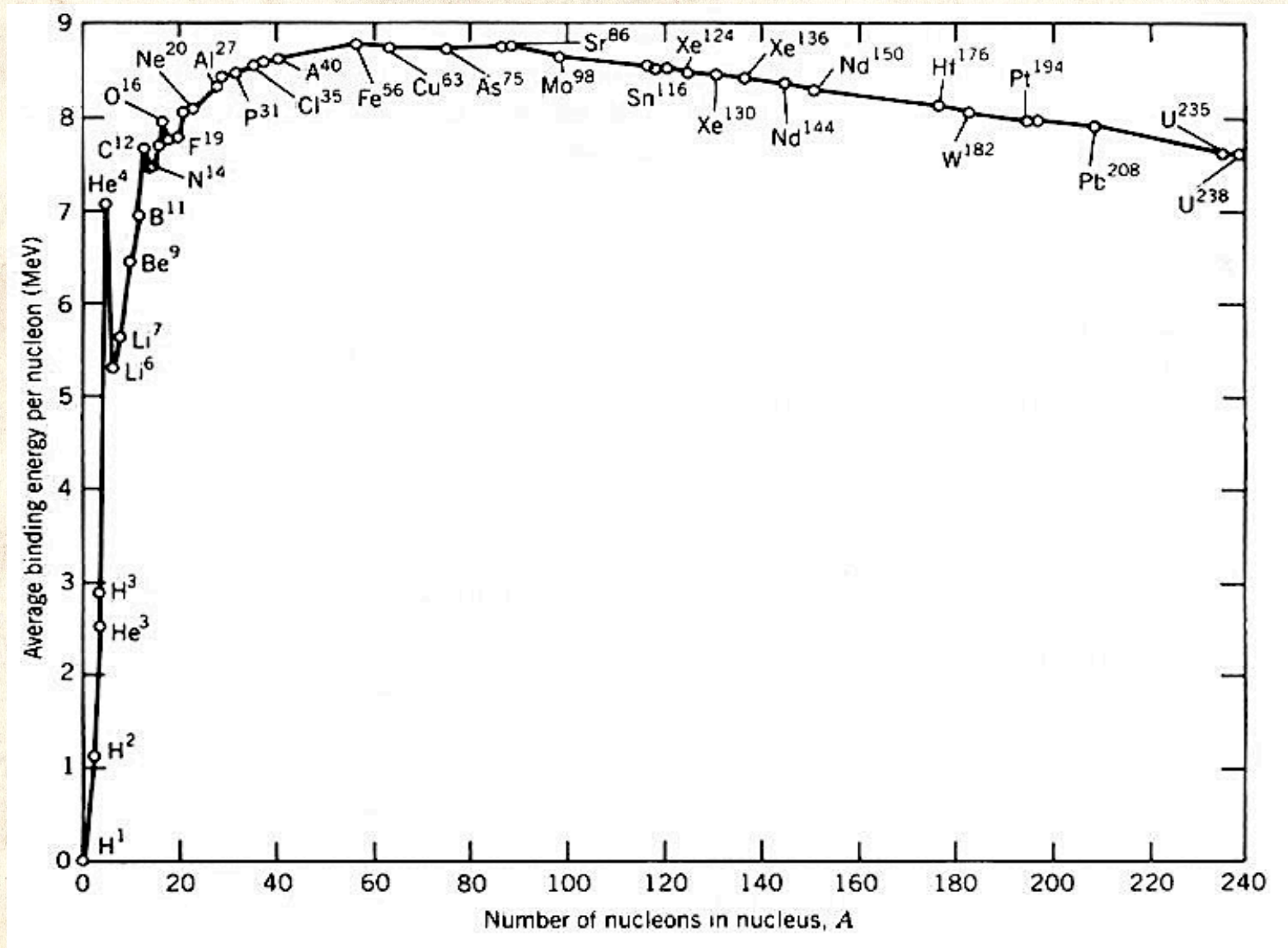
○ Dempster 1918



○ Séparation isotopique



# LE « DÉFAUT DE MASSE » ↔ ÉNERGIE DE LIAISON



# LE POSITRON

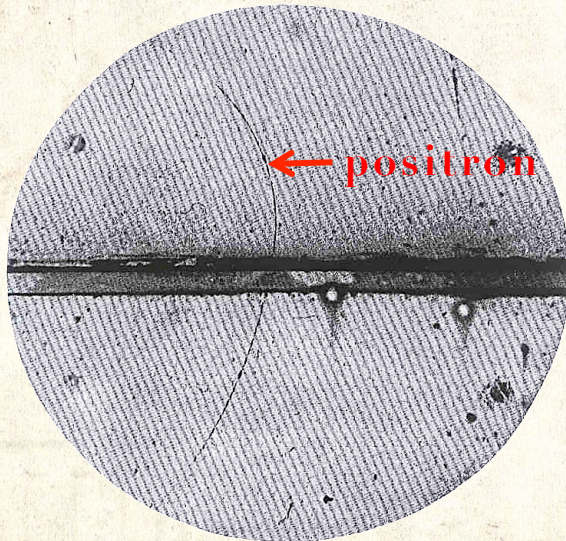
# PAUL DIRAC (1902-1984)

- 1925 : statistiques quantiques [spins  $\frac{1}{2}$  entiers]
- 1926 : équivalence de la mécanique ondulatoire et de la mécanique des matrices
- 1928 : équation relativiste pour l'électron (avec spin)  
→ électrodynamique quantique
- 1930 : formalisme moderne de la mécanique quantique
- 1931 : quantification de la charge électrique
- 1931 : réinterprétation des solutions d'énergie négative de l'équation de Dirac comme des **antiparticules** d'énergie positive et de charge opposée
  - → théorie quantique des champs
  - → **posit(r)on**
- Prix Nobel de physique 1933



# LA DÉCOUVERTE DU POSITRON

- Été 1932 : Carl Anderson
  - étude des rayons cosmiques
  - utilisation d'une chambre à brouillard de Wilson pour photographier les trajectoires
  - → traces analogues à celles des électrons, mais de courbure opposée ⇒ charge +



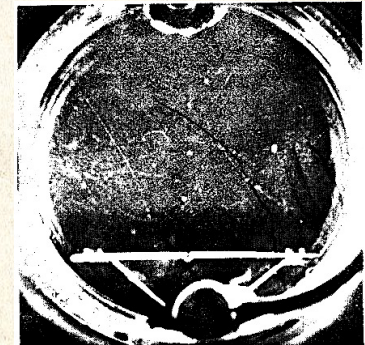
- 1936 : prix Nobel de physique, et découverte du muon

- Une nouvelle occasion manquée
- Printemps 1932 : les Joliot-Curie et le neutron
  - chambre de Wilson
  - gammas et électrons secondaires

Au cours des observations des électrons secondaires par la méthode Wilson, nous en avons remarqué un certain nombre d'énergie quantique élevée se dirigeant vers la source. Voir pl. I, B). Il est peu probable qu'il s'agisse d'électrons Compton projetés par le rayonnement  $\gamma$  diffusé, car on serait conduit à assigner à ces radiations une énergie quantique extrêmement élevée. On pourrait supposer que des électrons projetés vers l'avant ont été réfléchis sur les parois de l'appareil et reviennent vers l'arrière. Cependant,

- En fait : positrons  $e^+$  !

- 1933
  - $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$
  - $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
  - $e^+$  nucléaires



# UNE IDÉE DES JOLIOT-CURIE

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	O
----	-----	------	-----	----	-----	-------	------	----	-----	------	-----	----	-----	------	---

1 H																2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	(85)	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)					

Technétium (1937)



Astate (1940)

Francium (1939)

Neptunium (1940) Plutonium (1940)

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Prométhium (1945)

Tableau périodique dans les années 1920-1930, suite aux travaux d'Henry Moseley

# UNE BONNE IDÉE ET UN RÉSULTAT INATTENDU

- À la recherche de l'élément  $Z=85$  manquant
  - **SI** le polonium ( $Z=84$ ) subissait une transmutation  $\beta$  (transformant un neutron en proton), il donnerait  $Z=85$



- Possible?
  - polonium 210  $\rightarrow$  plomb 206 ( $Z=82$ ) en émettant un  $\alpha$  (Marie Curie 1898)
  - le bismuth 212 ( $Z=83$ ) est à la fois émetteur  $\alpha$  et  $\beta$ , ainsi que les bismuths 211, 213 et 214
- $\rightarrow$  recherche d'un mode rare
  - source **très** intense de Po210
  - feuille d'aluminium pour arrêter les  $\alpha$
  - chambre de Wilson pour les  $\beta$
- $\Rightarrow$  résultat inattendu (été 1933)
  - **pas** d'électrons ( $\rightarrow$  pas de  $Z=85$ )
  - des protons ( $\alpha + \text{Al} \rightarrow \text{p} + \text{Si} ?$ )
  - des **positrons**
- Interprétation :  $\text{p} \rightarrow \text{n} + \text{e}^+ ?$



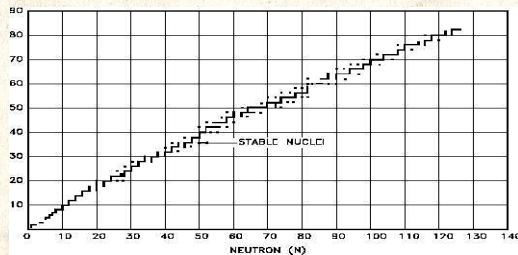
# LE NOYAU APRÈS LA DÉCOUVERTE DU NEUTRON

- Découverte du neutron → noyau formé de Z protons et N neutrons
- Masse proton ~ masse neutron ⇒ masse du noyau ~  $(Z+N)m_p = Am_p$

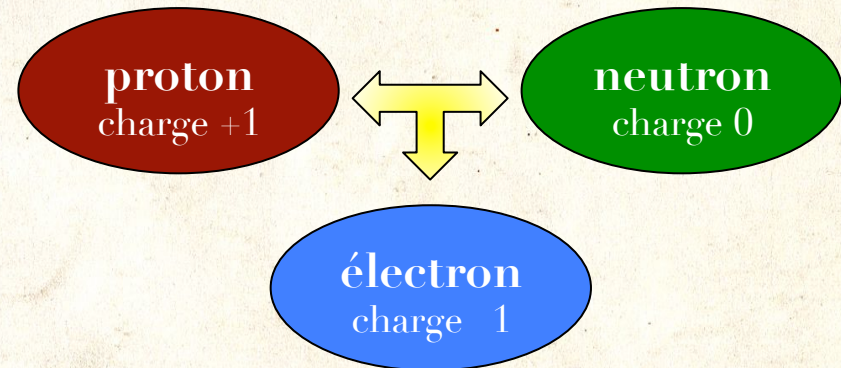


## ○ Questions ouvertes

- relation entre proton, neutron et électron
- existence d'**autres** isotopes



- **cohésion** du noyau vis à vis de la répulsion électromagnétique des protons



# LE CONGRÈS SOLVAY D'OCTOBRE 1933



# LE CONGRÈS SOLVAY D'OCTOBRE 1933

- Consacré à « La structure des noyaux »
  - Présentation des travaux théoriques de Heisenberg, Fermi, Bohr, Gamow, Pauli
  - Les Joliot-Curie y présentèrent leur interprétation d'une *dissociation du proton* (transmutation bêta **inverse**  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ )
  - Intérêt marqué de la part de Bohr et de Pauli
  - Mais **réaction violente de Lise Meitner**, annonçant avoir répété la même expérience *sans détecter de neutron*



# APRÈS LE CONGRÈS SOLVAY

## ○ Idée : détecter les neutrons **et** les positrons

- impossible alors à faire simultanément : neutron, positron (et neutrino) partant dans toutes les directions
- → idée de vérifier que neutrons et positrons apparaissaient quand l'énergie des  $\alpha$  franchissait **le même seuil**

## ○ ⇒ expérience en 2 temps

1. mesure du seuil en  $\alpha$  pour les neutrons
2. mesure du seuil en  $\alpha$  pour les positrons

## ○ Varier l'énergie des $\alpha$ $\Leftrightarrow$ les ralentir par collision sur un gaz

## ○ **Montage simple**

1. Source des  $\alpha$   
polonium 210

### 2. Freinage

enceinte remplie de gaz carbonique dont on peut varier la pression ( $P \uparrow \Leftrightarrow E_\alpha \downarrow$ )

3. Écran d'aluminium arrêtant les  $\alpha$

### 4. Détecteur de neutrons

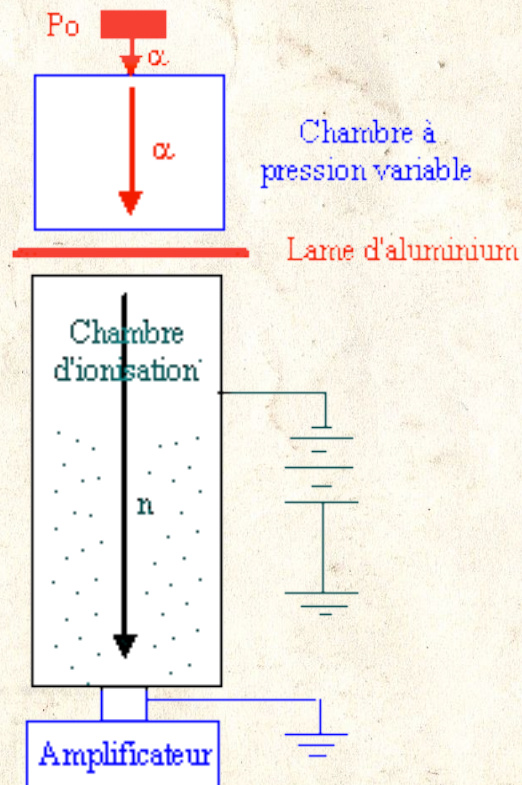
chambre d'ionisation aux parois paraffinées (le neutron éjecte un proton qui ionise du butane)

### 5. Détecteur de positrons

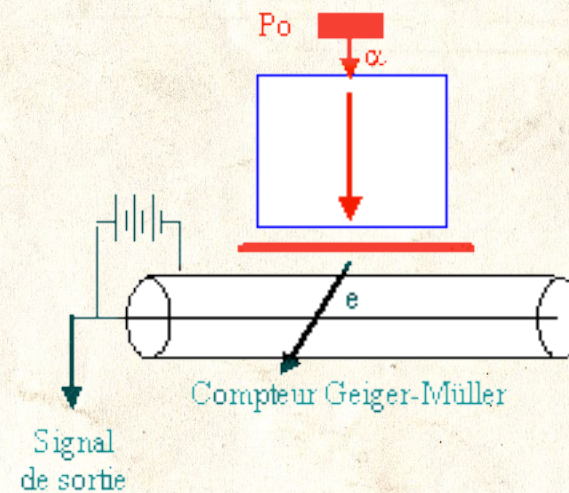
compteur Geiger-Müller

# LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL

○ 1° étape : seuil des neutrons



○ 2° étape : seuil des positrons



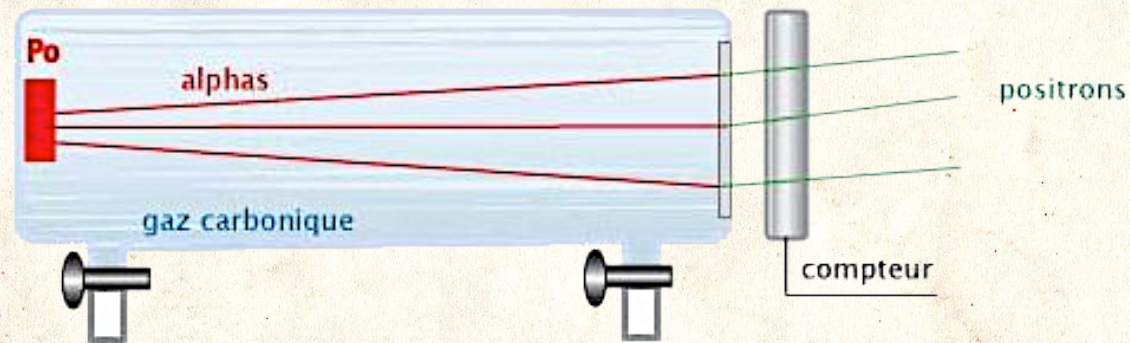
○ Décembre 1933 : mesure du seuil d'apparition des neutrons

○ Janvier 1934 : Joliot passe aux positrons

# UNE ANOMALIE

# JOLIOT DÉCOUVRE LA RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

- Jeudi 11 janvier 1934 : Joliot remplit la chambre de gaz carbonique puis commence à pomper le gaz
- Quand la pression tombe en-dessous du même seuil que pour les neutrons, le compteur commence à enregistrer le passage de positrons → **succès total** de l'hypothèse des Joliot-Curie  $p \rightarrow e^+ + n$



- Joliot réintroduit du gaz, la pression repasse au-dessus du seuil, et **le compteur continue à cliqueter**
- Joliot remarque cependant que le rythme des cliquetis **diminue** rapidement → décroissance radioactive ?

# QUE S'EST-IL PASSÉ ?

- Joliot simplifie le montage
  - irradiation directe de la feuille d'aluminium par le polonium posé dessus
  - puis mesure avec le compteur Geiger de la décroissance de la radioactivité résultante
- → le nombre de positrons diminue de moitié toutes les 3 mn (2mn30 en fait)
- → leur flux augmente avec la durée préalable d'irradiation, mais se stabilise au delà de 15 mn
- 1° hypothèse : un défaut du compteur Geiger
  - nouveauté au laboratoire
  - comportement parfois capricieux
  - → une sorte de rémanence du compteur ?
  - ⇒ vérifications avec Wolfgang Gentner (post-doc)
- 2° hypothèse : synthèse d'un nouveau corps radioactif
  - aluminium 27 = 13 p + 14 n
  - alpha = 2p + 2n
  - → [15p + 15n] + 1n émis
  - Z = 15 ⇒ phosphore, **mais**  $^{30}\text{P}$
  - phosphore naturel = phosphore 31
  - $^{30}\text{P} \rightarrow ^{30}\text{Si} + e^+ (+\nu)$
  - $^{30}\text{Si}$  stable (3% du Si naturel)

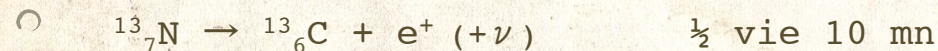
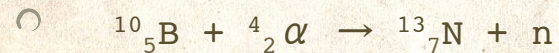


# ÉTUDE SYSTÉMATIQUE

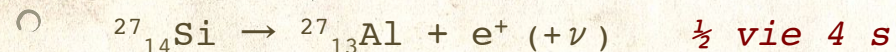
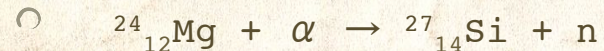
- Irène et Frédéric Joliot-Curie travaillent intensément les vendredi 12 et samedi 13 (l'Académie des Sciences tient séance le lundi)

1. Répétition de l'expérience avec l'aluminium

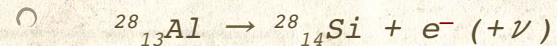
2. Irradiation du bore (Z=5)



3. Irradiation du magnésium (Z=12) → corps radioactif de  $\frac{1}{2}$  vie 2mn30



- *En fait non : magnésium naturel = 80%  $^{24}\text{Mg}$ , 10%  $^{25}\text{Mg}$  et 10%  $^{26}\text{Mg}$*




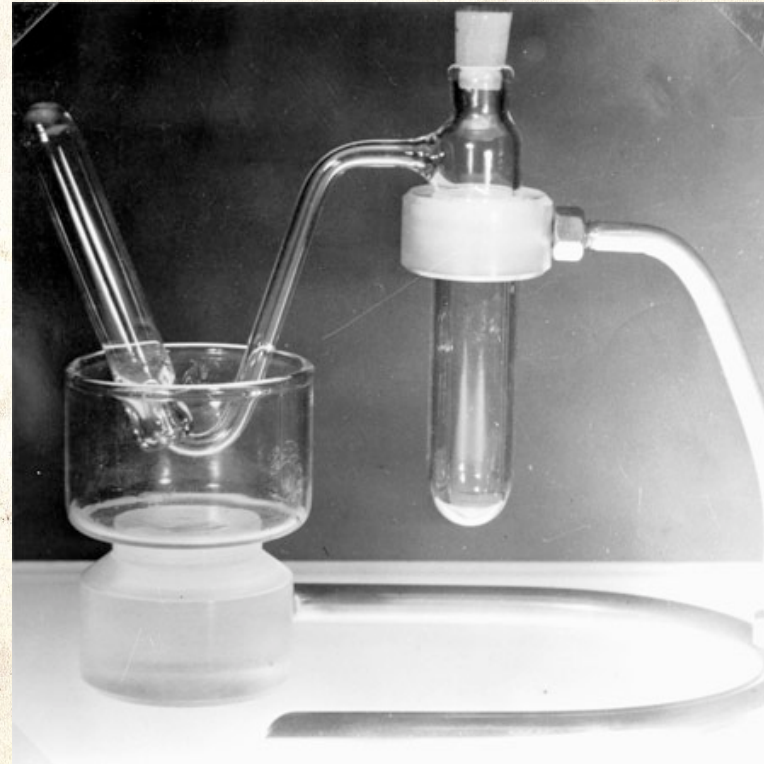
4. Mesure de la distribution en énergie des positrons (par interposition d'écrans) ⇒ distribution continue comme pour les  $\beta$

# RADIOPHOSPHORE

- Comment démontrer que c'est bien du phosphore qui s'est formé?
  - dissolution de la feuille d'aluminium par l'acide chlorhydrique
$$2 \text{ Al} + 6 \text{ HCl} \rightarrow 2 \text{ AlCl}_3 + 3 \text{ H}_2$$
  - l'hydrogène naissant entraîne le phosphore (hydrogène phosphoré  $\text{PH}_3$ )



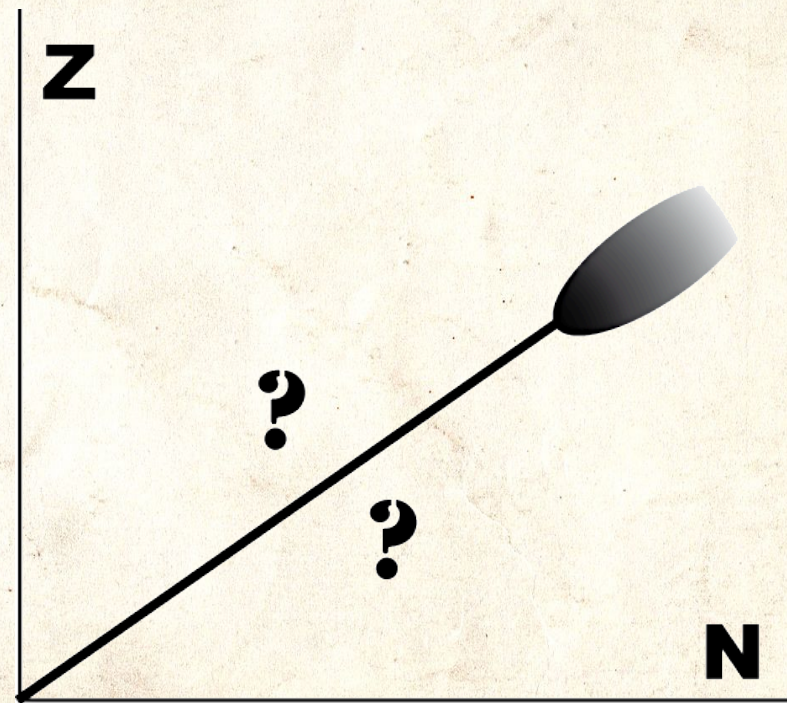
- mesure de la décroissance de la radioactivité du phosphore formé par l'irradiation
- Traitement chimique du bore irradié
  - → ammoniac  $\text{NH}_3$
  - donc on forme bien de l'azote
-  Publications (C.R.Acad.Sc.)
  - 15 janvier et 29 janvier 1934



# CONSÉQUENCES

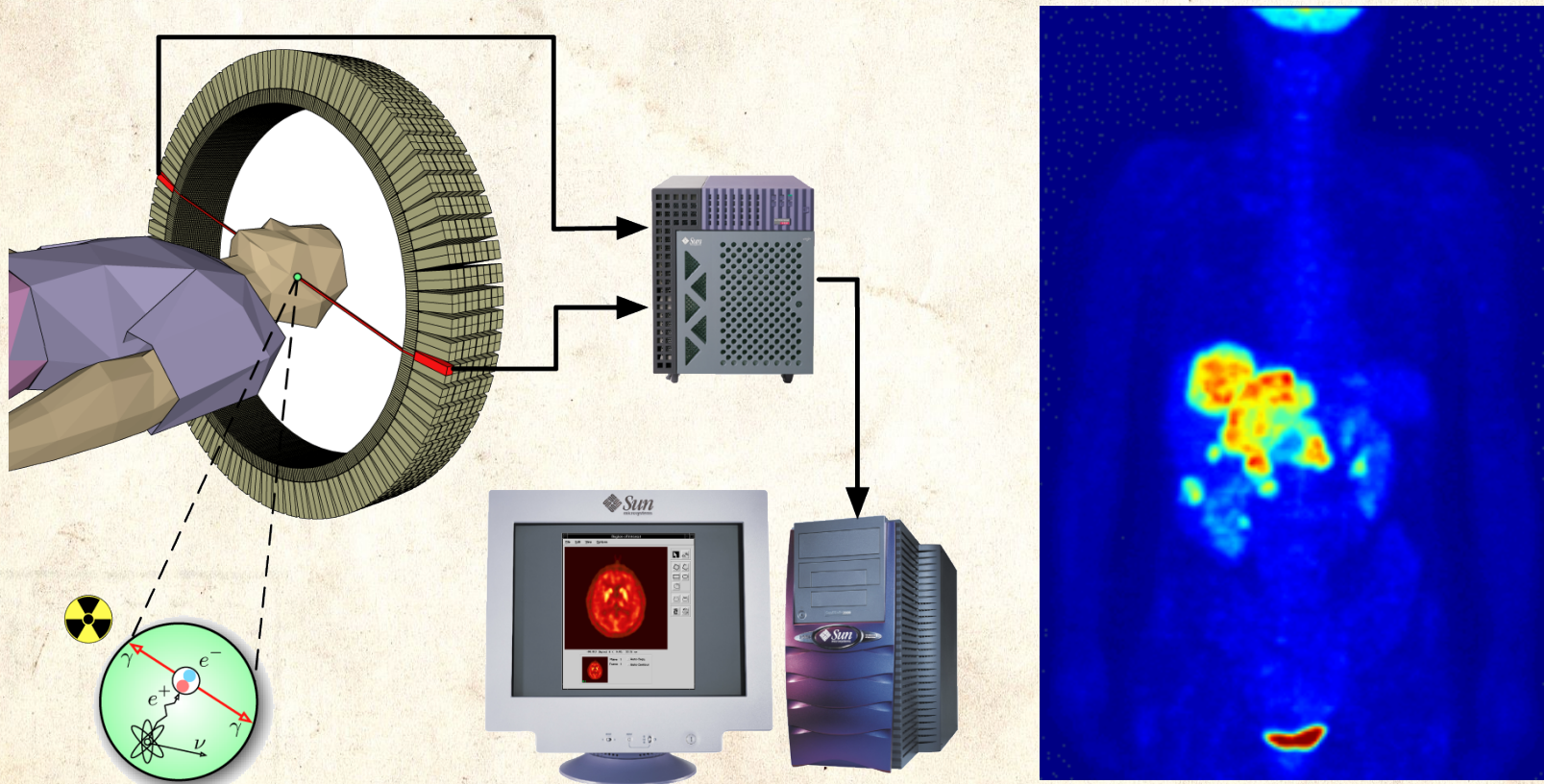
# CONSÉQUENCES

- Frédéric Joliot avait créé un noyau n'existant pas dans la nature
- Quels autres noyaux pourraient être créés?
- Lesquels seraient stables comme les
  - carbones 12 et 13
  - oxygènes 16, 17 et 18
  - magnésiums 24, 25 et 26
- Lesquels seraient instables ?
  - comme le phosphore 30 juste découvert
  - ou le carbone 14 alors inconnu
- → Applications à la biochimie
  - Traceurs
  - Imagerie « nucléaire »
  - Radiothérapie (cobalt 60...)



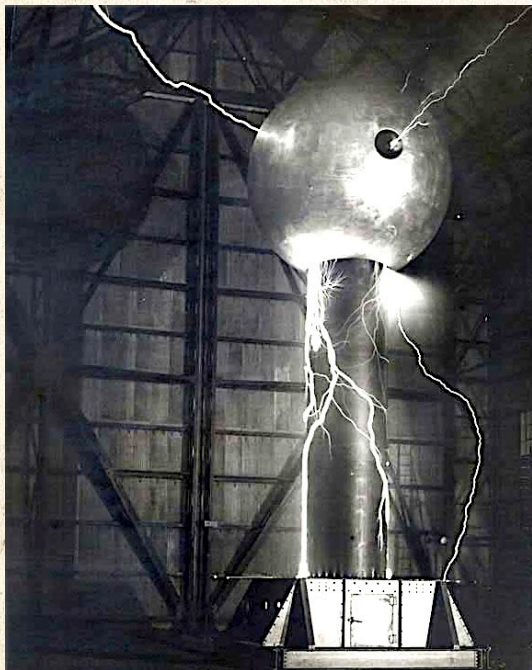
# EXEMPLE : TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITRONS

- synthèse de fluor 18 (transmutation  $\beta^+ \rightarrow$  oxygène 18 +  $e^+$  +  $\nu$ )
- insertion du fluor dans un pseudo-glucose
- repérage de sa concentration par l'annihilation  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$



# COMMENT FABRIQUER DE NOUVEAUX NOYAUX ?

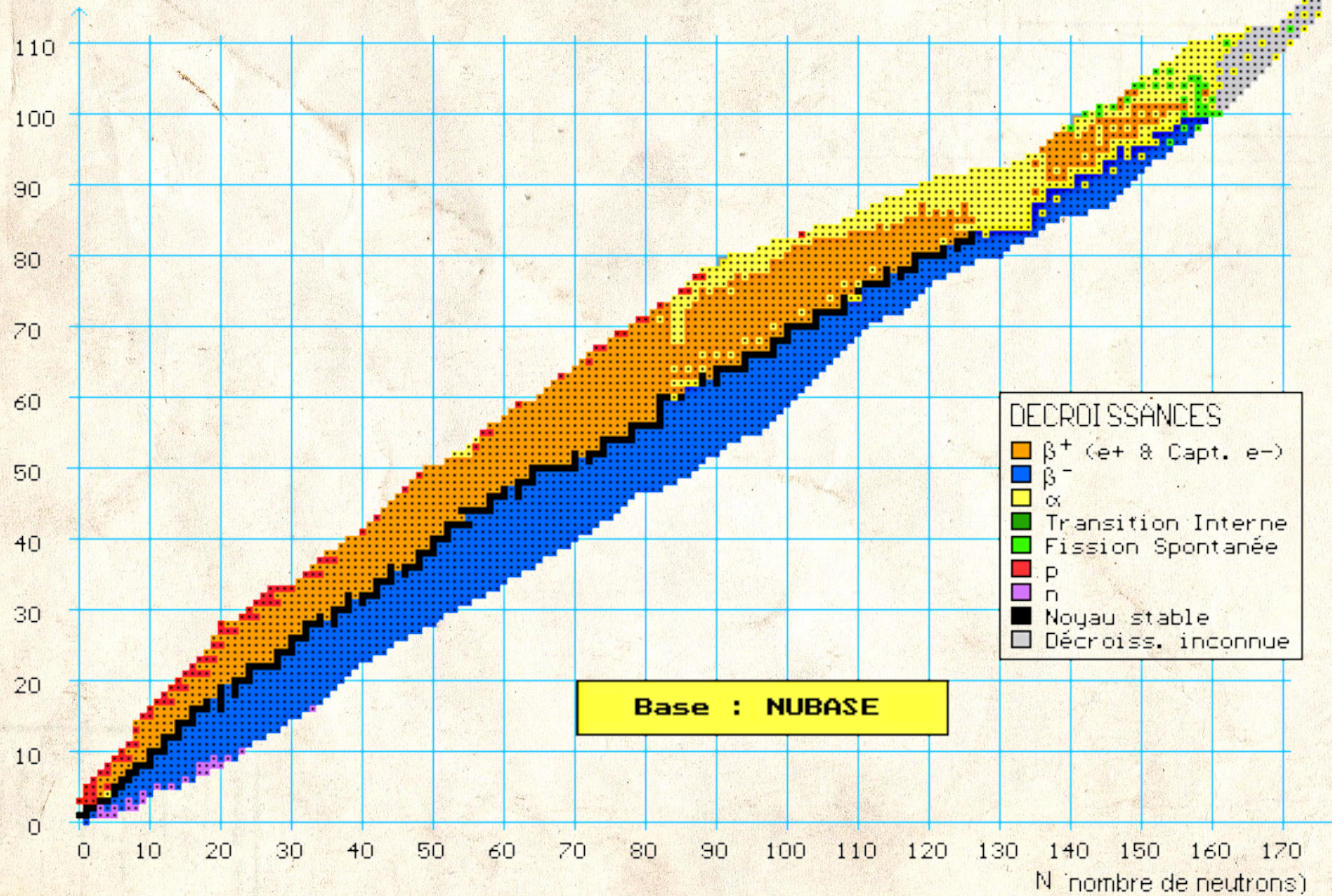
- Par bombardement !
- → rayons cosmiques
- → accélérateurs
  - Cockroft & Walton
  - Lawrence
  - Van de Graaf
- → limitation aux noyaux légers (répulsion coulombienne)
- → idée de Fermi d'utiliser des neutrons (pas de répulsion)
- ⇒ résultats
  - à priori un noyau pouvait être formé en associant un nombre *quelconque*  $Z$  de protons et un nombre *quelconque*  $N$  de neutrons
  - mais seules certaines combinaisons se révélèrent stables ⇔ relation entre  $Z$  et  $N$
  - « trop » de neutrons ⇒ transmutation  $\beta^-$
  - « trop » de protons ⇒ transmutation  $\beta^+$



# STABILITÉ ET INSTABILITÉ DES NOYAUX

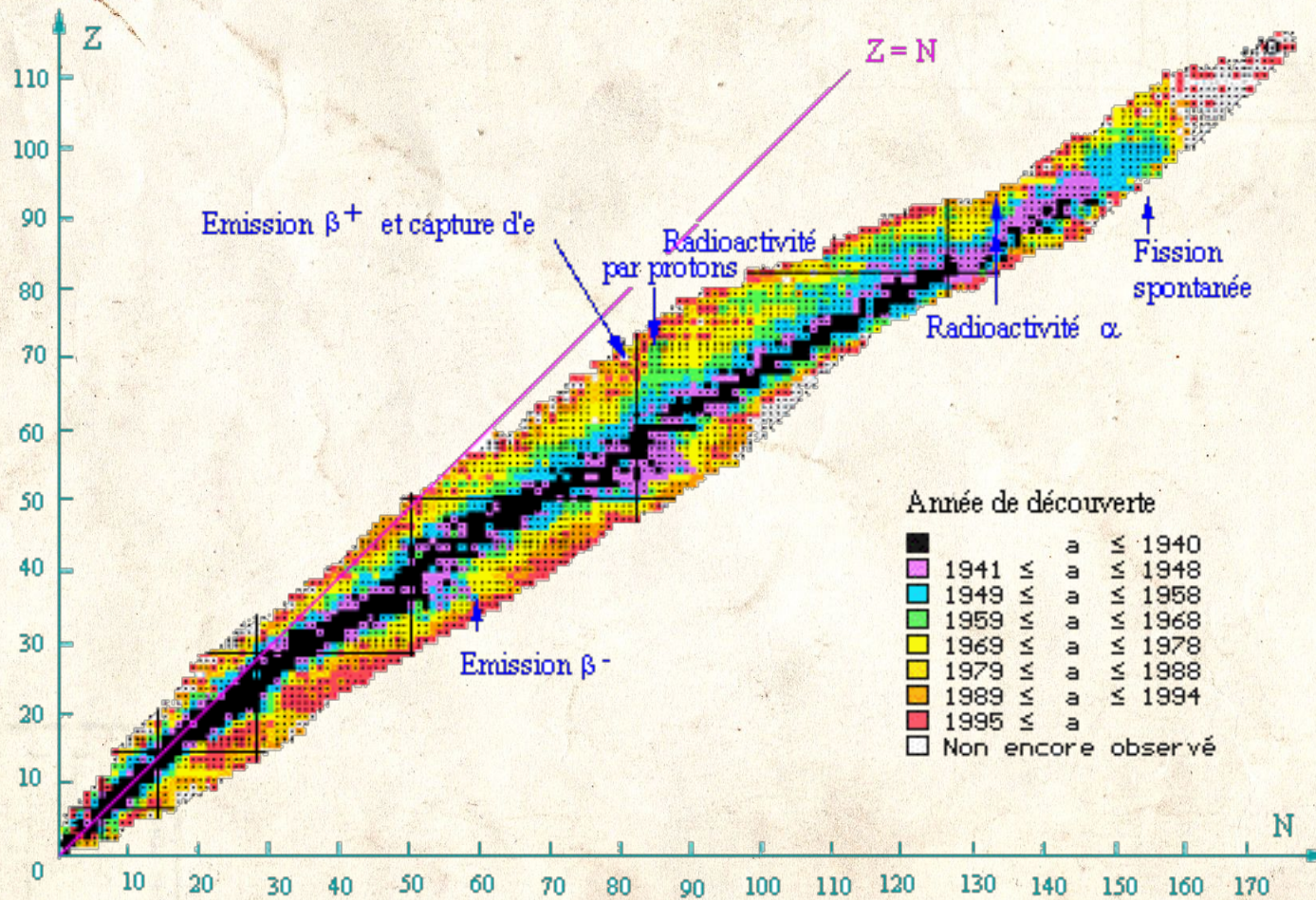
Z (nombre de protons)

Nombre de Nucléides Affichés : 3156



# NOYAUX AU FIL DU TEMPS

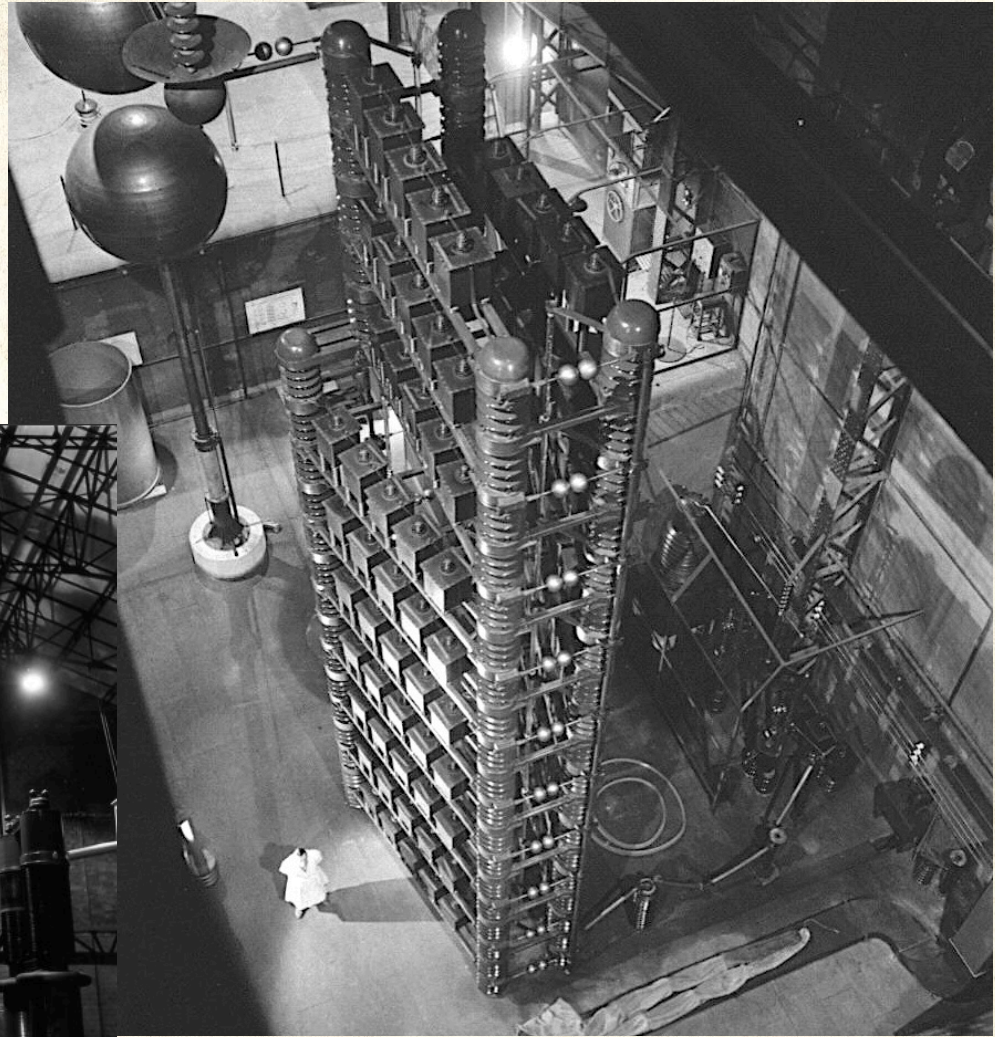
- Diagramme de Segrè en fonction de l'année de découverte





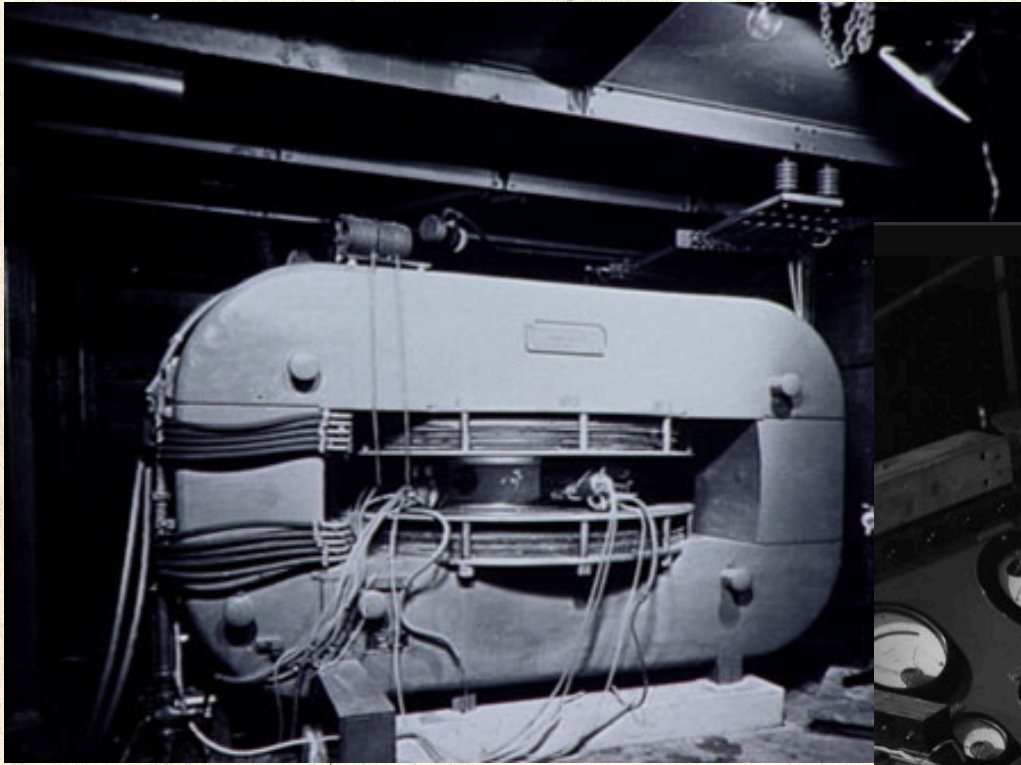
# LE LABORATOIRE DE SYNTHÈSE ATOMIQUE D'IVRY

○ (© Doisneau 1942)



# LE CYCLOTRON DU COLLÈGE DE FRANCE

○ (© R. Doisneau 1942)



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!