

PETITE HISTOIRE
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

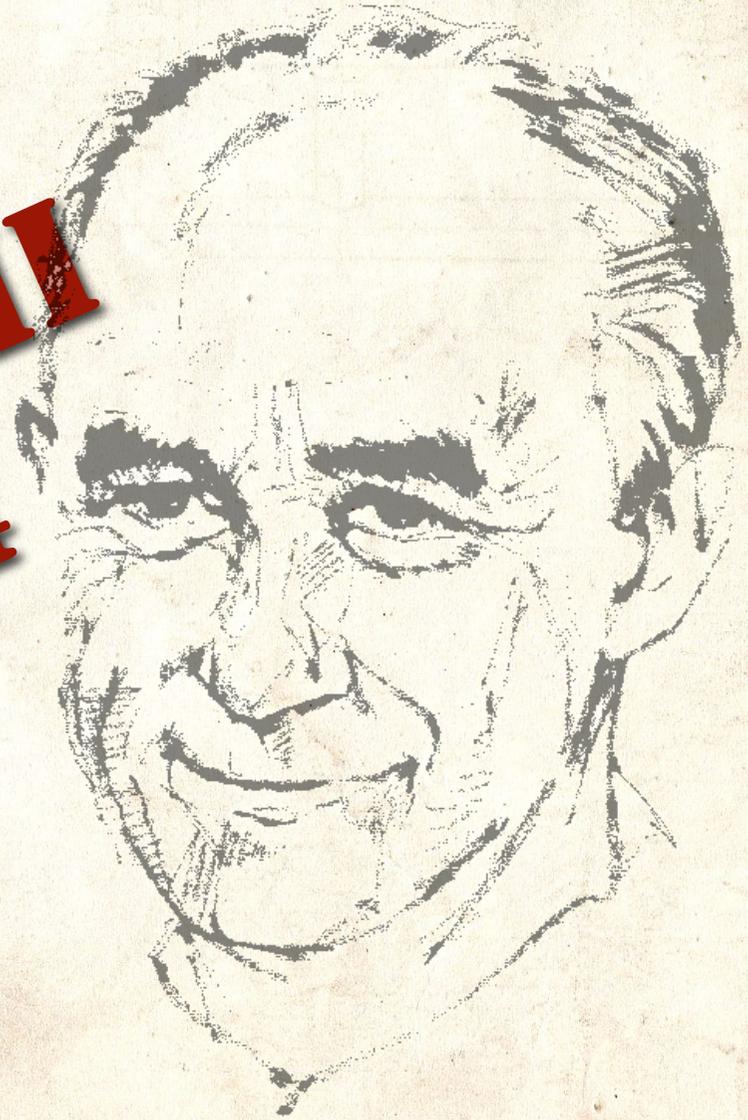
10 – ENRICO FERMI
L'INGÉNIEUR QUANTIQUE

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

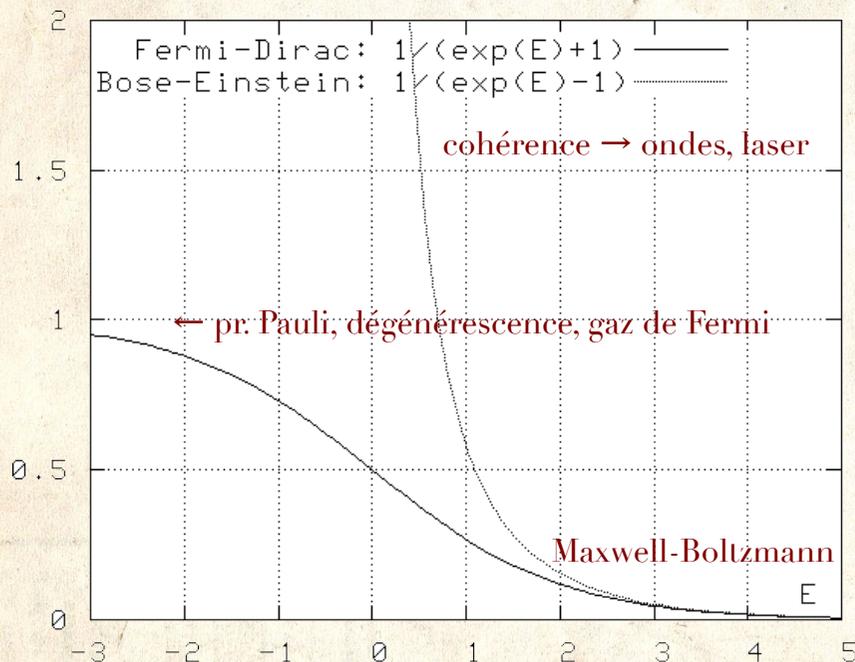
ENRICO FERMI
1901 - 1954



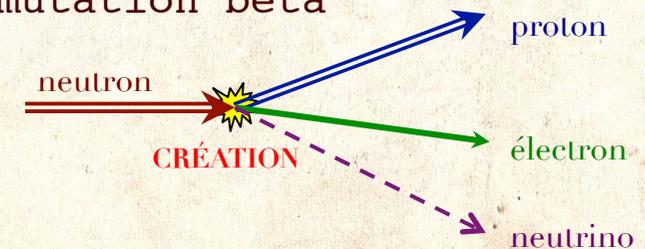
ENRICO FERMI, LE THÉORICIEN



- Jeune prodige
- 1925 : statistiques de Fermi-Dirac
 - $N(E) = 1/[\exp(E/T) + 1]$

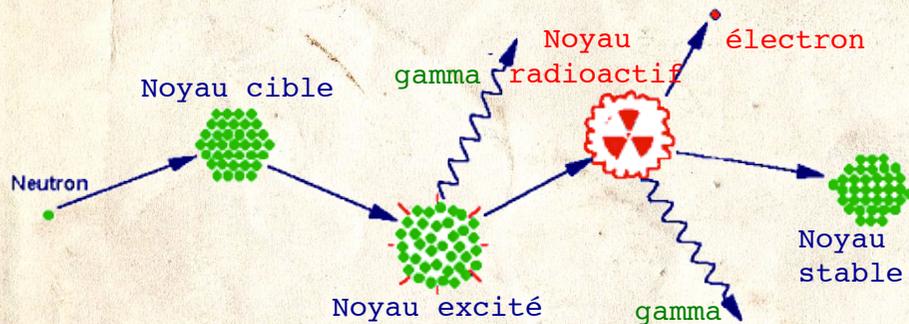


- 1926 : premier titulaire de la chaire de physique théorique de l'université de Rome
- ← « gaz de Fermi » décrivant les électrons dans un métal (par ex.)
- 1933 : théorie de la transmutation bêta



ENRICO FERMI, L'EXPÉRIMENTATEUR

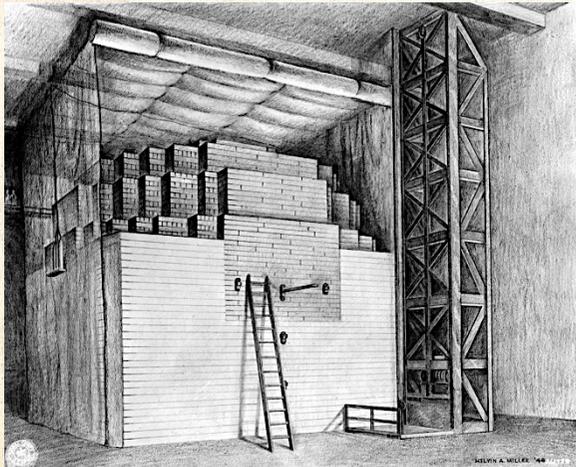
○ Activation neutronique



Ex: $\text{Co } 59 \rightarrow \text{Co } 60 \rightarrow \text{Ni } 60$

○ Réaction en chaîne

- Chicago Pile 1 (2 décembre 1942)



○ Le calculateur

- « méthode à la Fermi »

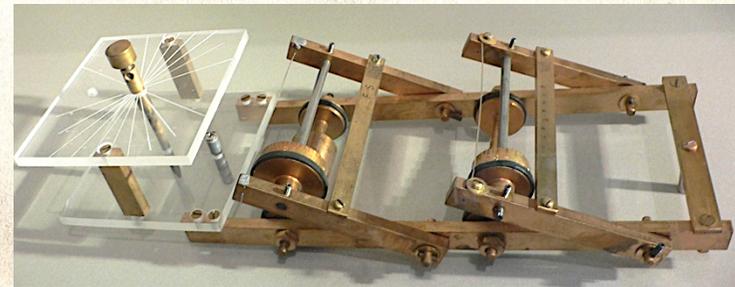
- Nombre d'accordeurs de piano à Chicago : 5 millions d'habitants → 50 000 pianos, chacun accordé tous les 2 ans [500 j] → 100 accordements par jour → ~ 50 accordeurs? Exact !

- Pionnier du calcul numérique

- Structure électronique

- Diffusion des neutrons

- « Fermiac »



L'INSTITUT DE PHYSIQUE DE ROME

- Orso Mario Corbino

- Professeur
- Sénateur
- PDG



- Théoriciens

- **Enrico Fermi**

- *le Pape*
- Ettore Majorana (1906-1938)
 - *le Grand Inquisiteur*
- Giancarlo Wick (1909-1992)
- Bruno Pontecorvo (1913-1993)

- Visiteurs de longue durée

- George Placzek (1905-1955)
- Hans Bethe (1906-2005)
- Edward Teller (1908-2003)

- La construction d'une **équipe**

- *I ragazzi della via Panisperna*

- **Franco Rasetti** (1901-2001)

- *le Cardinal-vicaire*

- Oscar d'Agostino (1901-1975)

- Emilio Segrè (1905-1989)

- *le Préfet de la Bibliothèque*

- Edoardo Amaldi (1908-1989)



Istituto di Fisica di via Panisperna a Roma

I RAGAZZI DELLA VIA PANISPERNA



D'Agostino Segrè Amaldi Rasetti Fermi

ACTIVATION NEUTRONIQUE

UNE IDÉE DE GÉNIE : BOMBARDER AVEC DES NEUTRONS

○ Avantages

- PAS de barrière coulombienne
- ⇒ nul besoin d'accélérateur (très) coûteux
- ⇒ tous les noyaux peuvent servir de cible, même les plus lourds
- ⇒ synthèse possible de la plupart (?) des isotopes

○ Inconvénients

- impossibilité de choisir l'énergie du neutron (de l'accélérer en particulier)
- impossibilité de diriger le neutron vers la cible
- production de neutrons par bombardement du béryllium par des α ⇒ flux faibles

○ Destin des neutrons

- la plupart n'interagissent pas avec une cible mince
- ceux qui interagissent rebondissent (collision élastique ou inélastique)
- **ou** arrachent des nucléons (spallation) ⇒ $A \downarrow$
- **ou** sont absorbés, au moins brièvement ⇒ $A \uparrow$

○ Programme

- bombarder systématiquement tous les éléments du tableau périodique, de l'hydrogène à l'uranium
- détecter la présence de corps radioactifs
- les identifier chimiquement

PREMIERS ESSAIS : FERMI DEVIENT EXPÉRIMENTATEUR

- Source de neutrons ?
 - $\text{Po}_{210} \rightarrow \alpha \quad \alpha + \text{Be} \rightarrow n$
 - Intensité du polonium trop faible (qq mCi)
- Fermi réalise soudain qu'il peut utiliser une source α plus intense puisqu'il mesure la radioactivité induite **après** l'irradiation
- → Fermi emprunte une source de radon de 50 mCi
- → et place son compteur Geiger à l'autre bout du bâtiment
- Février 1934 : Fermi est prêt
- Bombardement de l'eau ($Z=1 + Z=8$)
 - aucun résultat !
- Bombardement du lithium ($Z=3$), du béryllium ($Z=4$), du bore ($Z=5$), du carbone ($Z=6$), de l'azote ($Z=7$)
 - **aucun résultat !**
 - **C'est normal :**
 1. la plupart des isotopes légers **ne sont pas radioactifs** (^2H , ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O)
 2. les rares isotopes radioactifs ont des durées de vie **trop longues** (12 ans pour ^3H , 1,5 Ma pour ^{10}Be , 5730 ans pour ^{14}C) ou **trop courtes** (0,8s pour ^8Li) pour que Fermi les détecte

Radioattività indotta da bombardamento di neutroni - I

○ Pas de découragement : Joliot avait montré l'existence d'isotopes radioactifs de l'azote (^{13}N), du phosphore (^{30}P) et de l'aluminium (^{28}Al).

○ Premiers succès

○ Fluor ($Z=9$) $^{19}\text{F} \rightarrow ^{20}\text{F} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$

○ Aluminium ($Z=13$) $^{27}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Al} \rightarrow ^{28}\text{Si}$

○ \Rightarrow 1^o article le 25 mars dans *La Ricerca Scientifica*

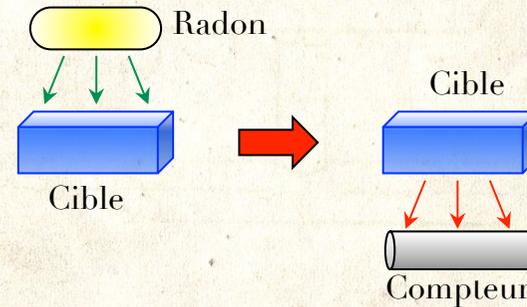
○ Élargissement du groupe

○ Rasetti, de retour de vacances, comme assistant

○ Segrè aux sources et aux cibles

○ Amaldi aux détecteurs

○ D'Agostino (revenu de l'*Institut du Radium* de Paris) à l'analyse chimique



○ Notes quasi-hebdomadaires sur les progrès accomplis

○ 23 avril : félicitations de Rutherford à Fermi pour son «évasion réussie de la sphère théorique»

○ Avril et mai : parcours du tableau périodique

○ \sim 60 éléments irradiés

○ \rightarrow \sim 40 nouveaux radioisotopes

RÉGULARITÉS EMPIRIQUES

○ **Élément léger** ($Z \leq 30$)

○ → émission d'un e^+ ,
d'un proton ou d'un α

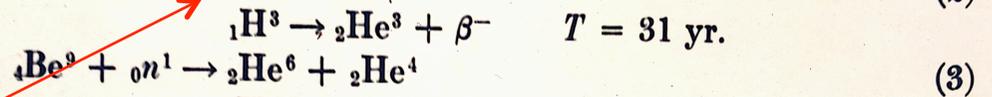
⇒ $Z \rightarrow Z-1$ ou $Z-2$

○ **Élément lourd** ($Z \geq 30$)

○ → isotope un peu plus
lourd du même élément
et/ou émission d'un e^-

⇒ $Z \rightarrow Z$ ou $Z+1$

○ Mais les exceptions
n'étaient pas rares...



$${}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^3 + \beta^- \quad T = 31 \text{ yr.}$$

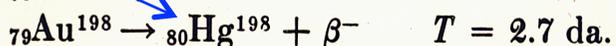
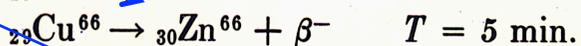
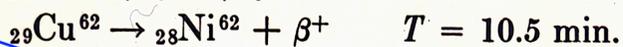
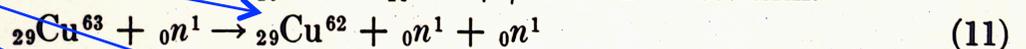
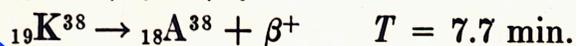
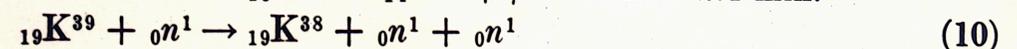
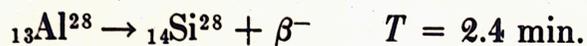
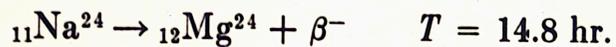
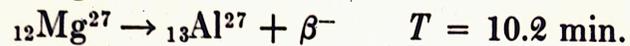
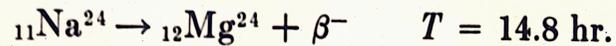
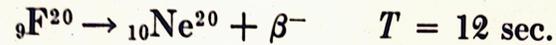
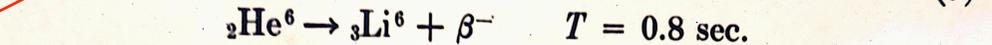
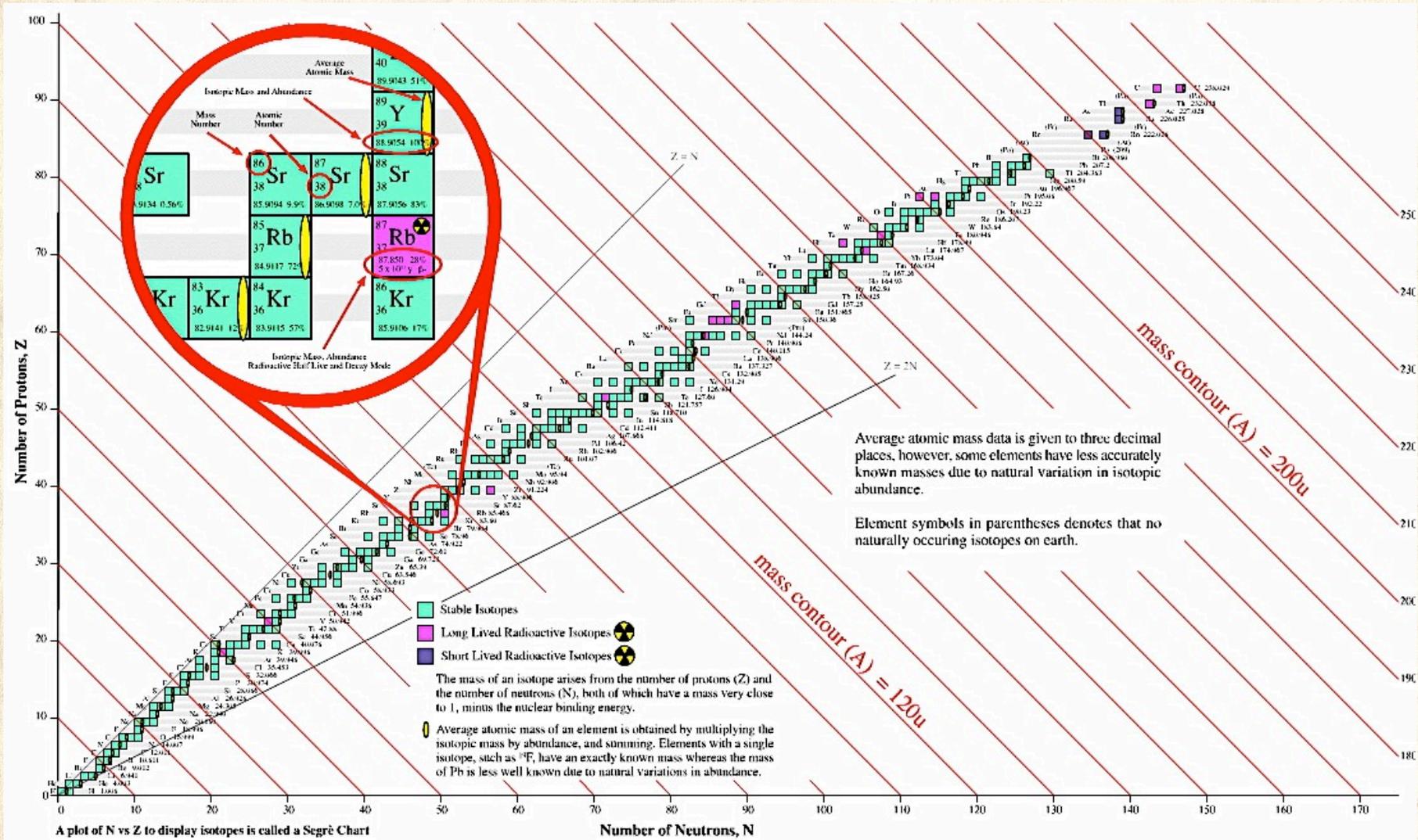


DIAGRAMME DE SEGRÈ



TRANSURANIENS?

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

AU BOUT DU TABLEAU PÉRIODIQUE

- Mai 1934 : les *ragazzi* arrivent au thorium (Z=90) et à l'uranium (Z=92)
- Expérience \rightarrow bombardement de neutrons \rightarrow isotopes plus lourds \rightarrow éléments Z+1 par transmutation β
- \Rightarrow on pouvait donc s'attendre à la synthèse de transuraniens
 - éka-rhénium (Z=93)
 - éka-osmium (Z=94)
 - éka-iridium (Z=95)
 - éka-platine (Z=96)
- *En fait les éléments suivant le radium (actinium etc.) ont à peu près les mêmes propriétés chimiques et elles n'ont rien à voir avec celles du rhénium (et des éléments suivants)*

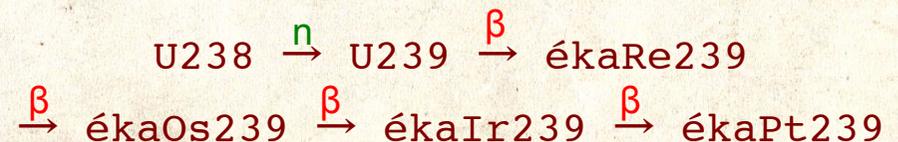
○ Difficultés

- l'uranium est lui-même déjà radioactif \Rightarrow purification de l'uranium pour éliminer toute sa chaîne
- puis irradiation et analyse très rapides

○ Résultats pour l'uranium

- **4 radioéléments**, de $\frac{1}{2}$ vie
- 10 s
- 40 s
- 13 mn
- 90 mn

- Fermi et son groupe pensèrent avoir réalisé la succession :



- *Mais qui était qui ?*

LITTORIUM, AUSONIUM, HESPÉRIUM?

- Contrôle : D'Agostino vérifia que les radioéléments «13mn» et «90mn» n'étaient pas
 - du plomb (Z=82),
 - du bismuth (Z=83),
 - du polonium (Z=84),
 - du radon (Z=86),
 - du radium (Z=88),
 - de l'actinium (Z=89),
 - du thorium (Z=90)
 - ou du protactinium (Z=91)
 - les éléments Z=85 et Z=87 étaient inconnus mais leurs propriétés chimiques attendues (halogène et alcalin) étaient très différentes
- Dans toutes les irradiations antérieures, le radioélément se trouvait à 1 ou au plus 2 cases de l'élément-cible
- ⇒ 10 mai 1934 : «*Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92*», Nature 133, 898
- Identification proposée
 - «13mn» ⇔ ékaRe Z=93
 - «30mn» ⇔ ékaOs Z=94
- Corbino
 - ékaRe → ausonium (Ao)
 - ékaOs → hespérium (Es)
- Gouvernement → littorium !
 - Subtile diplomatie: était-il bien judicieux d'associer le régime fasciste à un élément dont la durée de vie se comptait en minutes ?



IDA NODDACK



- Ida Noddack nota pendant l'été 1934 que les Italiens n'avaient pas examiné la possibilité d'un élément *plus léger* que le plomb [«Über das Element 93» *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 47-653]

1. les Joliot-Curie comme l'équipe de Fermi avaient découvert des dizaines de radioéléments légers
2. → rien ne démontrait que les ausonium et hespérium n'étaient pas l'un de ceux-ci, ou un élément voisin

- Ida & Walter Noddack avaient découvert le rhénium en 1925
- *mais aussi le «masurium» (Z=43)* [~~polinium, ilmenium, pelopium, davyium, nipponium, masurium~~  technétium]

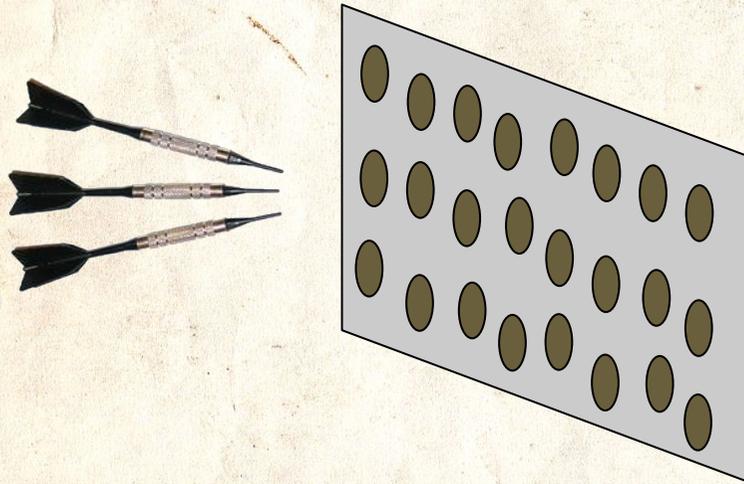
«[Il est] concevable que le noyau d'uranium soit brisé en plusieurs gros fragments, qui seraient évidemment des isotopes d'éléments connus mais ne seraient pas des voisins [du noyau initial]»

- Remarque prémonitoire ?
- Personne ne fut convaincu : ni Fermi, ni Hahn, ni elle-même(?)
 1. toutes les réactions nucléaires connues faisaient varier Z d'au plus 1 ou 2 unités
 2. la théorie de l'émission α (par effet tunnel) conduit à une *probabilité quasi-nulle* pour l'émission par un noyau de quelque chose de plus gros qu'un α

NEUTRONS LENTS

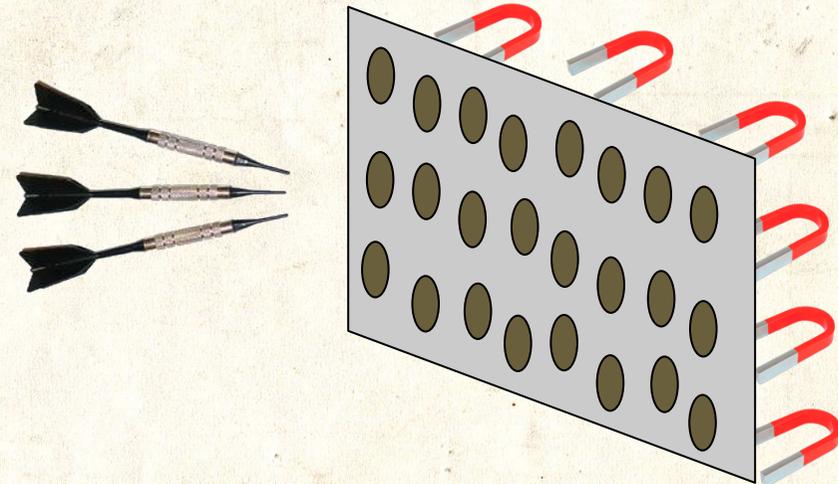
SECTION EFFICACE

○ Bombarder des cibles



- Surface d'une cible : **s**
- Nombre de cibles : **N**
- Surface du mur : **S**
- \Rightarrow probabilité d'impact
$$P = Ns/S = ns$$
- Avec $n =$ **densité** de cibles

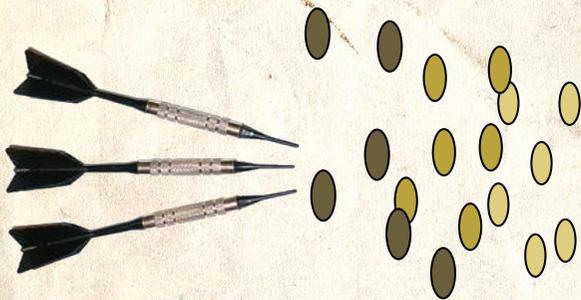
○ Généralisons



- Les aimants attirent les fléchettes
- Tout se passe comme si la surface **s** des cibles était plus grande
$$P = n\sigma$$
- **σ : section efficace**
- section efficace d'absorption
- section efficace de répulsion
- section efficace de diffusion

SECTION EFFICACE ET LIBRE PARCOURS MOYEN

○ En 3 dimensions



- densité n de cibles (par unité de volume)
- section efficace σ (d'absorption, de diffusion...)
- \Rightarrow probabilité d'absorption (de diffusion...) par unité de longueur

$$P = n \sigma$$

○ Section efficace totale

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{absorption}} + \sigma_{\text{diffusion}} + \sigma_{\text{xyz}} + \dots$$

○ Libre parcours moyen

$$l = 1/n\sigma$$

- (distance moyenne parcourue avant une absorption, ou une diffusion, ou...)
- \Rightarrow le **flux** Φ de projectiles (fléchettes, neutrons...) est réduit sur une profondeur d ($d \ll l$) d'un facteur

$$\Delta\Phi/\Phi = d/l$$

- $\Rightarrow \Phi(x) = \Phi(0) \exp\{-x/l\}$

○ Ordres de grandeur

- diamètre noyau 10^{-14} m
- $\rightarrow \sigma \sim 10^{-28} \text{ m}^2 = 1 \text{ barn}$
- diamètre atome 10^{-10} m
- $\rightarrow n \sim 10^{30} \text{ m}^{-3}$
- $\Rightarrow l \sim 10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$

UN SOUCI EXPÉRIMENTAL

- L'équipe de Fermi avait remarqué que les neutrons interagissaient différemment selon les noyaux-cibles
 - → activité forte: B, Cd, Ag...
 - → activité faible: C, O, Si...
- → idée d'un étalon de mesure
- → choix de l'argent car $\frac{1}{2}$ vie pratique de 2,37 mn
 - $^{107}\text{Ag} + n \rightarrow ^{108}\text{Ag} \rightarrow ^{108}\text{Cd}$ stable
- → protocole de mesure (Amaldi et Pontecorvo)
 - source de neutrons stable
 - irradiation d'une masse fixe d'argent
 - irradiation d'une masse fixe d'un autre élément
 - comparaison des activités
- Difficulté : l'activité de l'argent *différait* d'un endroit à l'autre du laboratoire
- ⇒ recherche de l'élément perturbateur
 - opérateur ?
 - source d'irradiation ?
 - lieu d'irradiation ?
 - lieu de mesure ?
 - instrument de mesure ?
- Influence du lieu d'irradiation?
 - ⇒ blindage en plomb (châtelet)
 - → diminution plus lente de l'irradiation avec la distance
 - → influence des réflexions de neutrons ?
 - table en **bois** ⇒ intensité ↑↑
 - table en **marbre** ⇒ intensité ↓↓

22 OCTOBRE 1934 : UN ÉCLAIR DE GÉNIE

- Fermi allait introduire un écran de **plomb** dans le châtelet, quand il décida soudain de placer un écran de **paraffine**
- ⇒ **l'activité augmenta de 50%**
- Aucun autre élément ne se montra aussi efficace



- Pendant la sieste, Fermi attribua cet effet à un **ralentissement** des neutrons par les protons de la paraffine ($C_{25}H_{52}$)
- [protons et neutrons ont presque la même masse → transfert d'énergie efficace]
- ☞ les neutrons lents sont bien plus efficaces que les neutrons rapides
- *Totalement inattendu* : protons et α sont d'autant plus efficaces qu'ils vont vite
- Expérience répétée avec succès l'après-midi dans l'eau du bassin de l'Institut

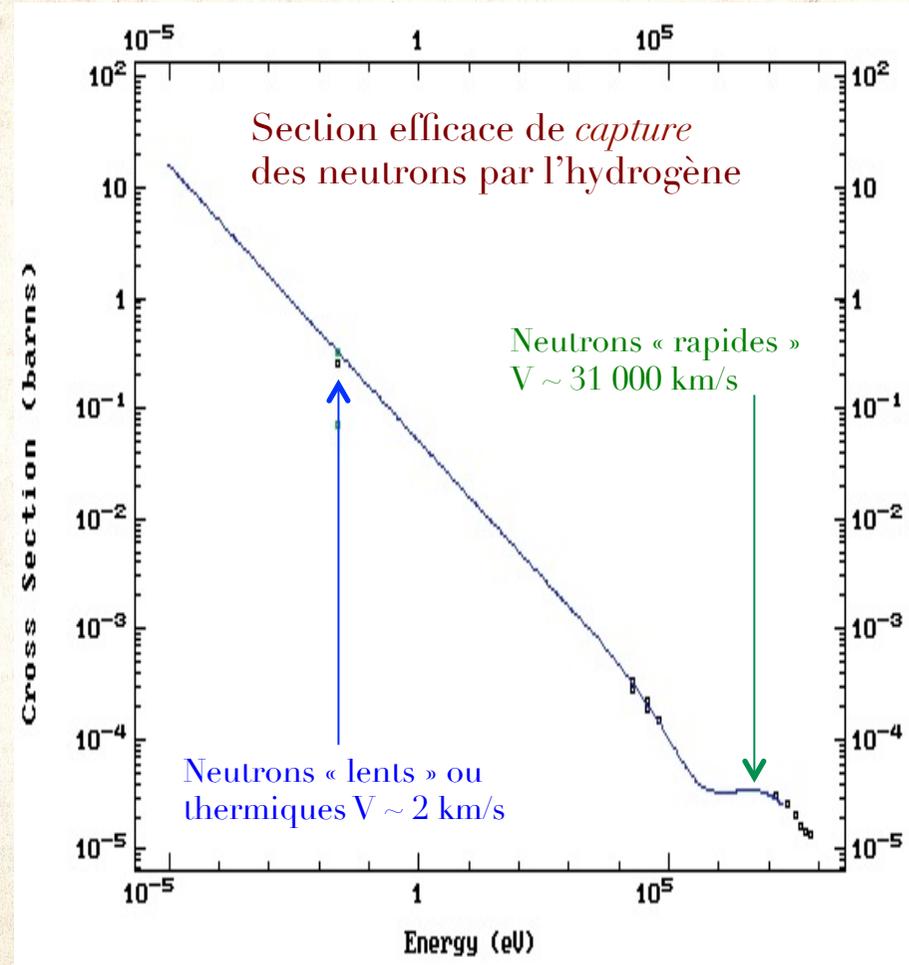
NEUTRONS LENTS ET SECTIONS EFFICACES

- Rédaction le soir même d'une note *Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da neutroni*
- Fermi comprit intuitivement que les neutrons lents étaient plus efficaces car ils passaient plus de temps près du noyau cible
- Autre façon de voir: un neutron « lent » est « plus gros » qu'un neutron rapide
- Longueur d'onde de de Broglie

$$\lambda = h/p = h/\sqrt{(2mE)} = 3 \times 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{E}$$

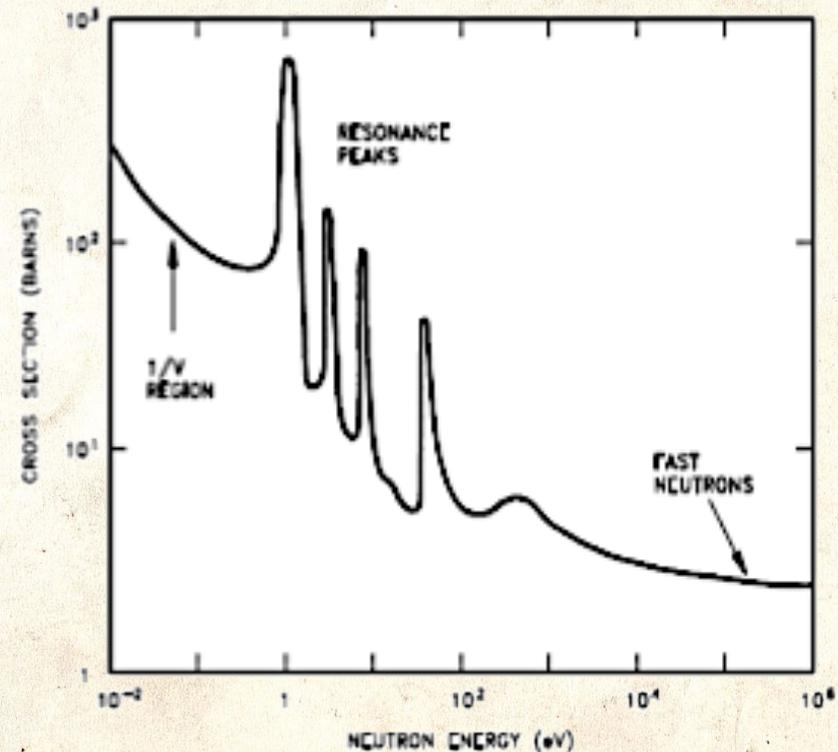
en MeV ↗

- $\Rightarrow \sigma \propto 1/\text{Vitesse}$



L'IMPORTANCE DES NEUTRONS LENTS

- Fermi perçut immédiatement l'importance du phénomène
 - **théorique**: l'interaction des nucléons était *bien plus complexe* qu'on le supposait
 - **pratique**: en ralentissant les neutrons, l'efficacité de l'irradiation augmentait d'un facteur 10, 100, 1000 ...
- \Rightarrow **résonances**
- \Rightarrow 1935-1937 : étude systématique par Fermi et Amaldi des absorptions et diffusions des neutrons
- \Rightarrow brevet déposé le 26 octobre en Italie et d'autres pays, dont les Etats-Unis
- Le ralentissement des neutrons est **essentiel** au fonctionnement des réacteurs nucléaires
- \Rightarrow longue bataille juridique avec l'Atomic Energy Commission jusqu'en 1953



LA FIN DE L'AVENTURE ITALIENNE

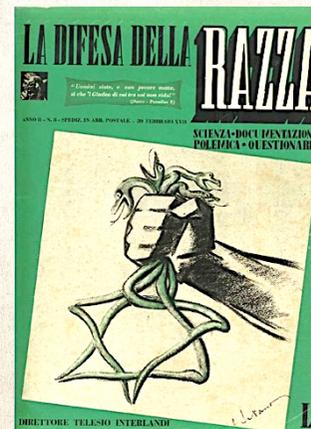
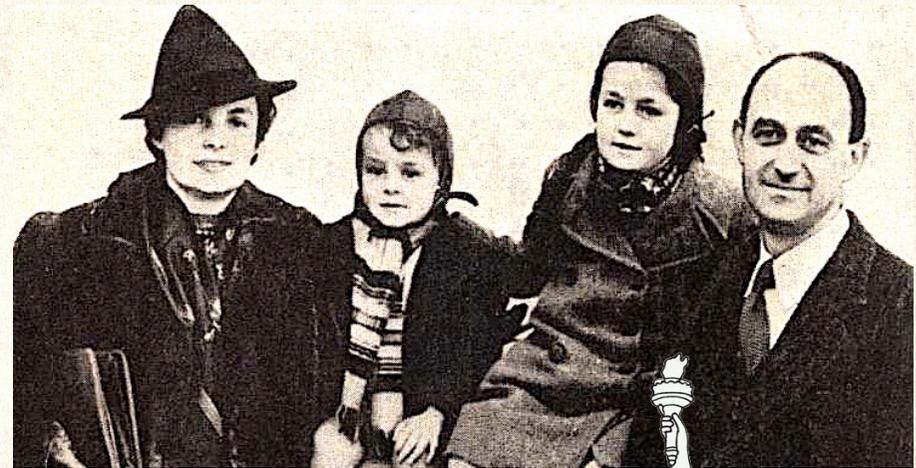
○ Dispersion de l'équipe

- Rasetti à New York (1935)
puis au Canada (1939)
- Pontecorvo à l'Institut du Radium de Paris (1936)
- Segrè à l'université de Palerme (1936)
- D'Agostino à l'Institut de Chimie de Rome
- Disparition en mer de Majorana (1938)
- Amaldi à Columbia et Washington (1939)

○ Lois italiennes antijuives

- → départs définitifs de Segrè, Pontecorvo, et Rasetti
- Bohr prévint Fermi qu'il aurait le prix Nobel – et un poste n'importe où !

- Décembre 1938 : départ en famille pour Stockholm puis New-York (Columbia)



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!