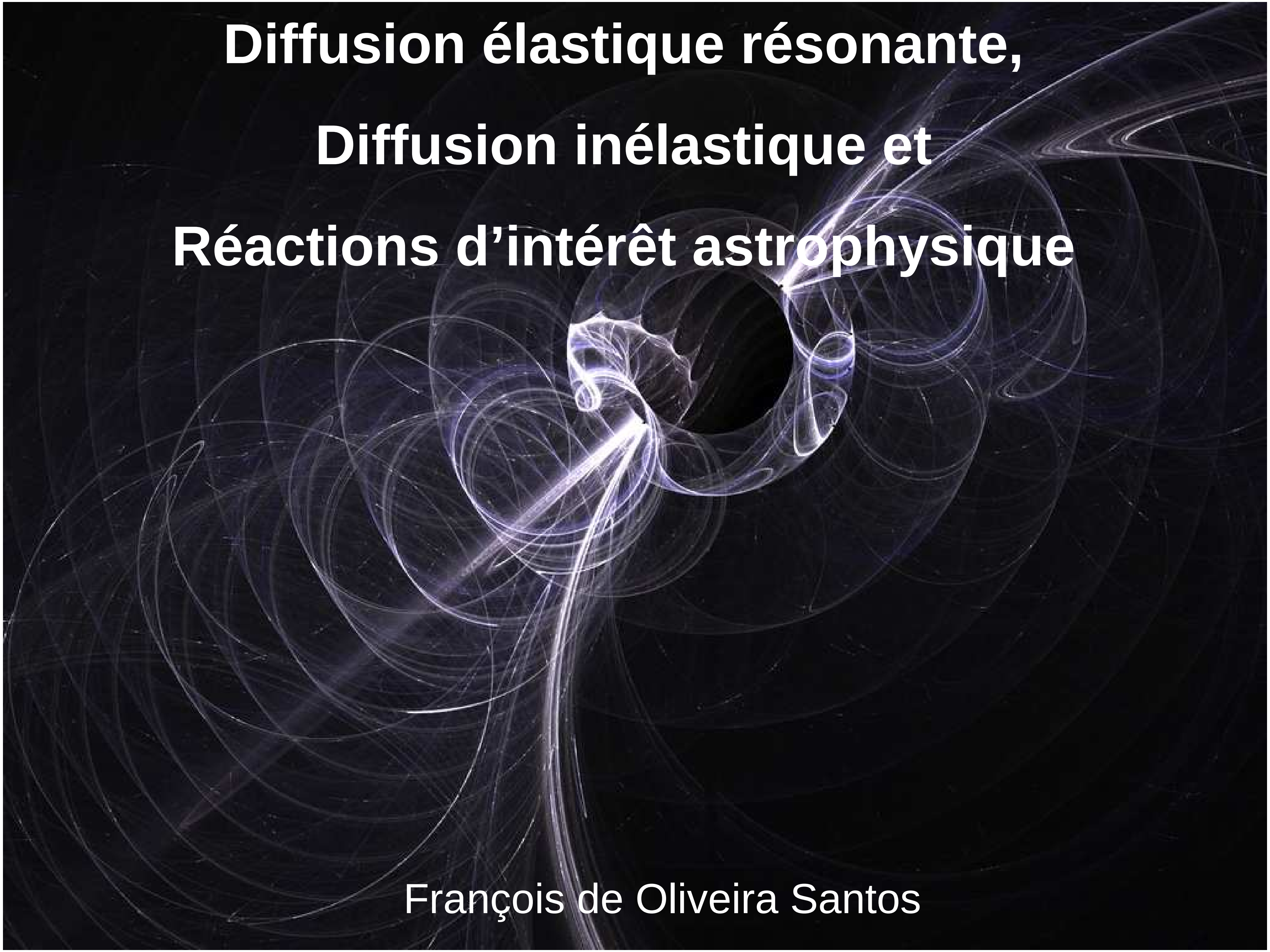


Diffusion élastique résonante,
Diffusion inélastique et
Réactions d’intérêt astrophysique

François de Oliveira Santos

Thème de ce cours

Réactions Nucléaires ⟷ **Structure Nucléaire**

Et aux basses énergies ?

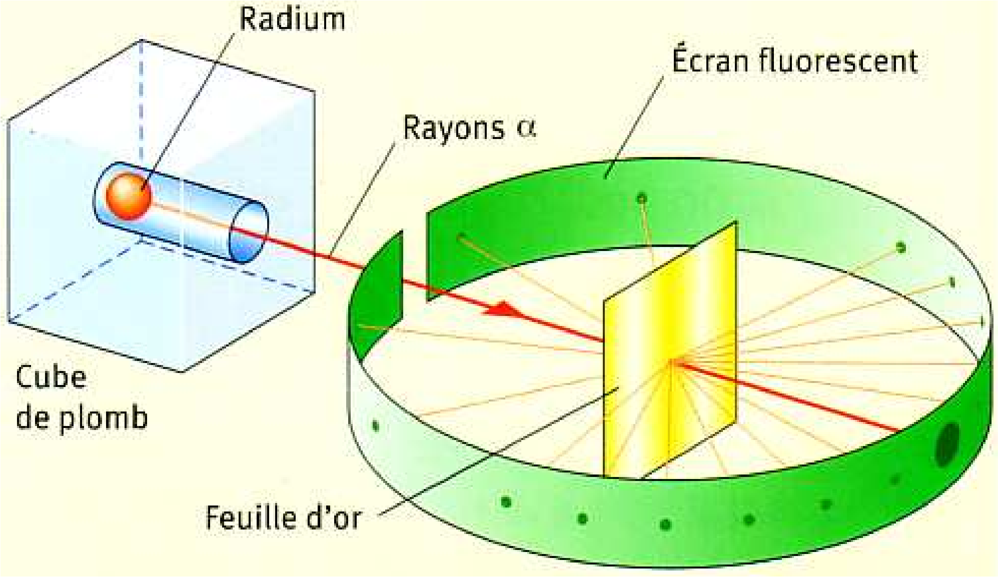
(E $\leq$ 5 A.MeV)

???

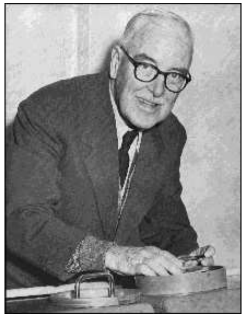
- Diffusion élastique (résonante) — **$^{14}N(p,p)^{14}N$**
- Réactions astro (capture radiative…) — **$^{14}N(p,\gamma)^{15}O$**
- Diffusion inélastique — **$^{14}N(p,p')^{14}N^*$**

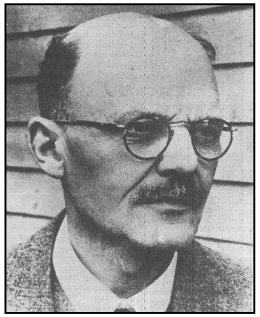
Diffusion élastique résonante 1/23

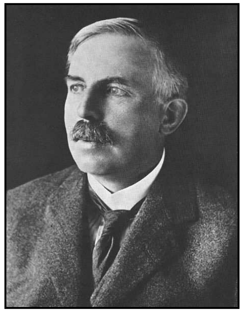
Première « interaction nucléaire» provoquée

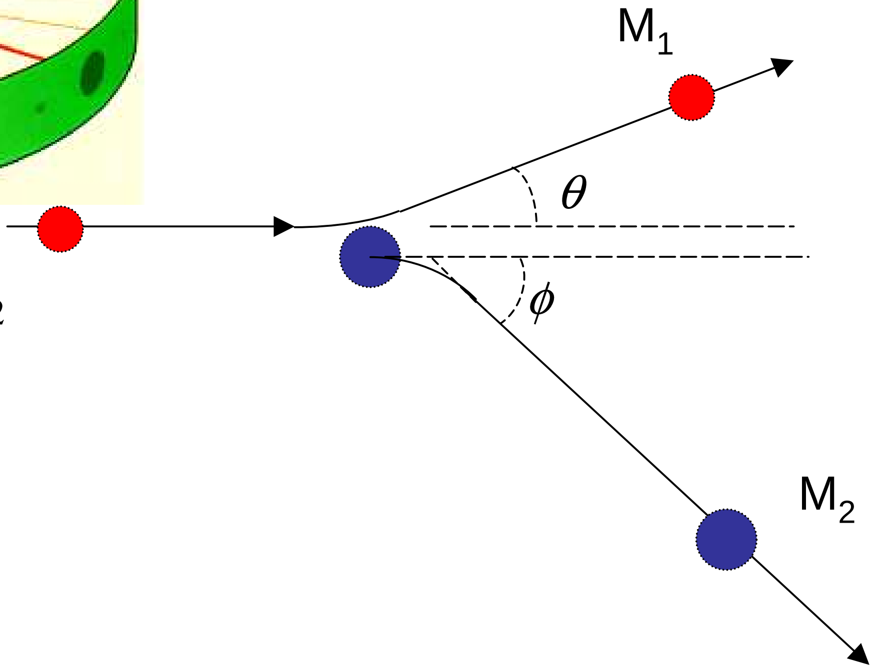


H Geiger, E Marsden - Proceedings of the Royal Society of London. (1909)


Marsden

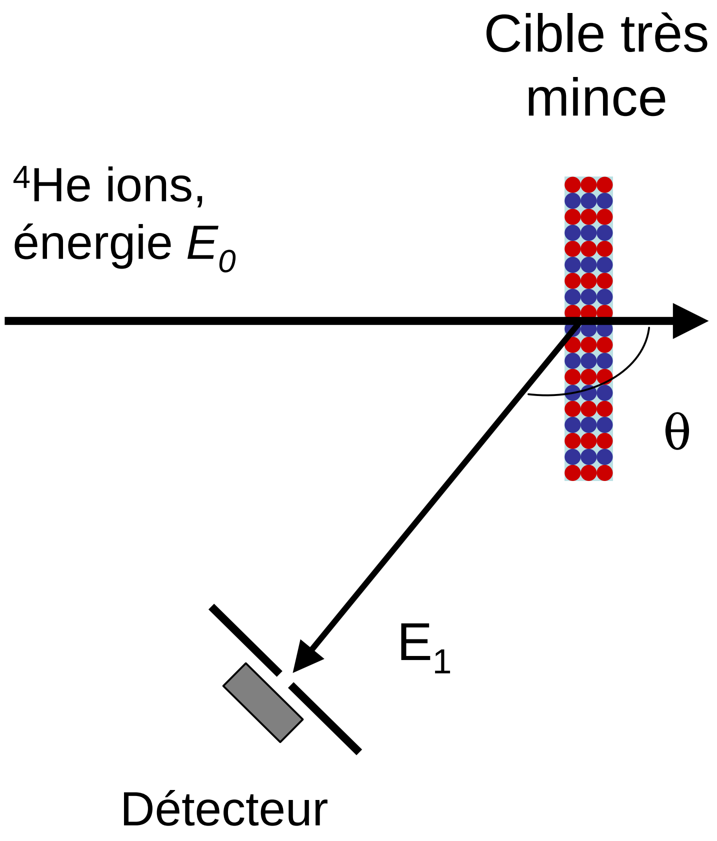

Geiger


Rutherford



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}_{\text{Rutherford}} = \left[\frac{z_1 z_2 e^2}{4E\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]^2$$

Diffusion élastique résonante 2/23

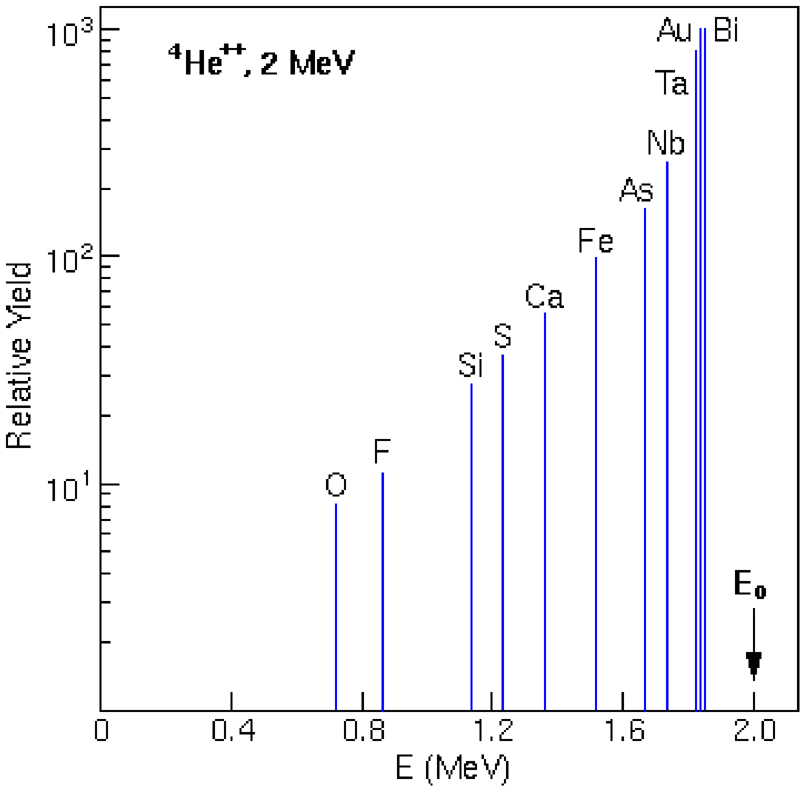


Cible très mince

^{4}He ions,
énergie E_0

Détecteur

$$\frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{\left\{1-\left(\frac{M_1}{M_2}\sin\theta\right)^2\right\}^{1/2} + \frac{M_1}{M_2}\cos\theta}{1+\frac{M_1}{M_2}}\right]^2$$



Diffusion élastique résonante 3/23

La méthode Rutherford Back Scattering (RBS) ... (ERDA)...

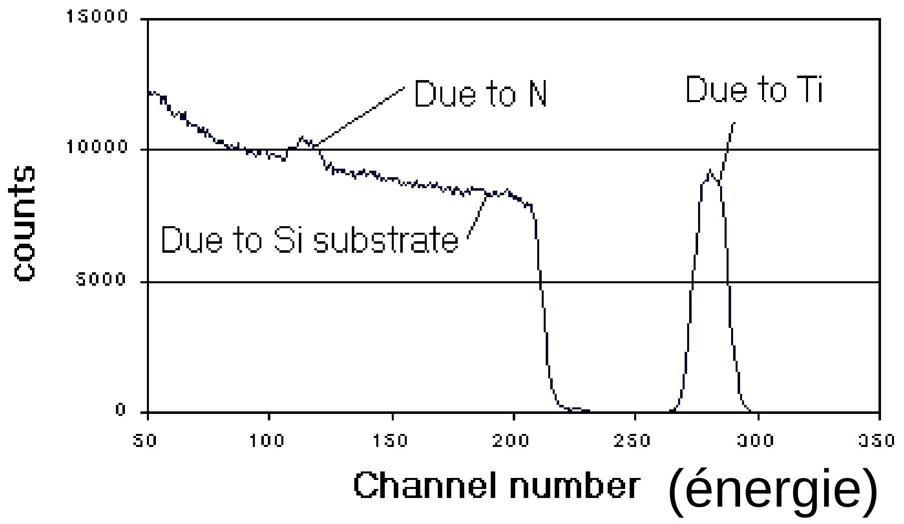
Pour l'analyse des matériaux

Mesurer la composition et le profil

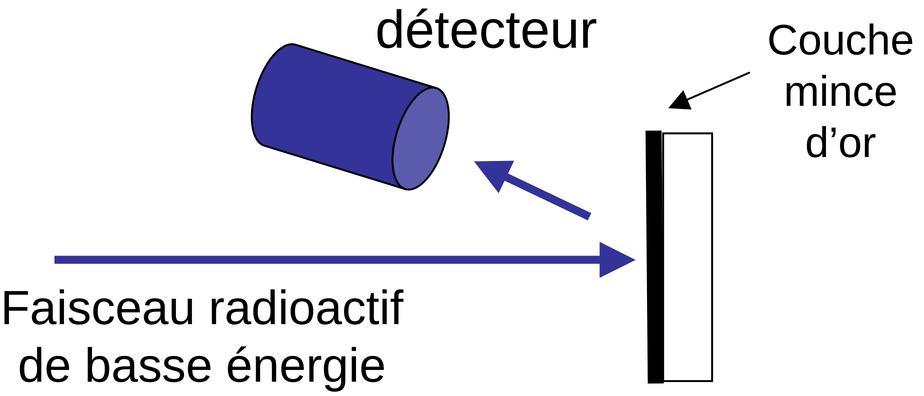
Limite de détection = 0.1 %

Exemple :
AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Elémentaire)

Exemple : couche de TiN sur support silicium

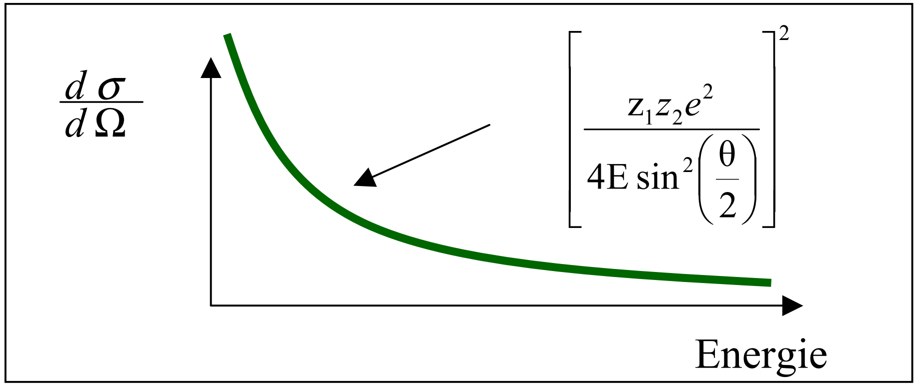


Pour l'analyse de la nature et de l'intensité des faisceaux radioactifs



Diffusion élastique résonante 4/23

Fonction d'excitation

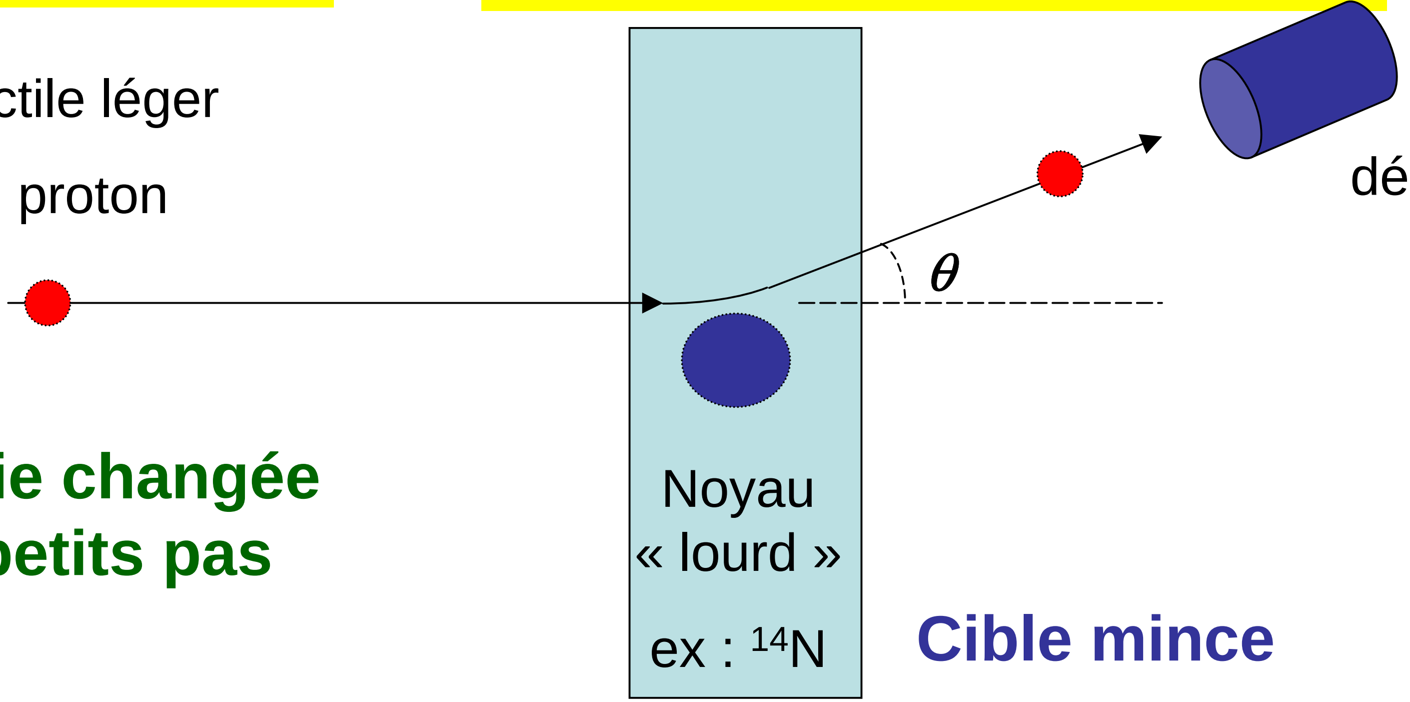


Faisceaux stables

Cinématique directe

Projectile léger

ex : proton



détecteur

Noyau
« lourd »

ex : ^{14}N

Cible mince

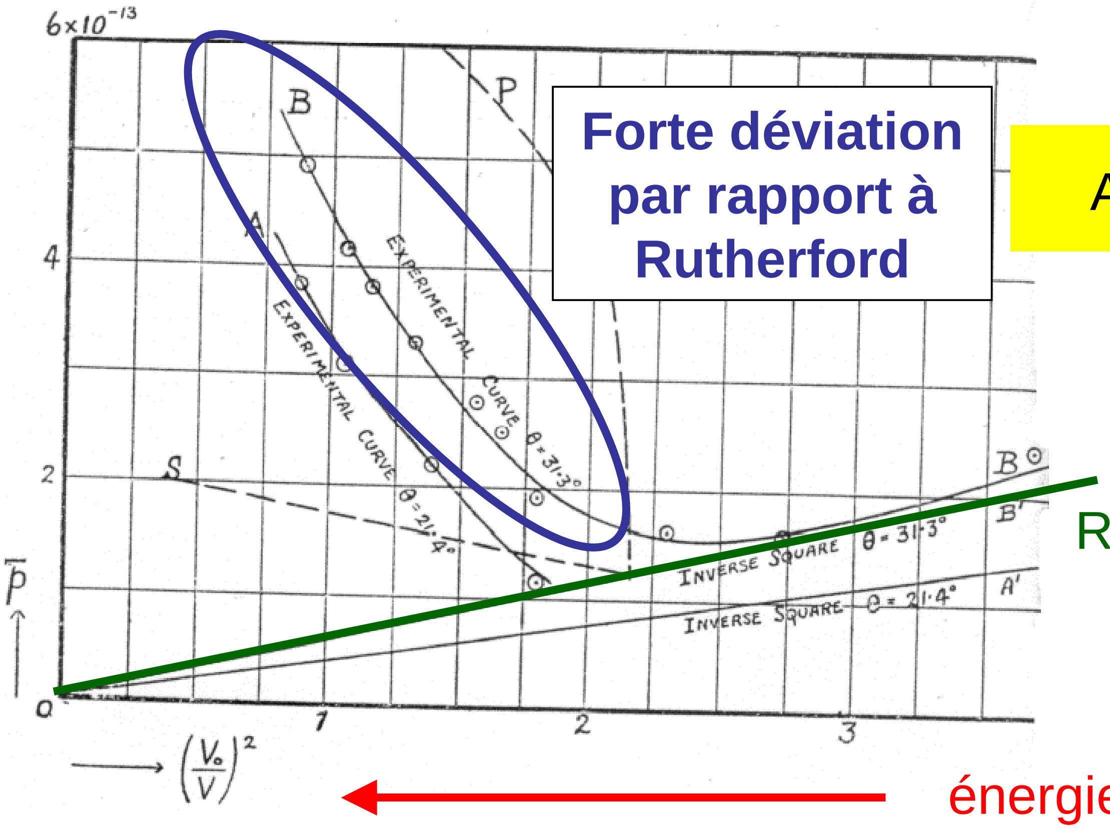
Energie changée par petits pas

Diffusion élastique résonante 5/23

J. Chadwick, Phil.Mag., vol. 42 No 252, 923 (1921)

H(α,α)H

$$\sqrt{\frac{d\sigma}{d\Omega}}$$



Forte déviation par rapport à Rutherford

Anomalie ?

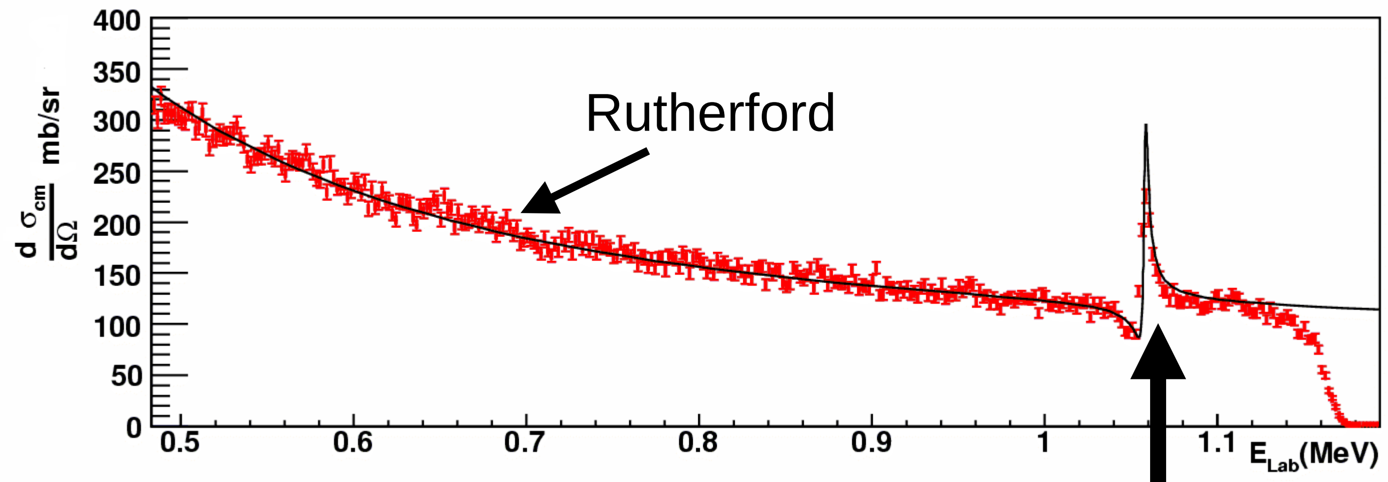
Rutherford

énergie

Diffusion élastique résonante 6/23

Fonction d’excitation mesurée pour **$p + {}^{14}N \Rightarrow p + {}^{14}N$**

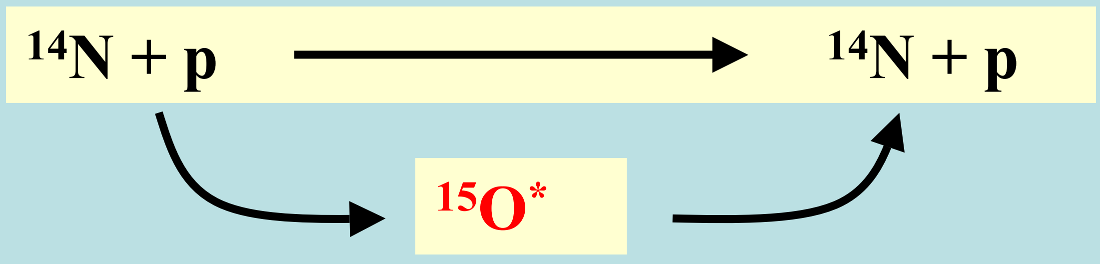
Section efficace très grande !



Anomalie ?

(thèse Iulian Stefan GANIL 2007)

Deux contributions : (Wentzel 1934)



$^{14}N + p \longrightarrow {}^{14}N + p$

$^{15}O^*$

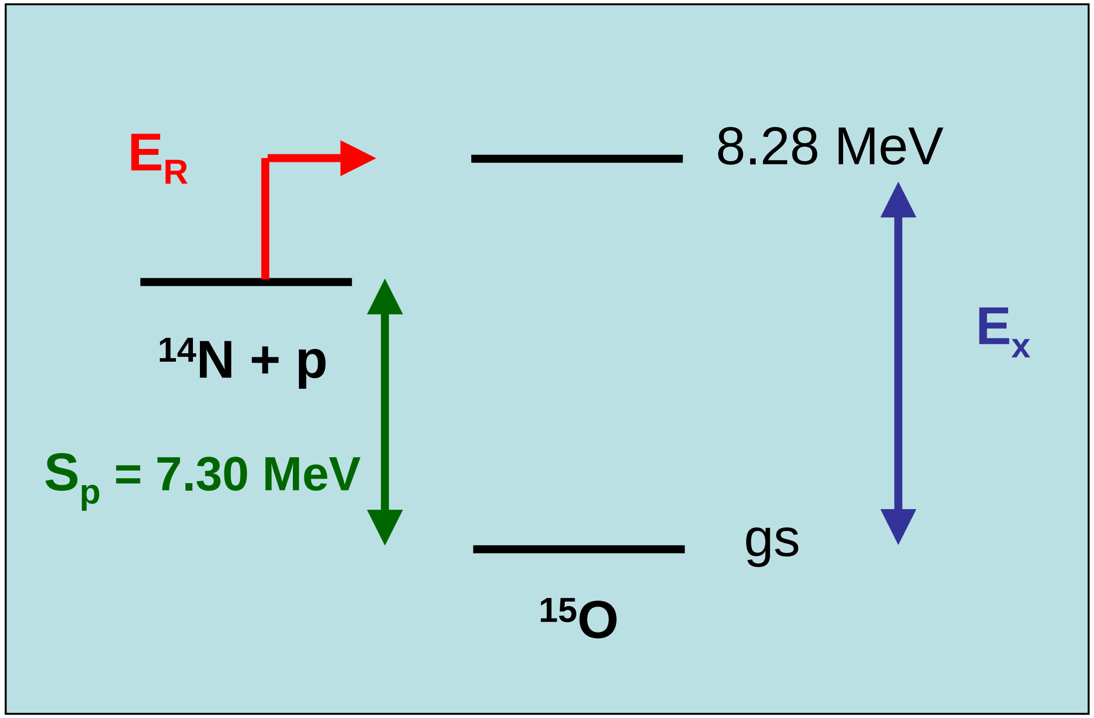
Noyau composé

Diffusion élastique résonante 7/23

Pourquoi on a une résonance ?

Mécanique quantique = états discrets

On observe une résonance quand $S_p + E_R(CM) = E_x$

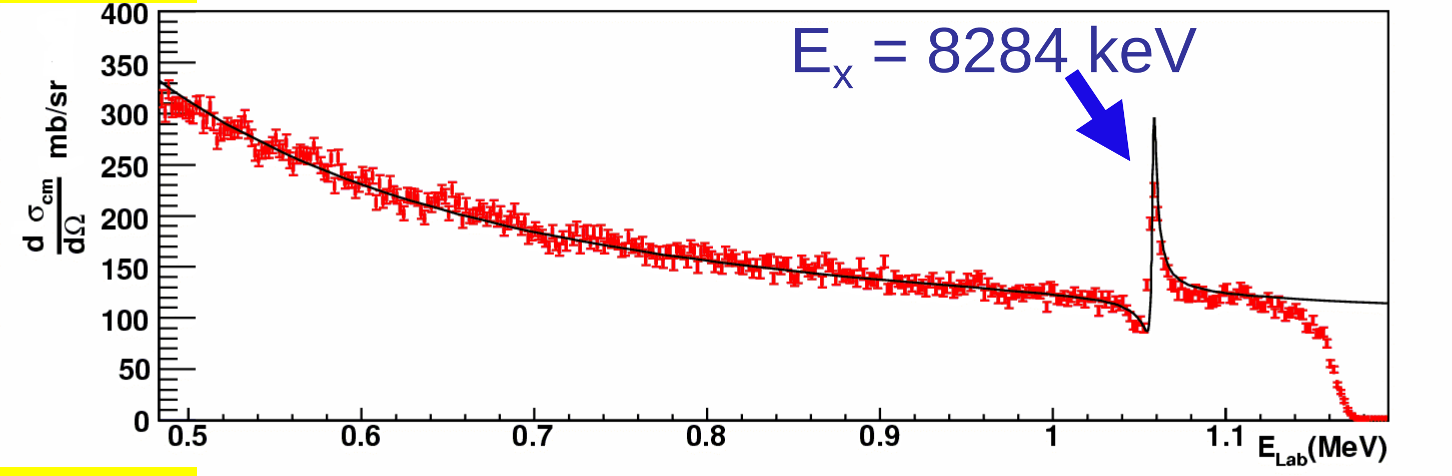


Position des résonances ⇒ Energies des états excités E_x

Diffusion élastique résonante 8/23

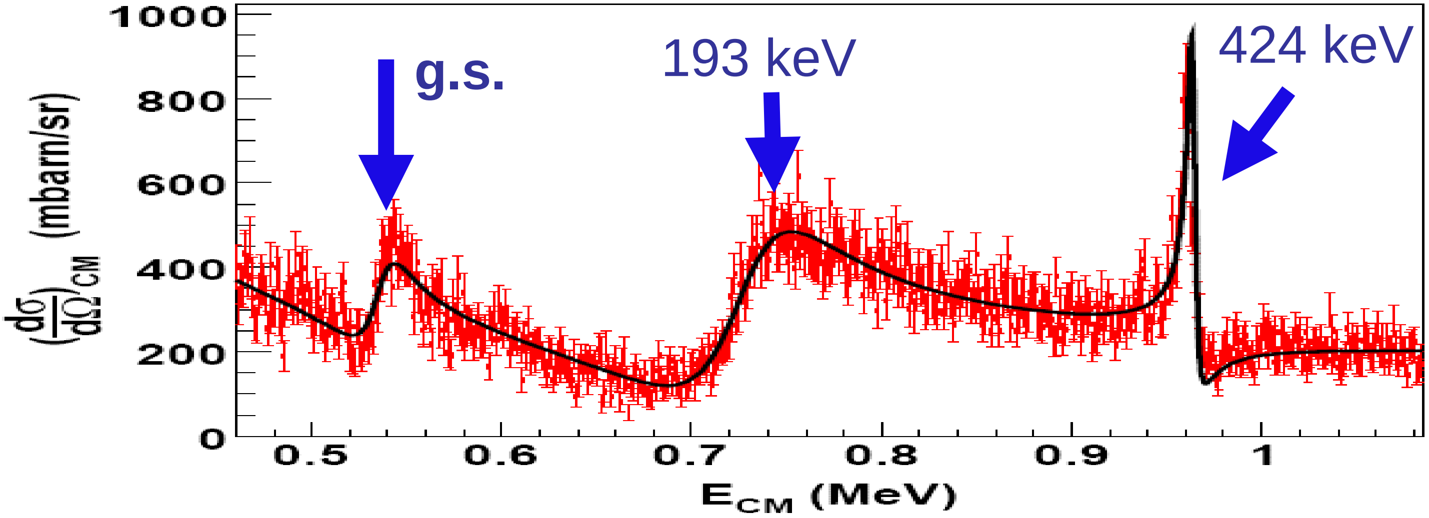
$p + {}^{14}N \Rightarrow p + {}^{14}N$

^{15}O



$p + {}^{15}O \Rightarrow p + {}^{15}O$

^{16}F



Ion Beam Analysis Nuclear Data Library (p,p) (d,d) (α,α) …

http://www-nds.iaea.org/ibandl/

Diffusion élastique résonante 9/23

Décroissance exponentielle

$$\psi(t) \sim e^{-iE_0 t}\, e^{-\Gamma\, t/2} \qquad y(E) = \mathrm{T.F.}(\psi(\mathrm{t}))$$

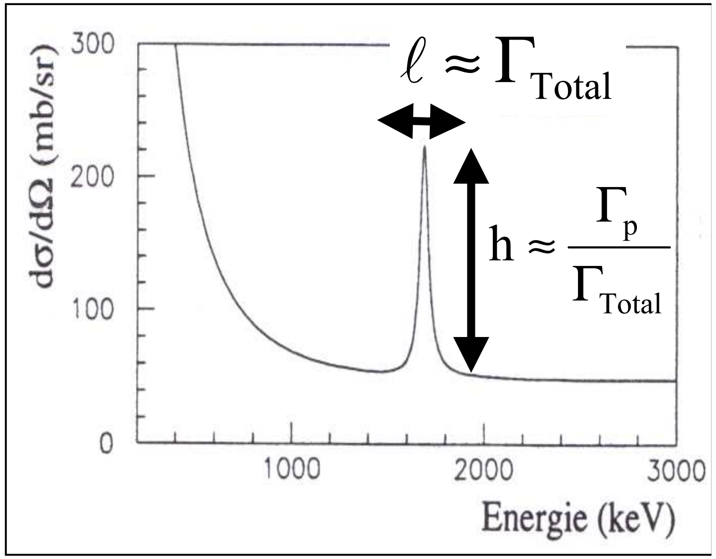
Résonance "Breit Wigner"

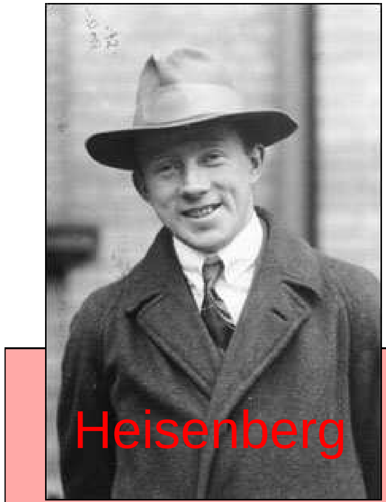
$$|\, y(E)\,|^2 \sim \frac{1}{(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4}$$

Résonance large

Temps court

$$\Delta \mathrm{E} \quad \Delta \mathrm{t} \quad \geq \quad \frac{\hbar}{2}$$





Largeur et hauteur de la résonance ⇒

Largeurs de l'état Γ_{total} **et** Γ_{p} ⇒

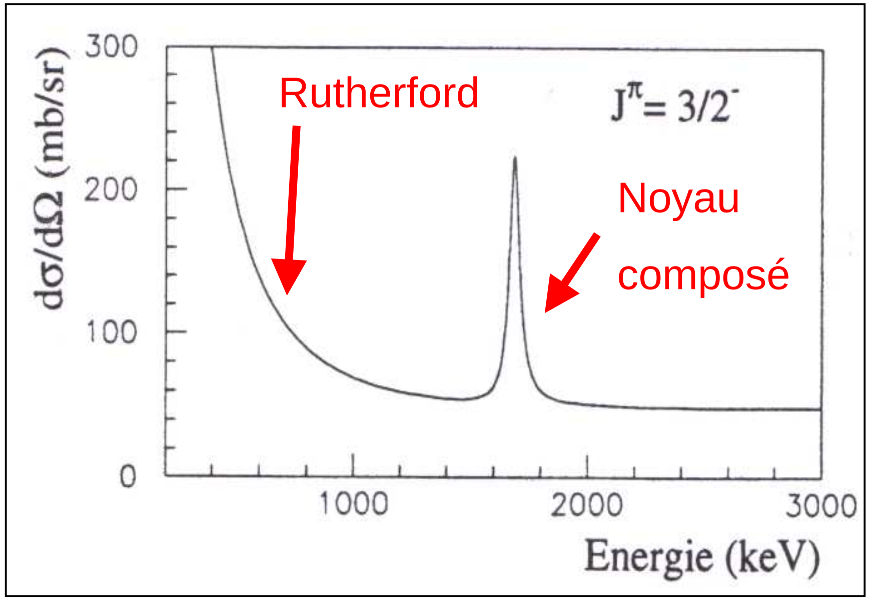
Temps de vie et rapport d'embranchement ⇒

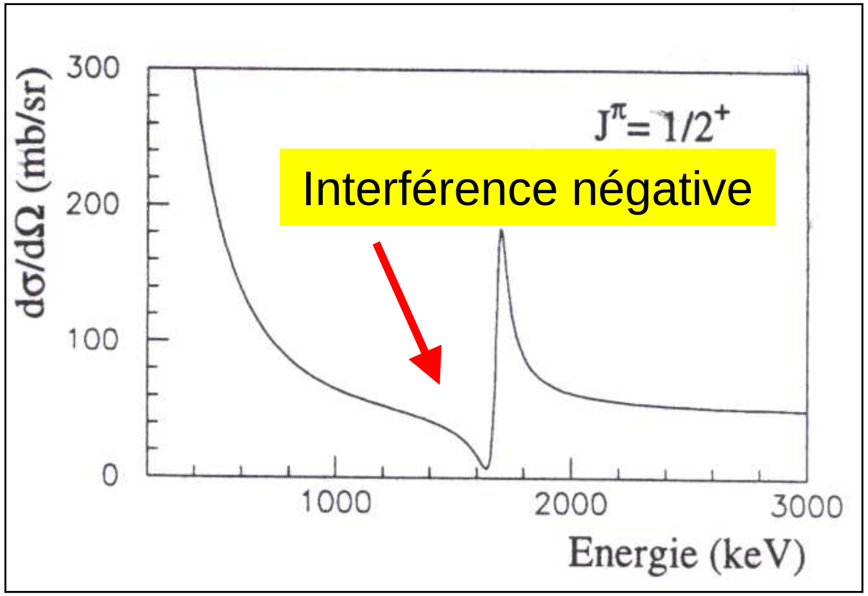
Facteur spectroscopique $\left|\left\langle {}^{15}\mathrm{O} \,\middle|\, {}^{14}\mathrm{N} + \mathrm{p} \right\rangle\right|^2$.

Diffusion élastique résonante 10/23

Mécanique quantique, états indiscernables $\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \left| f_{\text{Rutherford}} + f_{\text{Noyau composé}} \right|^2$

les deux contributions interfèrent





Analyse par théorie de la matrice R - Lane et Thomas Rev Mod Phys (1958)

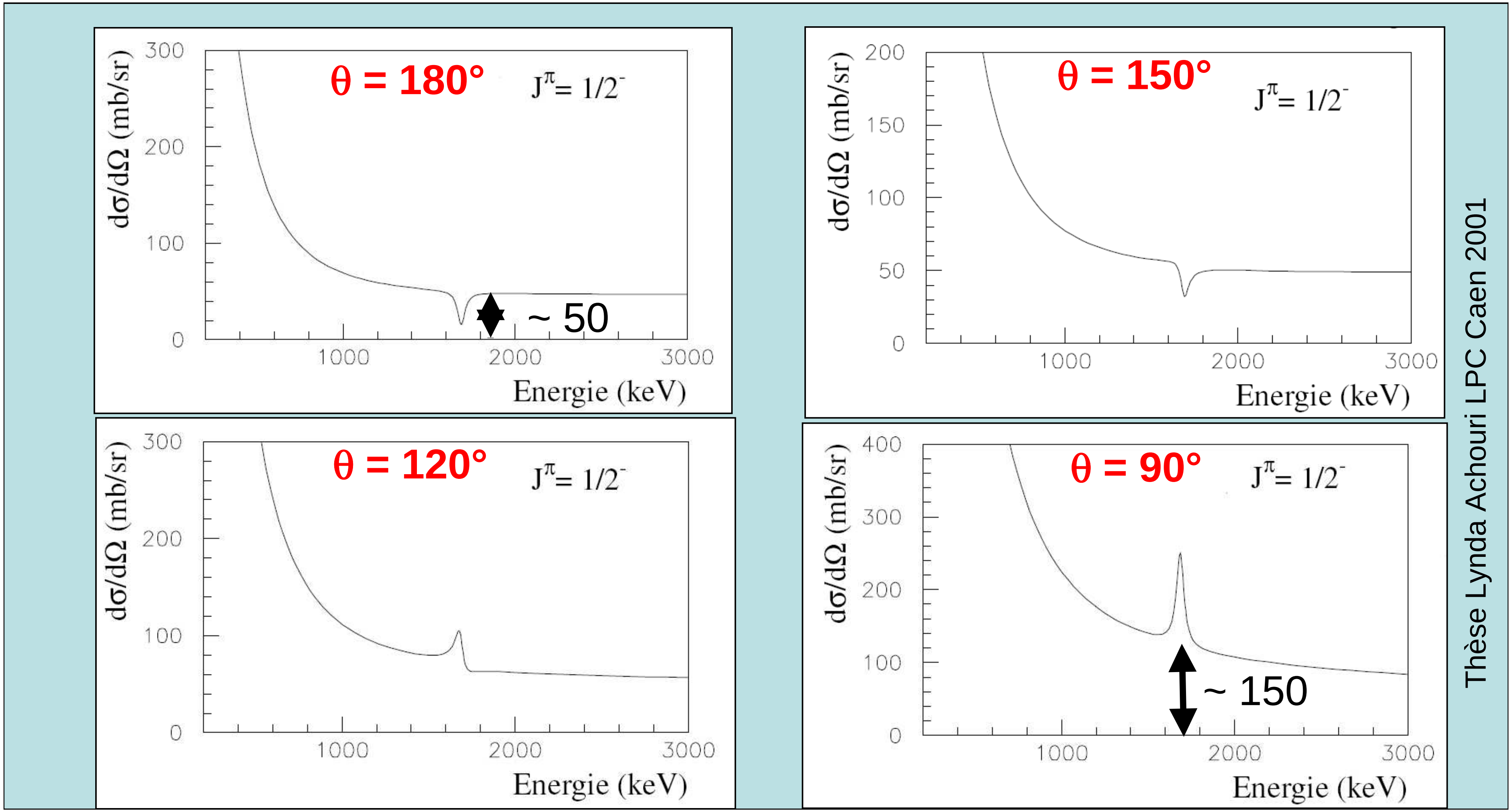
(Cf cours Sparenberg) **(programme AnaRki – www.ganil.fr/lise/)**

Forme de la résonance

$\Rightarrow$ spin et parité des états J^π

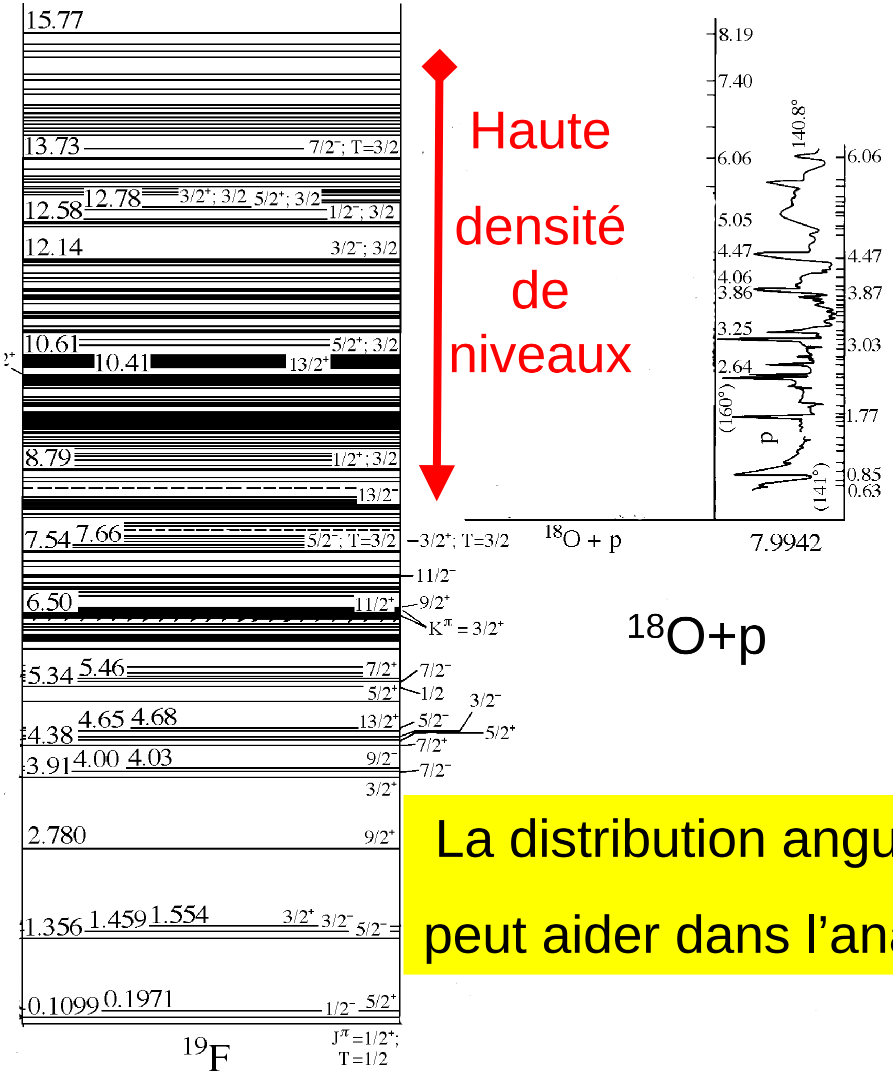
Diffusion élastique résonante 11/23

Distribution angulaire : la forme de la résonance change, le rapport signal sur bruit change



Thèse Lynda Achouri LPC Caen 2001

Diffusion élastique résonante 12/23

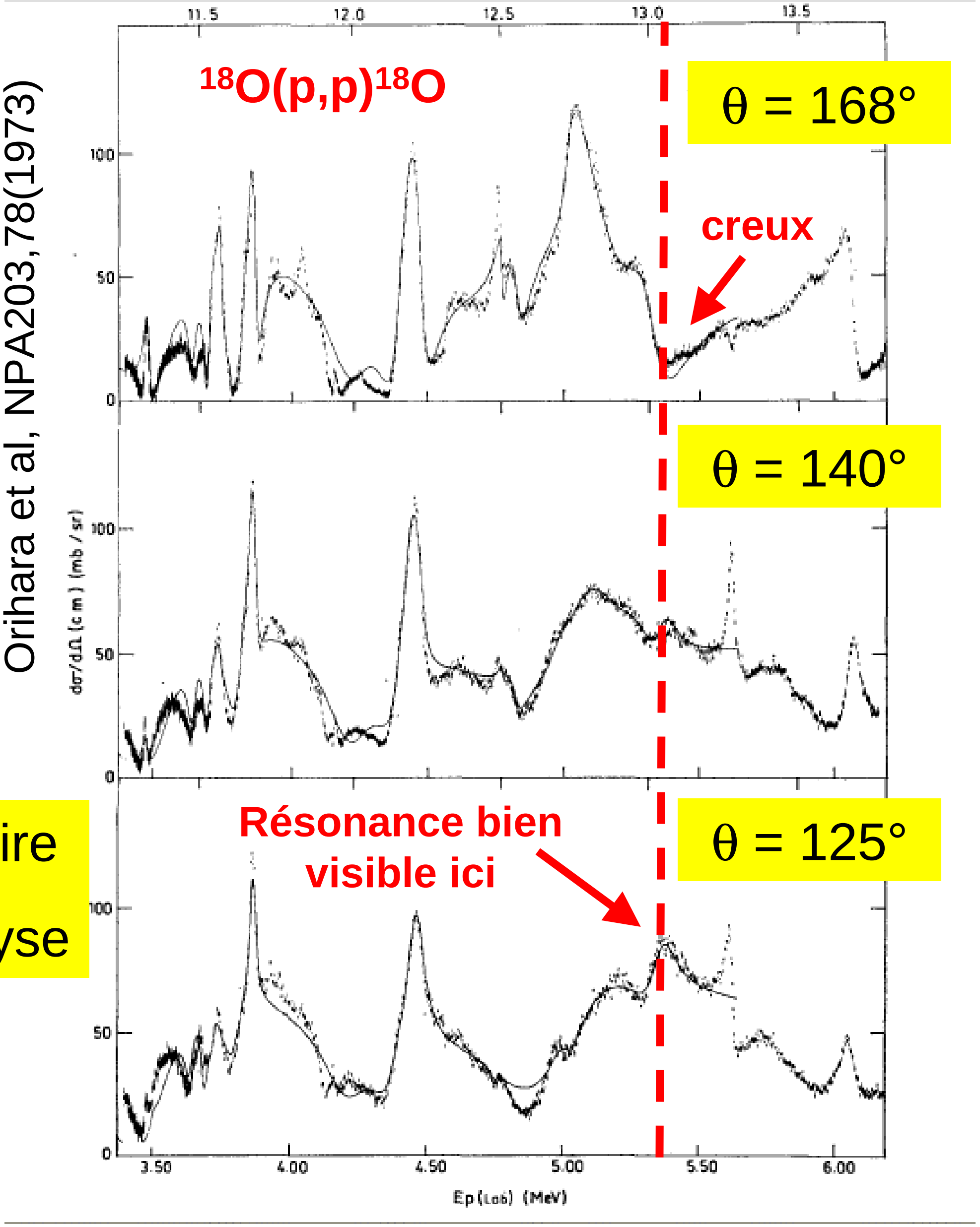


Haute densité de niveaux

^{18}O+p

La distribution angulaire peut aider dans l'analyse

Orihara et al, NPA203,78(1973)



^{18}O(p,p)^{18}O

θ = 168°

creux

θ = 140°

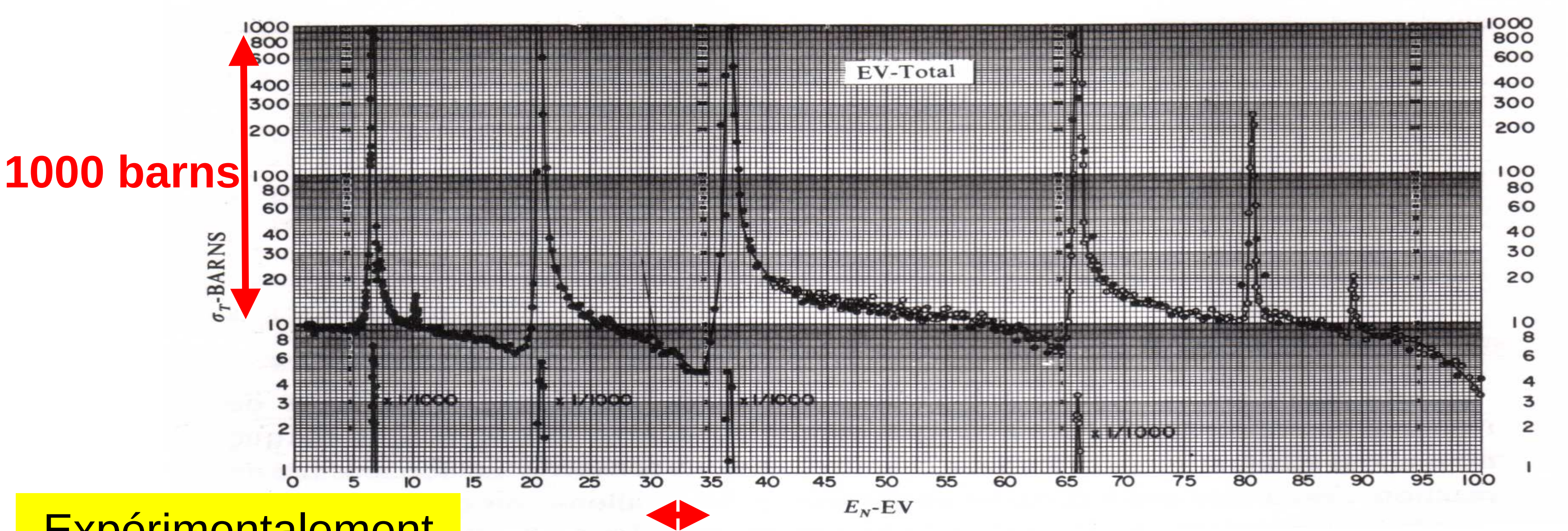
Résonance bien visible ici

θ = 125°

Diffusion élastique résonante 13/23

Avec des neutrons ?

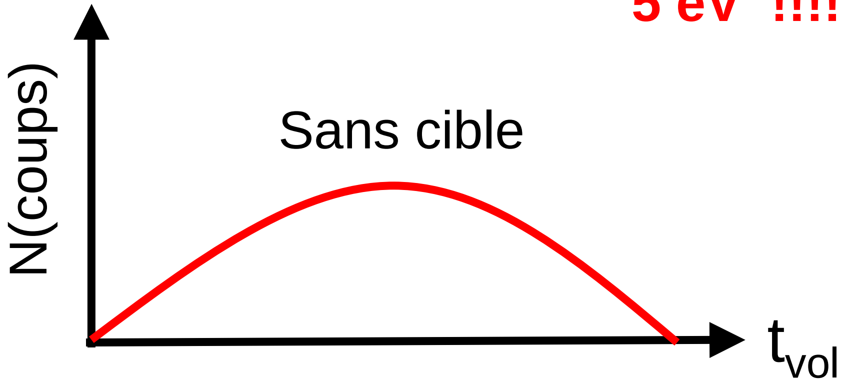
Exemple $^{238}U(n,n)^{238}U$

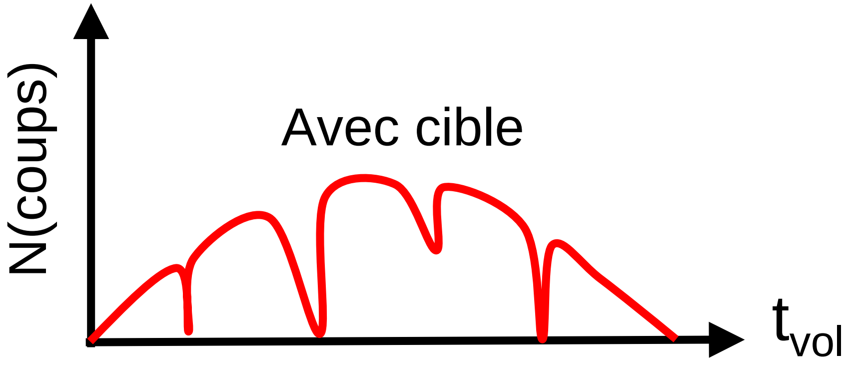


1000 barns

5 eV !!!!

Expérimentalement





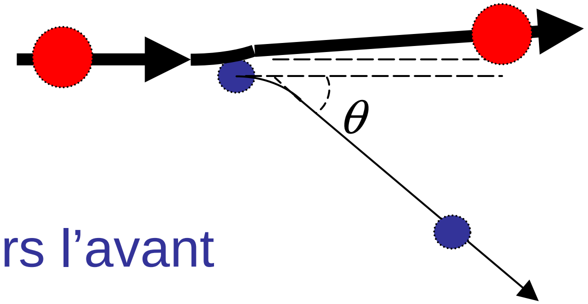
Diffusion élastique résonante 14/23

Faisceaux radioactifs

Cinématique directe **$^{18}Ne(p,p)^{18}Ne$**

radioactif $T_{1/2} = 1.7$ s

Cinématique inverse **$p(^{18}Ne,p)^{18}Ne$**



Avantages :

- Effet de focalisation vers l'avant
- à l'avant Lab = à l'arrière CM
- Energie $_{Lab}$ ~ 4 Energie $_{CM}$

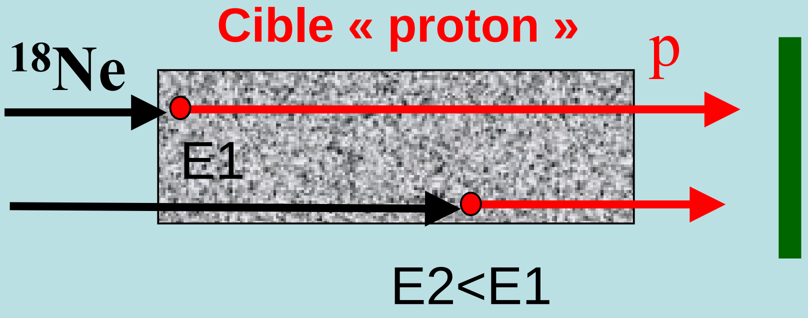
Inconvénients : Résolution angulaire moindre

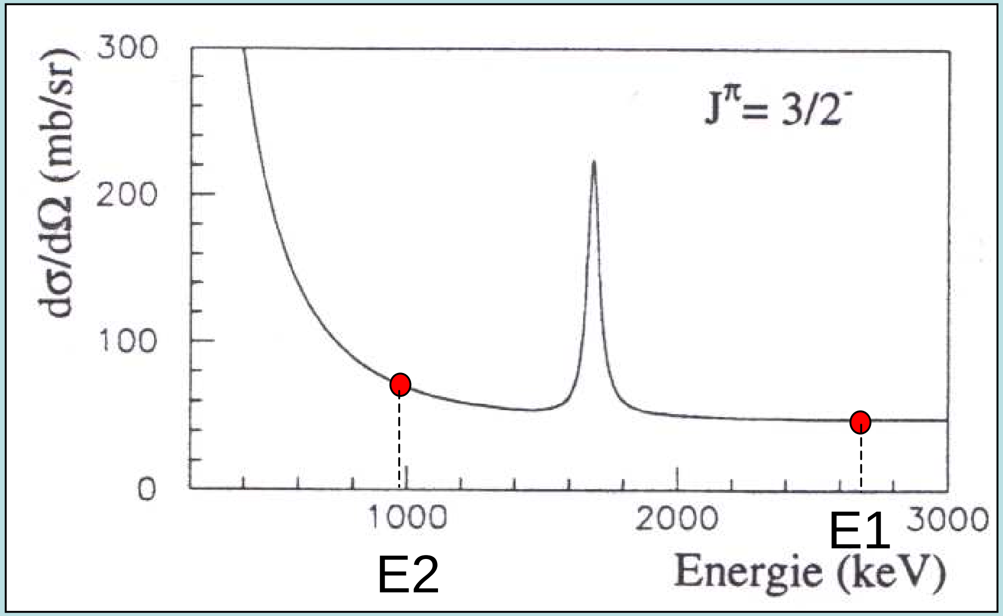
Diffusion élastique résonante 15/23

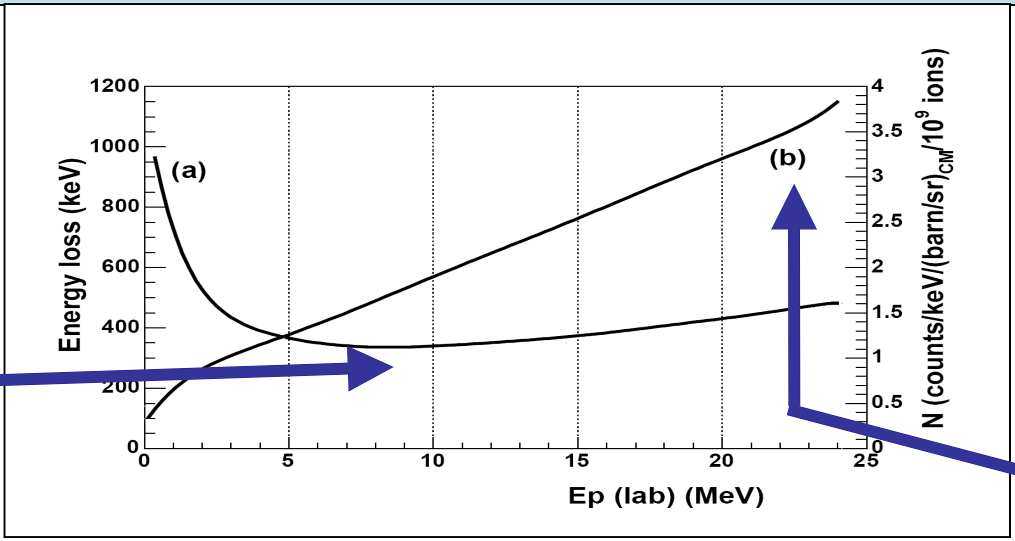
Technique de cible épaisse

Faisceau Radioactif
mono-énergétique

Détecteur
Silicium





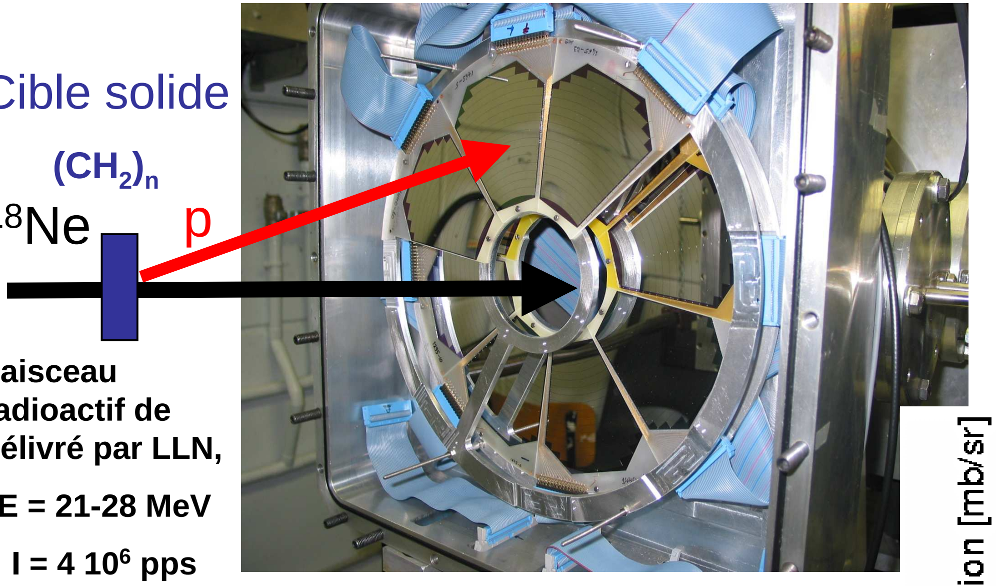


Perte d'énergie constante sur une large gamme d'énergie

Comptage plus élevé parce que l'épaisseur effective est plus grande

Diffusion élastique résonante 16/23

^{19}Na, au-delà de la dripline proton
H(^{18}Ne,p)^{18}Ne



Cible solide

$(CH_2)_n$

^{18}Ne

p

Faisceau radioactif de délivré par LLN,

E = 21-28 MeV

I = 4 10^6 pps

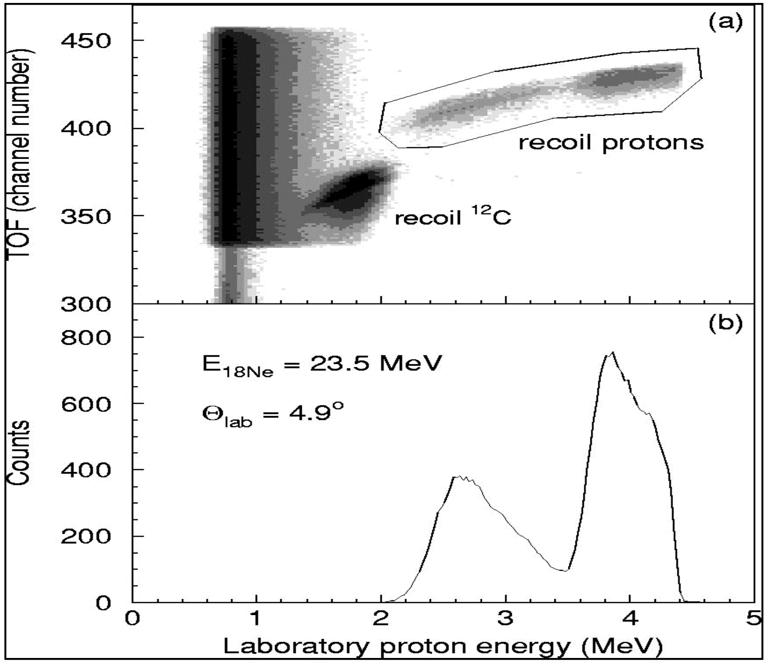
Détecteurs silicium LEDA

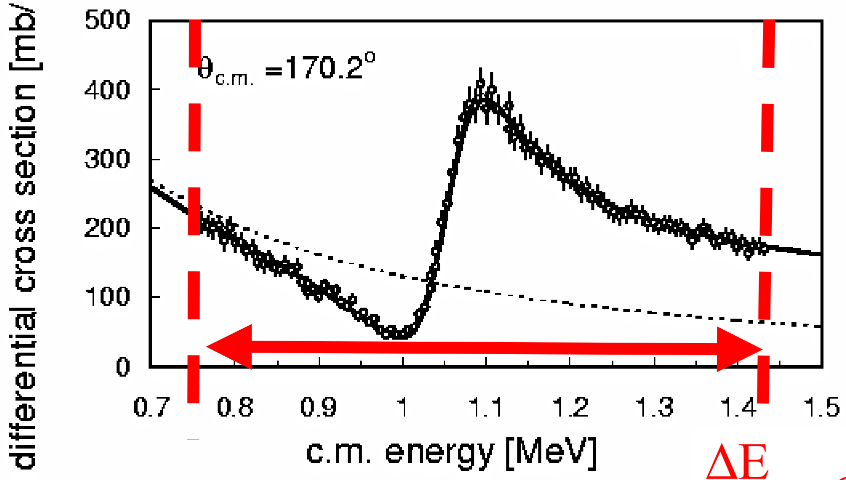
Normalisation avec feuille d'or

J^{π}=1/2+

E_x = 747 ± 14 keV

Γ = 101 ± 3 keV





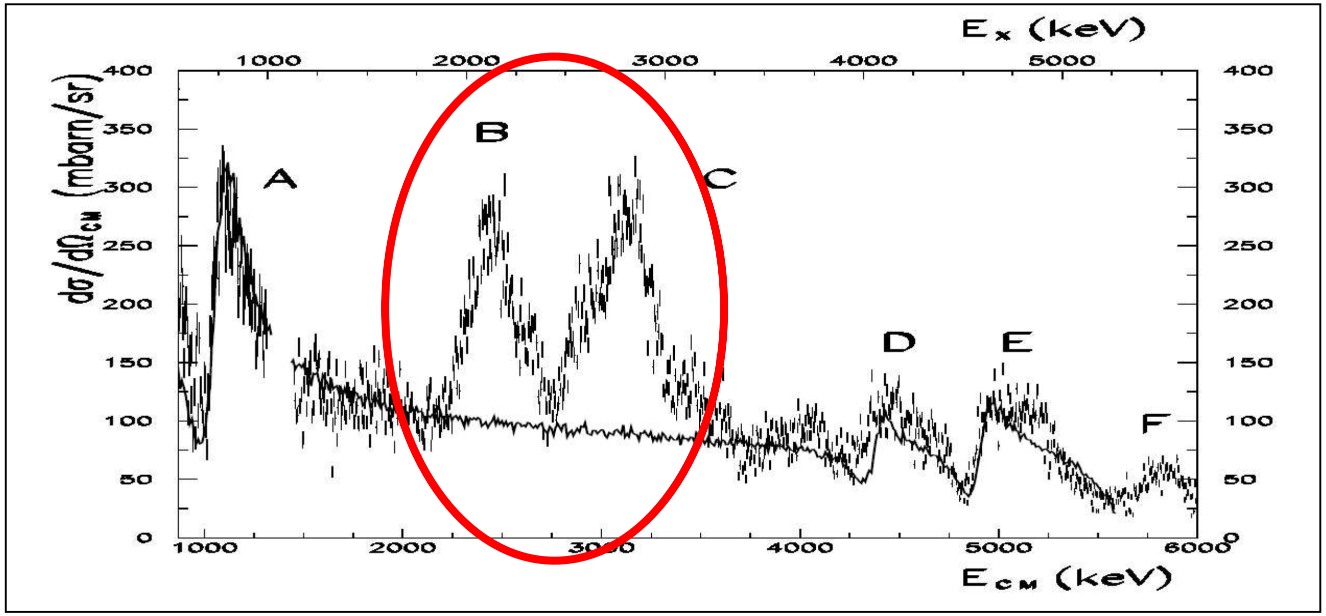
Épaisseur de cible

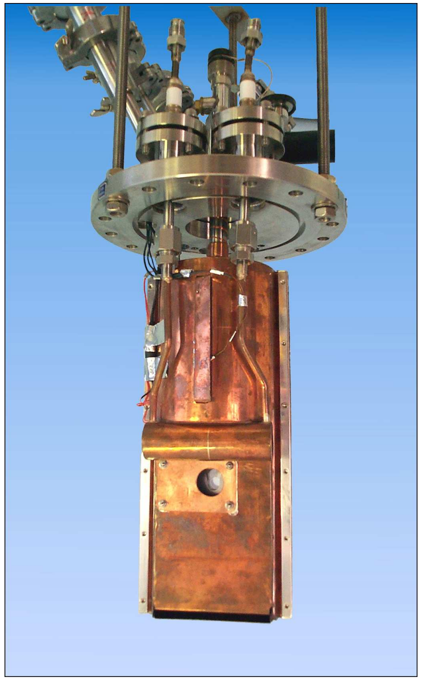
$$\frac{\Delta E}{E} \approx 65\%$$

C. Angulo et al. PRC 67 (2003)

Diffusion élastique résonante 17/23

^{19}Na : Première expérience SPIRAL (2001)





Cible cryogénique d'hydrogène solide

Résolution finale = 30 keV

F. de Oliveira Santos et al., Eur. Phys. J. A 24,237-247 (2005)

Faisceau

^{18}Ne^{4+}

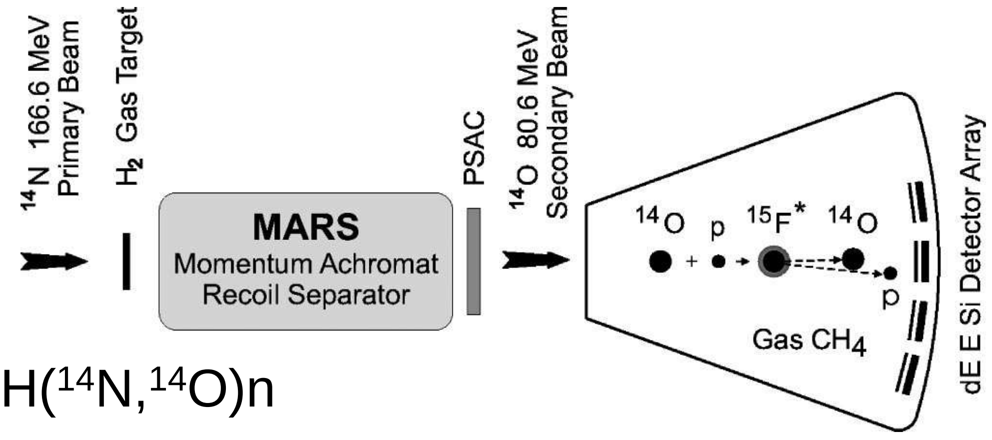
7.2 MeV/A

5 10^5 pps

H(^{18}Ne,p)^{18}Ne

Pas de carbone dans la cible !

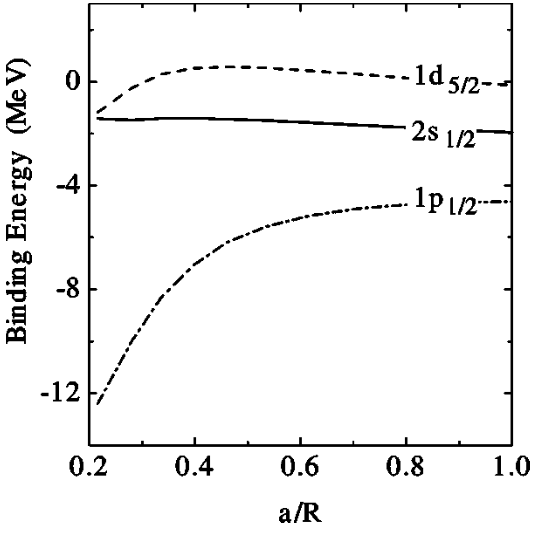
Diffusion élastique résonante 18/23

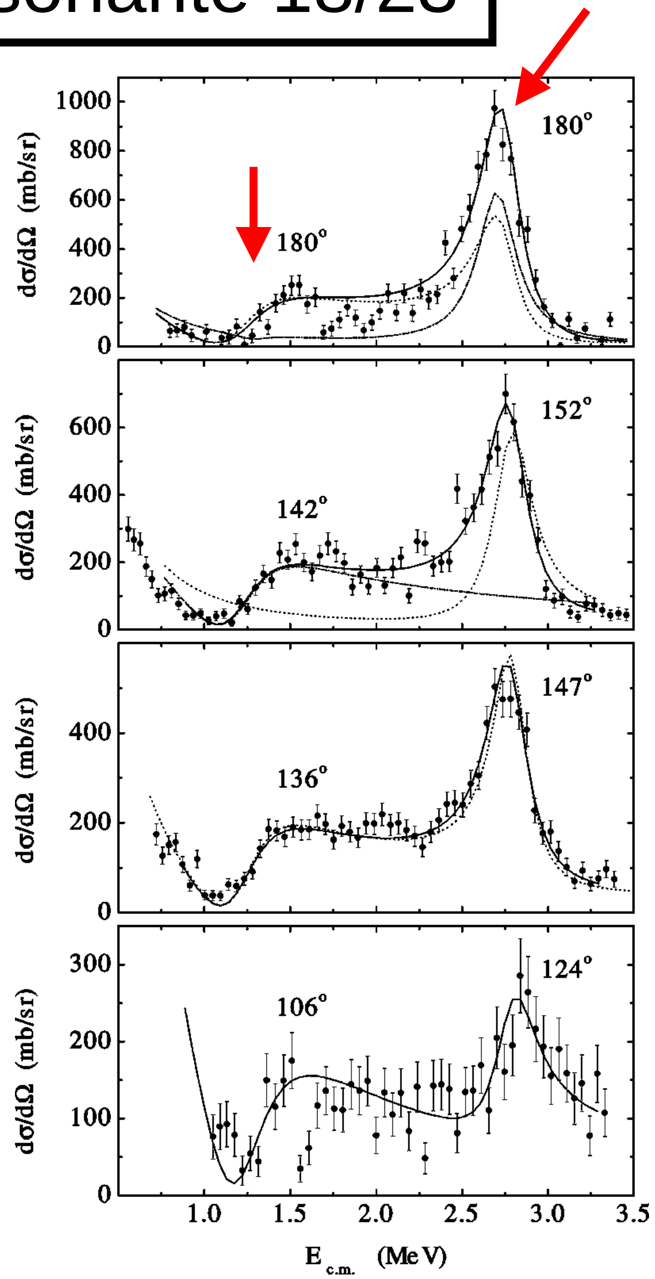


H(^{14}N,^{14}O)n

Texas A&M
University

Cyclotron Institute



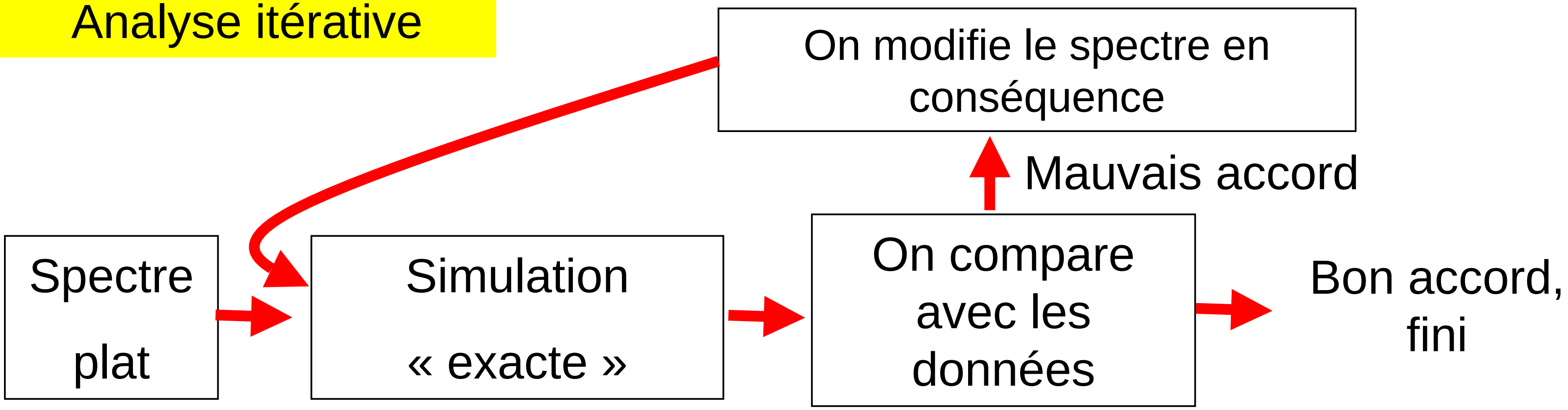


Goldberg et al., Phys. Rev. C **69**, 031302(R) (2004)

« Strong evidence for a large diffuseness of the nuclear potential that is needed to describe single-particle features in drip-line nuclei. »

Diffusion élastique résonante 19/23

Analyse itérative



Spectre plat

Simulation « exacte »

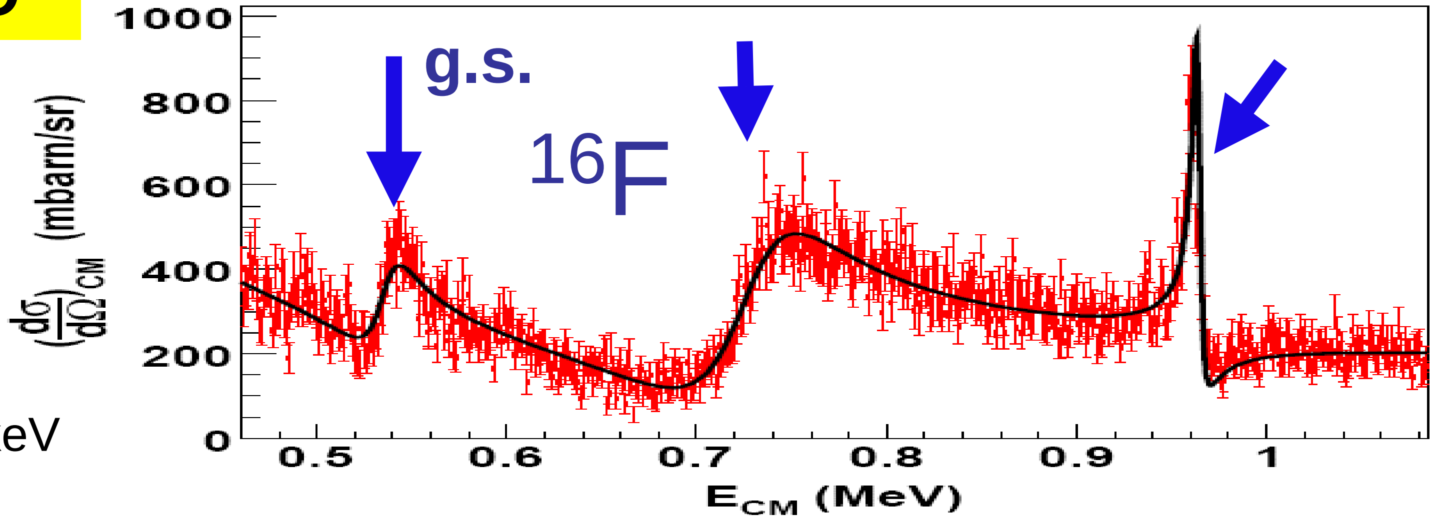
On compare avec les données

Mauvais accord

On modifie le spectre en conséquence

Bon accord, fini

H(^{15}O,p)^{15}O



Résolution < 4 keV

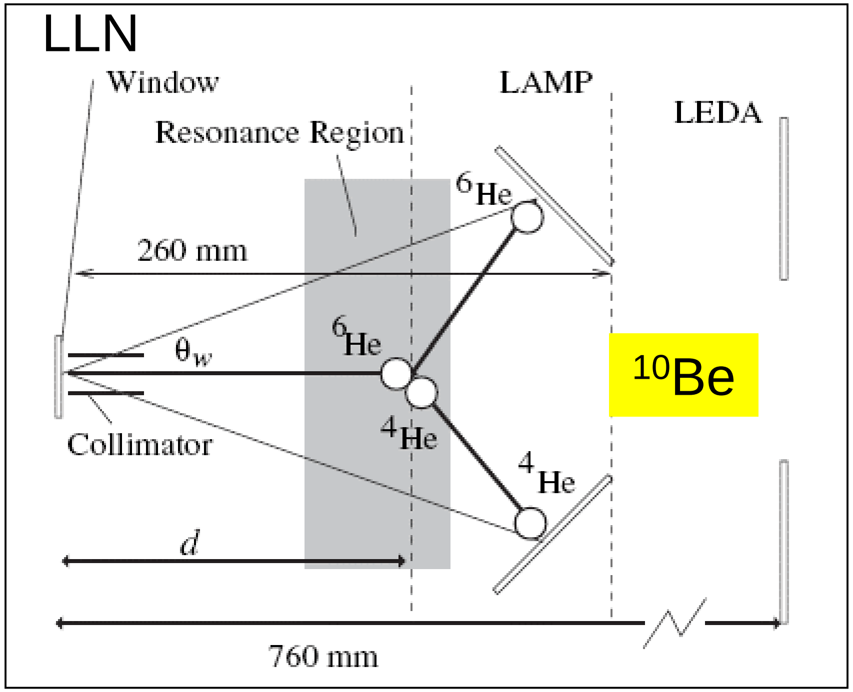
Thèse Iulian Stefan, GANIL (2007)

Prochaine expérience au GANIL H(^{17}Ne,p)^{17}Ne Florence de Grancey

Diffusion élastique résonante 20/23

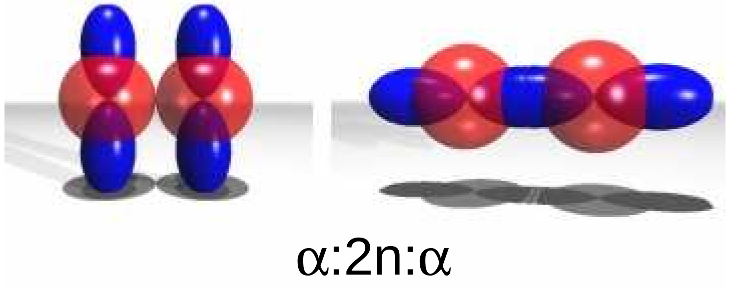
E_R = 10.15 MeV, $\theta_\alpha^2 \sim 1$

Clusters

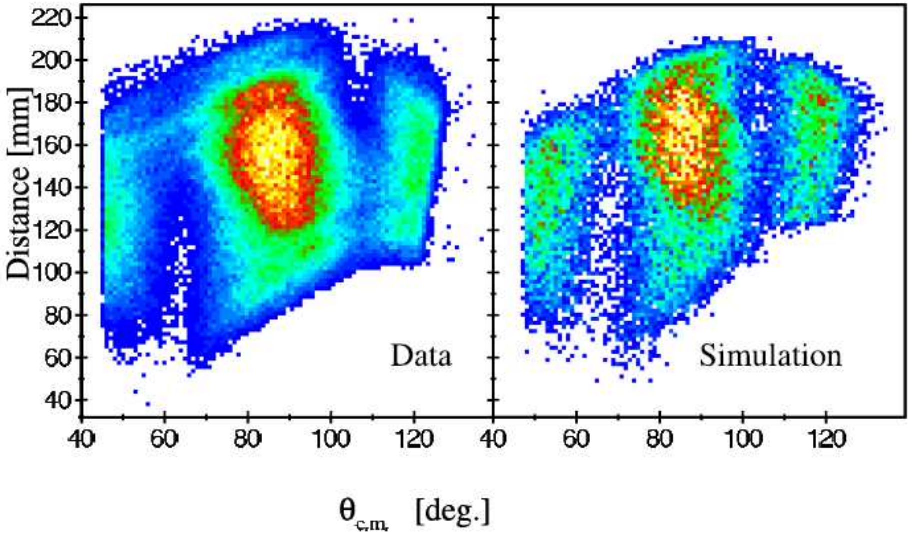


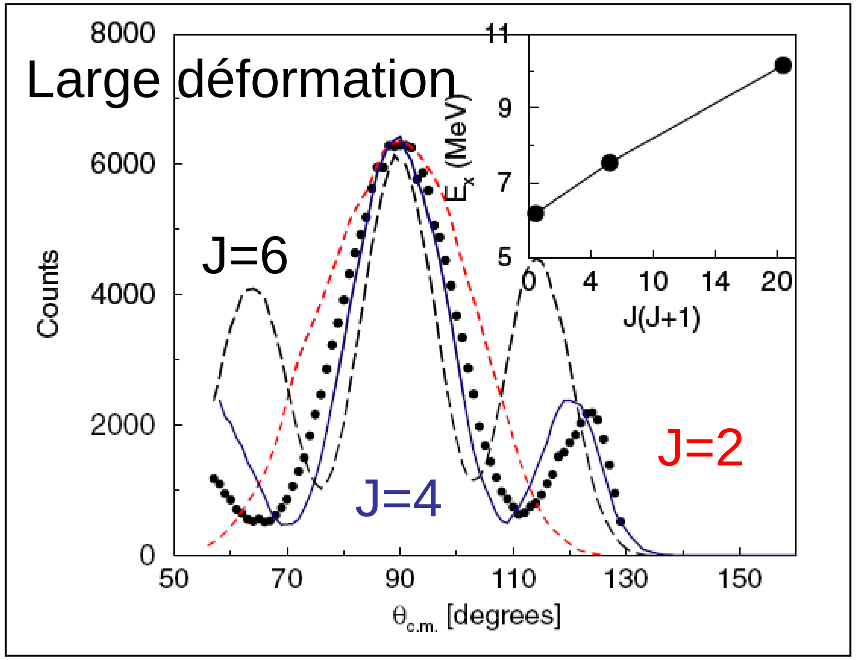
^{10}Be

« Bande rotationnelle moléculaire »



α:2n:α





M. Freer et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 042501 (2006)

Diffusion élastique résonante 21/23

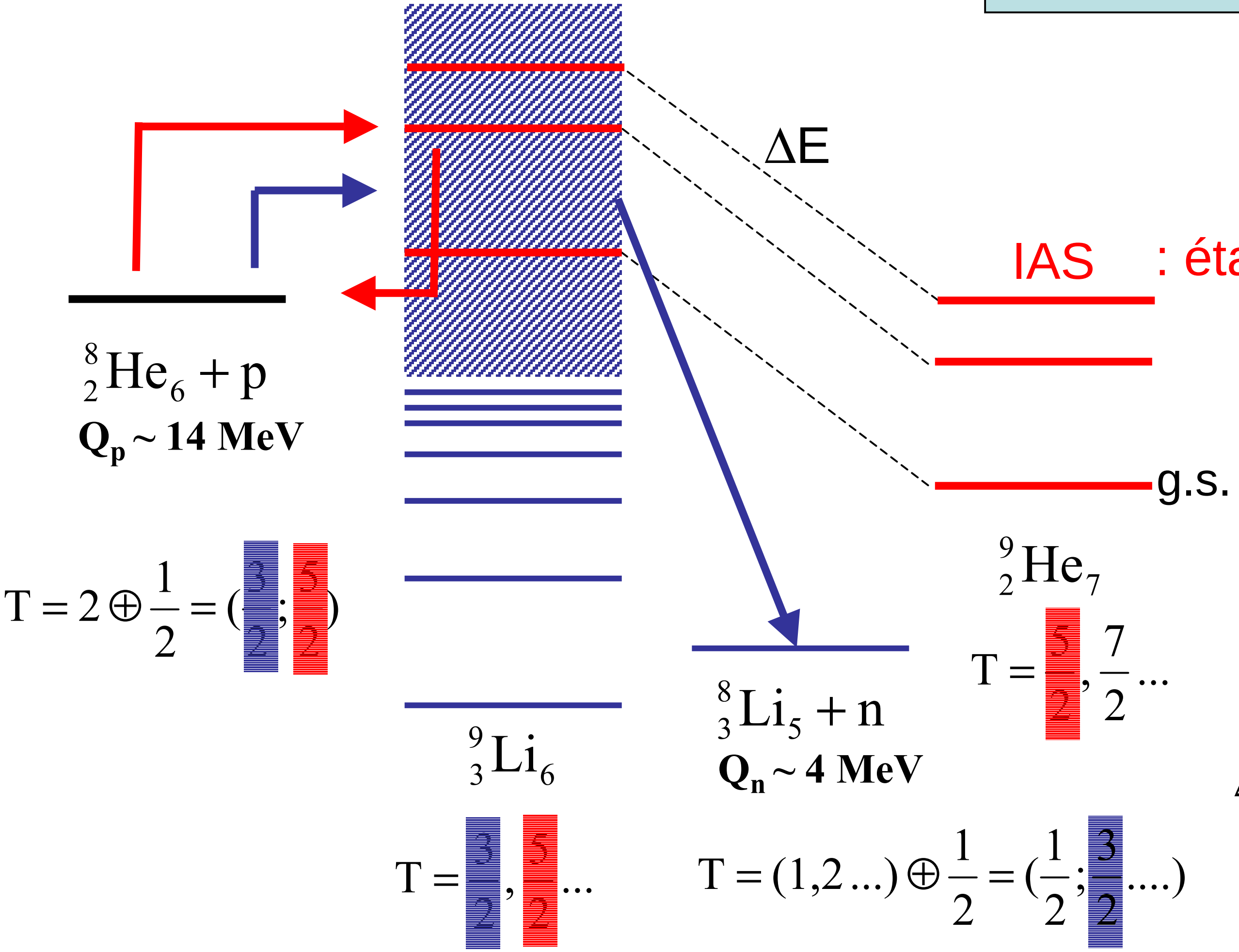
Du côté des riches en neutrons

$n({}^8\mathrm{He},n){}^8\mathrm{He}$ L'expérience infaisable

$p({}^8\mathrm{He},p){}^8\mathrm{He}$

isospin $T_Z = \left|\frac{N-Z}{2}\right|$

IAS : état isobarique analogue



ΔE

g.s.

$${}^8_2\mathrm{He}_6 + p$$

$\mathbf{Q_p \sim 14\ MeV}$

$$T = 2 \oplus \frac{1}{2} = (\frac{3}{2};\frac{5}{2})$$

$${}^9_3\mathrm{Li}_6$$

$$T = \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \ldots$$

$${}^8_3\mathrm{Li}_5 + n$$

$\mathbf{Q_n \sim 4\ MeV}$

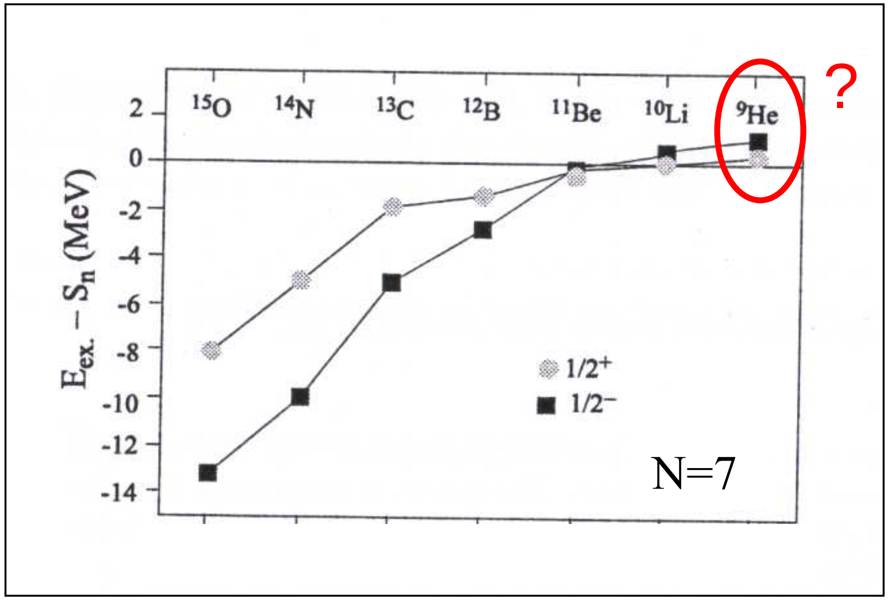
$$T = (1,2\ldots) \oplus \frac{1}{2} = (\frac{1}{2};\frac{3}{2}\ldots.)$$

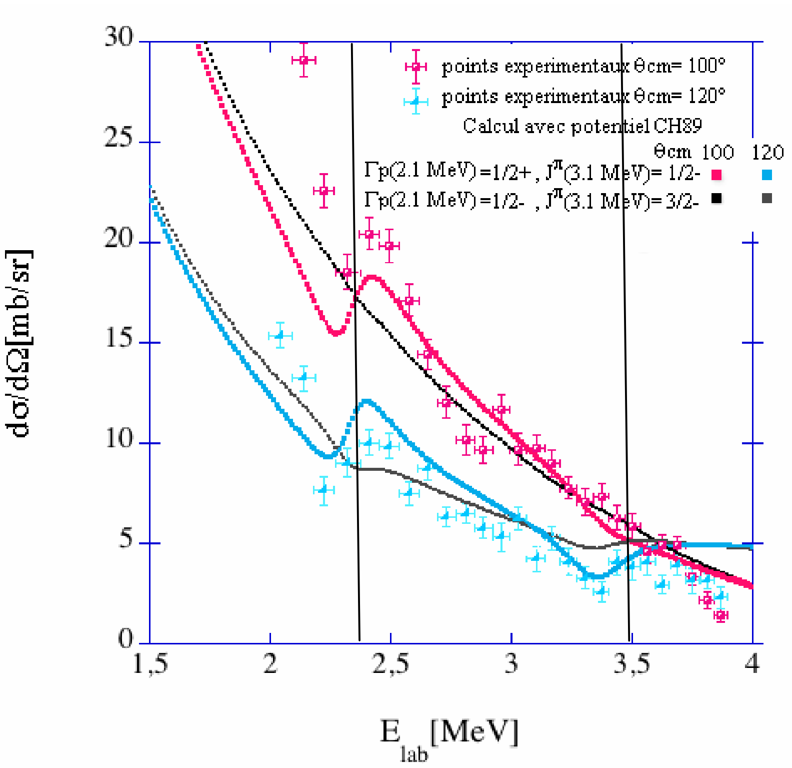
$${}^9_2\mathrm{He}_7$$

$$T = \frac{5}{2}, \frac{7}{2} \ldots$$

$$\Delta E \approx 0.65\, Z_<^{\frac{2}{3}} \approx 1\,\mathrm{MeV}$$

Diffusion élastique résonante 22/23

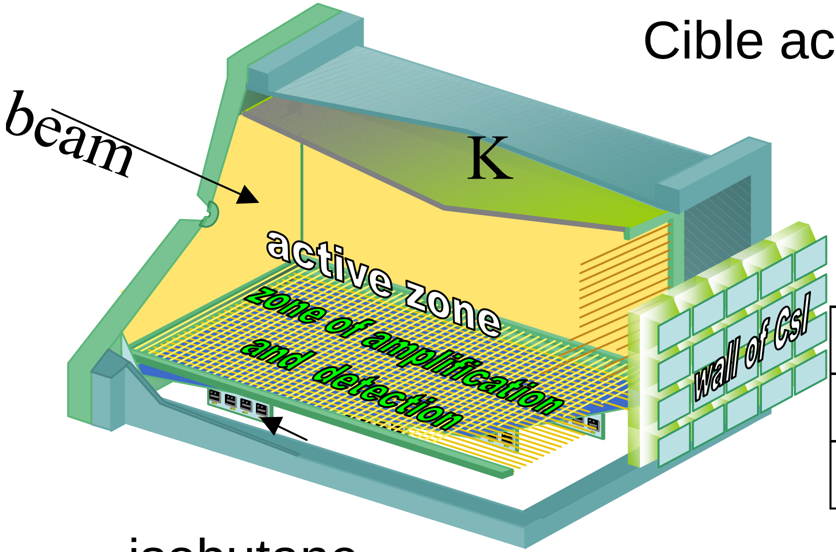




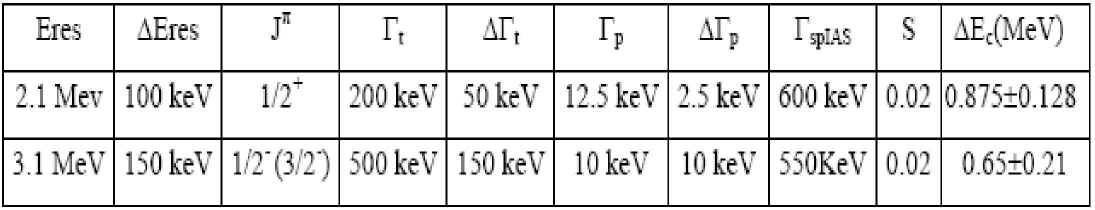
Thèse Charles-Edouard DEMONCHY (2002) GANIL

Cible active

MAYA



p(^{8}He,p)^{8}He



Eres	ΔEres	J^π	Γ_t	$\Delta\Gamma_t$	Γ_p	$\Delta\Gamma_p$	Γ_{spIAS}	S	ΔE_c(MeV)
2.1 Mev	100 keV	$1/2^+$	200 keV	50 keV	12.5 keV	2.5 keV	600 keV	0.02	0.875±0.128
3.1 MeV	150 keV	$1/2^-(3/2^-)$	500 keV	150 keV	10 keV	10 keV	550KeV	0.02	0.65±0.21

Tableau V.3: Résultats expérimentaux de ce travail

isobutane

Diffusion élastique résonante 23/23

Avantages

- Simple
- Grandes sections efficaces
- Bonne résolution en énergie
- On peut mesurer E_X , J^π , $\Gamma_{\text{partielle}}$, Γ_{totale}

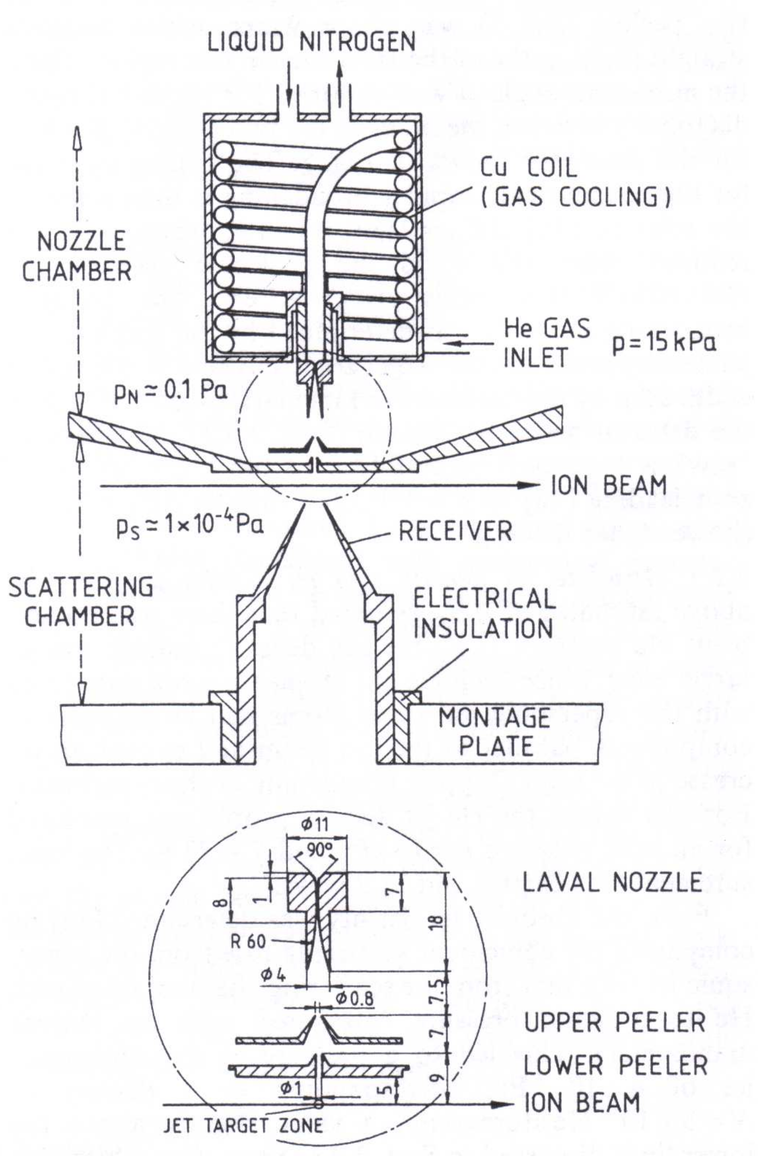
Liste non exhaustive

Inconvénients

- On ne peut voir seulement que les états au dessus du seuil de réaction (non liés)
- Le nombre de coups mesuré dans la résonance « dépend » de la largeur de l'état (épaisseur effective de la cible)

…

Devinette

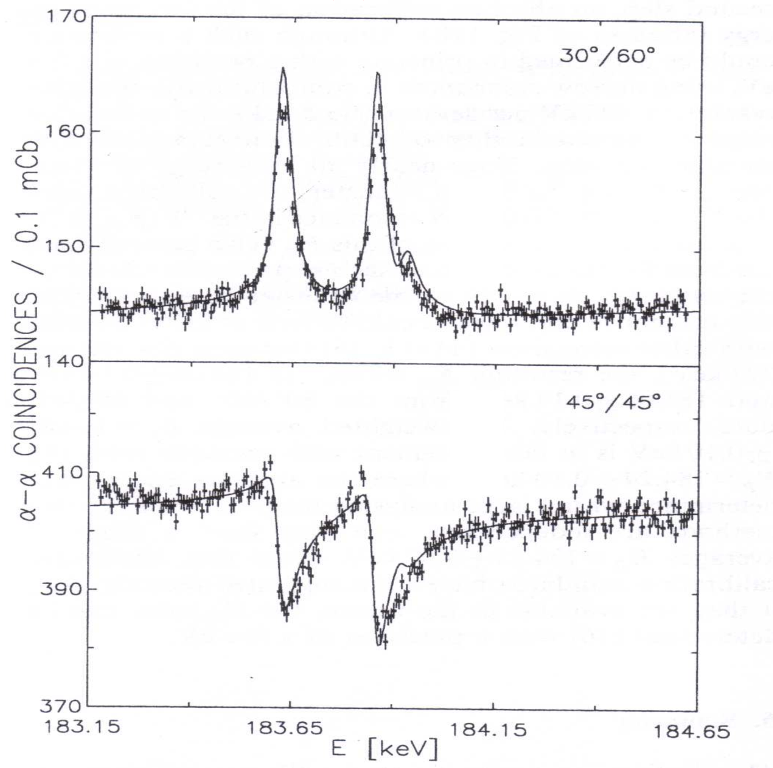


Résolution = 26 eV

α(α,α)α

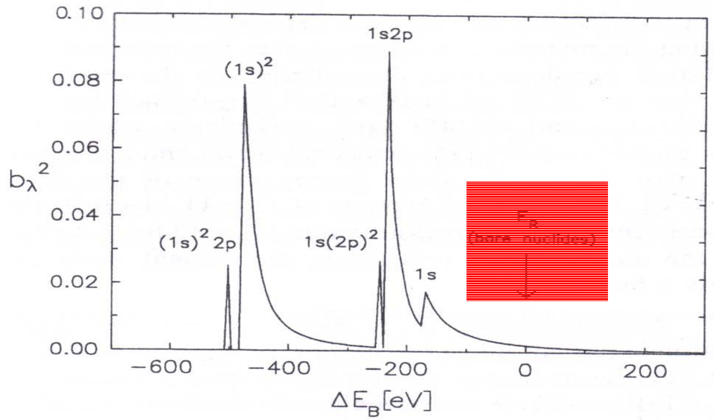
C'est quoi ça ?

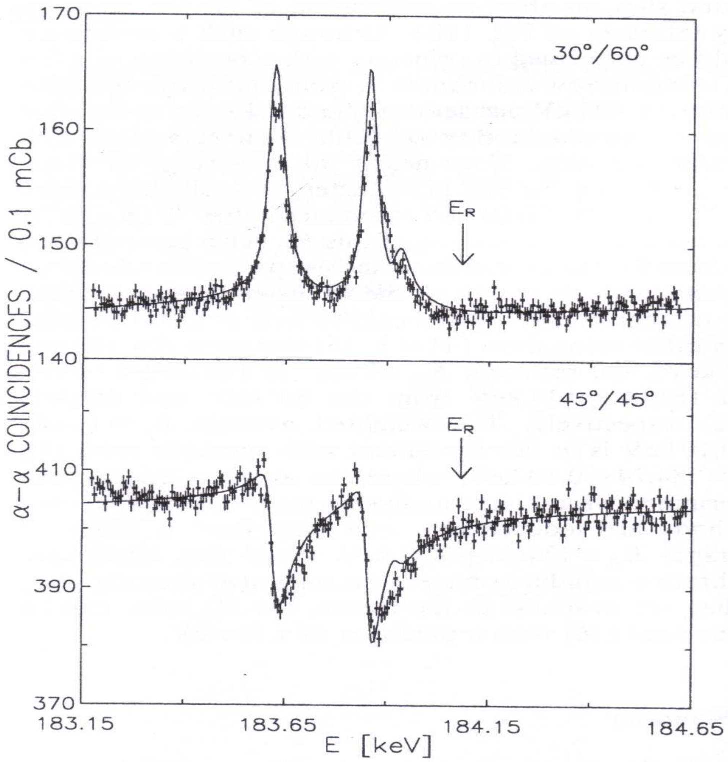
200 eV ↔



Réponse

Wüstenbecker et al, Z ¨Phys. A 344, 205 (1992)





^{4}He + ^{4}He$^+$ ⇒ ^{8}Be$^+$

⇒ ^{8}Be^{++} + e$^-$

⇒ ^{8}Be^{+++} + 2e$^-$

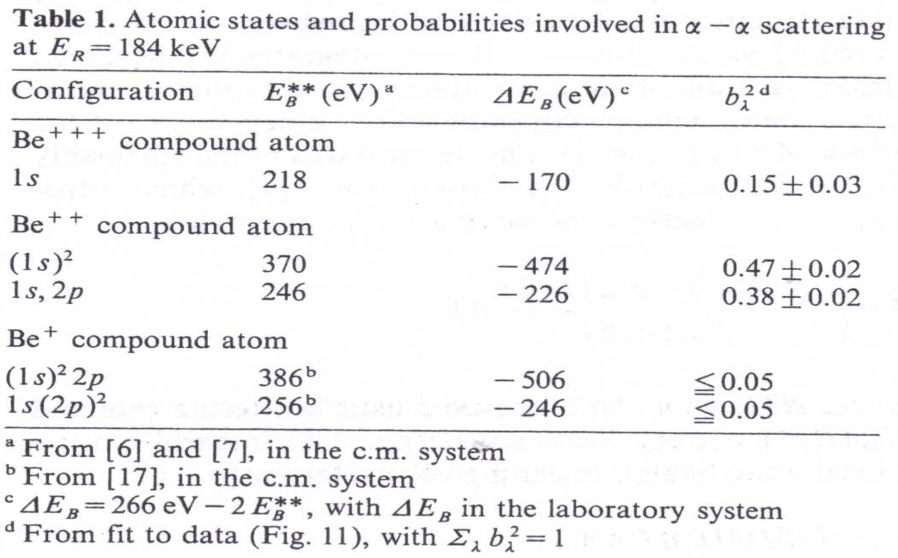


Table 1. Atomic states and probabilities involved in $\alpha-\alpha$ scattering at $E_R = 184$ keV

Configuration	E_B^{**} (eV)[a]	ΔE_B (eV)[c]	b_λ^2[d]
Be^{+++} compound atom			
1s	218	−170	0.15±0.03
Be^{++} compound atom			
$(1s)^2$	370	−474	0.47±0.02
1s, 2p	246	−226	0.38±0.02
Be^{+} compound atom			
$(1s)^2 2p$	386[b]	−506	≦0.05
$1s(2p)^2$	256[b]	−246	≦0.05

[a] From [6] and [7], in the c.m. system

[b] From [17], in the c.m. system

[c] $\Delta E_B = 266$ eV $- 2E_B^{**}$, with ΔE_B in the laboratory system

[d] From fit to data (Fig. 11), with $\Sigma_\lambda b_\lambda^2 = 1$

Structure nucléaire et atomique

E_R = 184070 ± 100 eV

lab

Γ_α = 11.14 ± 0.50 eV

(suite)…., diffusion inélastique et réactions d’intérêt astrophysique

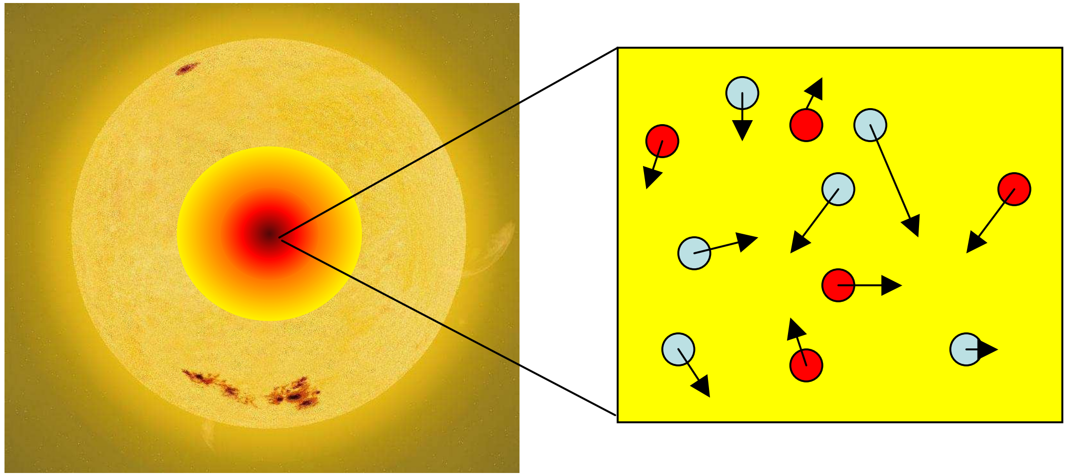
François de Oliveira Santos

Réactions astro 1/11

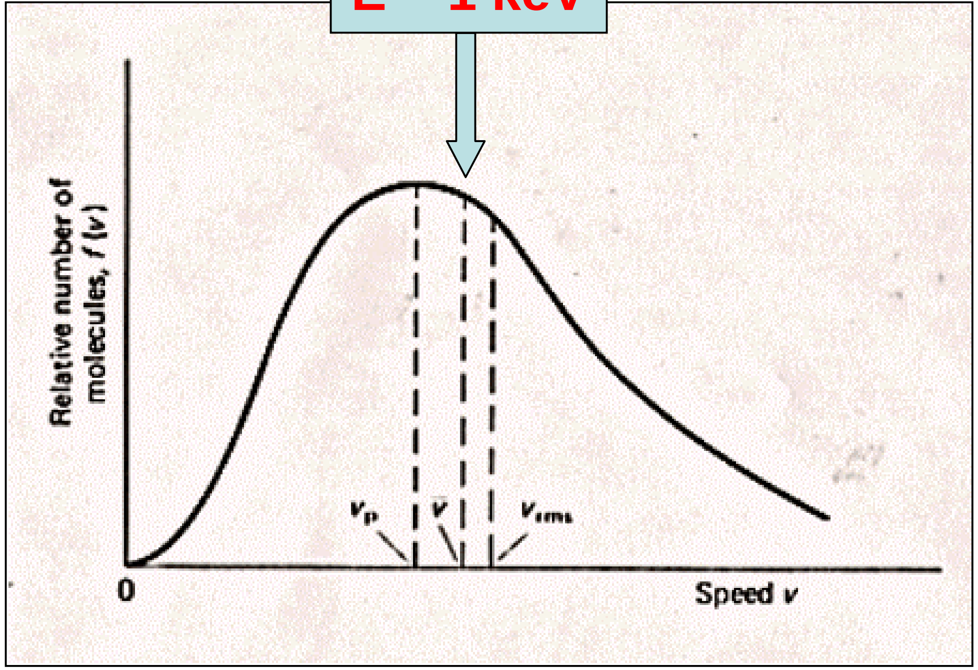
Ex: Soleil

T ~ 15 10^6 K

d ~ 100 g/cm3



E ~ 1 keV



Distribution de

Maxwell - Boltzmann

$$\Phi(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \, e^{-\frac{m v^2}{2kT}}$$

Probabilité d’avoir une vitesse relative ν

Réactions astro 2/11

Exemple :

$^{12}C + p \Rightarrow {}^{13}N + \gamma$

$^{13}N \Rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu$

Radioactivité bêta

Capture radiative

$$\frac{dN(^{13}N)}{dt} = -\lambda N(^{13}N) + N(^{12}C)\, N(p) \langle \sigma v \rangle$$

Taux de réaction : $\langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty \varphi(v)\, \sigma\, v\, dv$

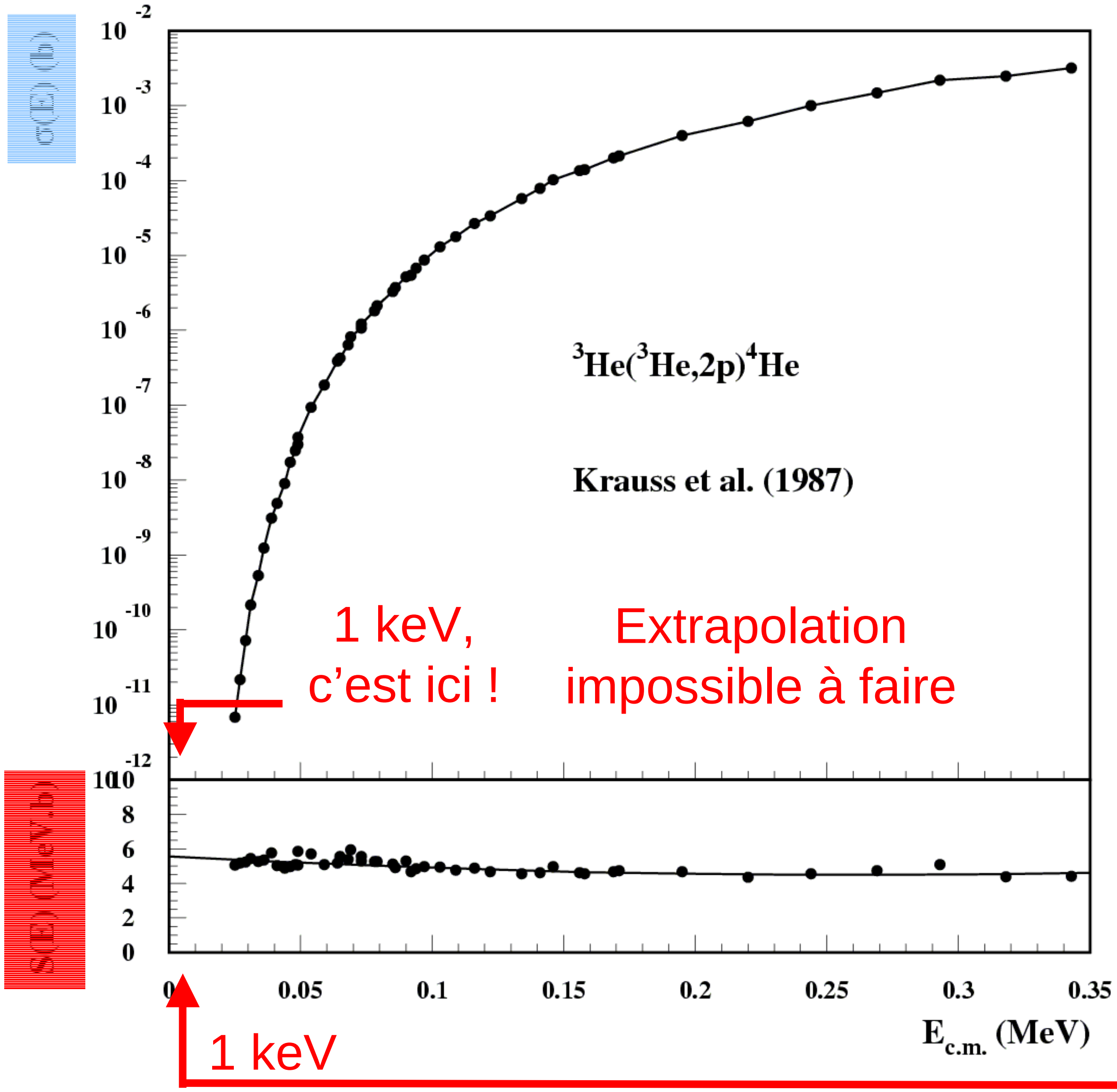
$$< \sigma v > = \sqrt{\frac{8}{\pi\mu}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \int_0^\infty \sigma(E) E\, e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

http://www.cococubed.com/code_pages/codes.shtml

http://www.phy.ornl.gov/astrophysics/data/cf88/

http://pntpm.ulb.ac.be/Nacre/nacre_d.htm

Réactions astro 3/11



1 keV,
c'est ici !

Extrapolation
impossible à faire

1 keV

Facteur astrophysique

$$\sigma(E) \equiv \frac{S(E)}{E}\exp(-2\pi\eta)$$

Pénétrabilité, effet tunnel
pour la barrière
coulombienne

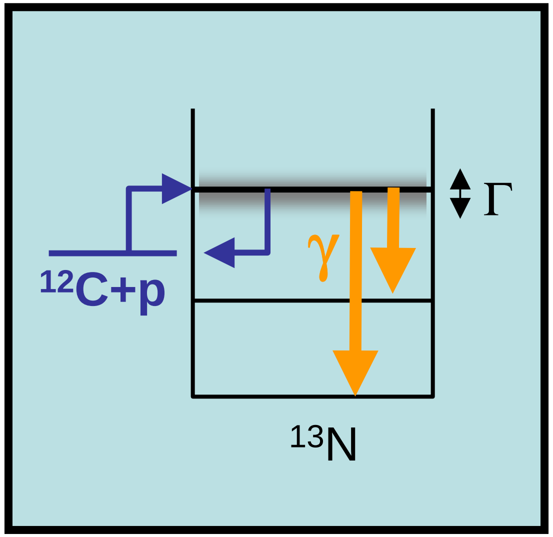
$$\eta = \frac{Z_1 Z_2}{\hbar\, v}\,\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0}$$

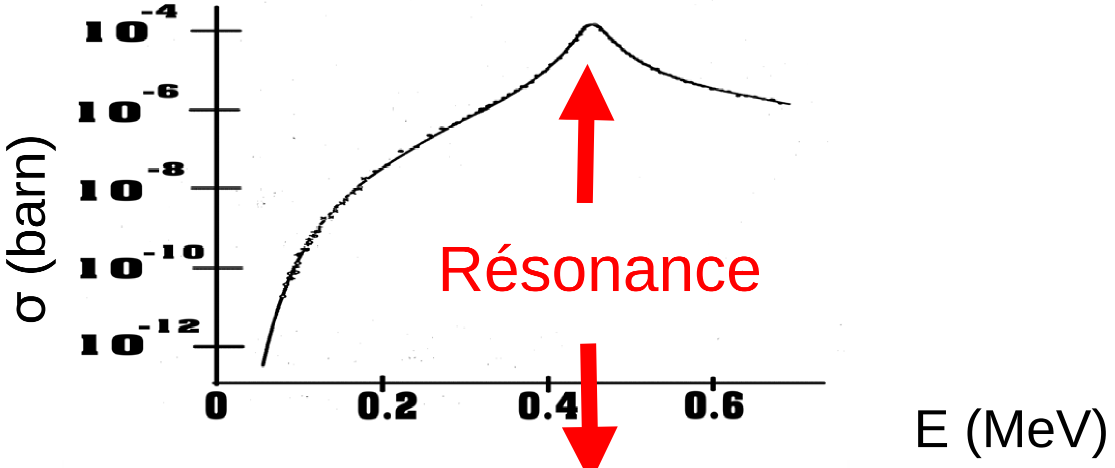
Facile à extrapoler,
pas besoin de
structure nucléaire

Réactions astro 4/11

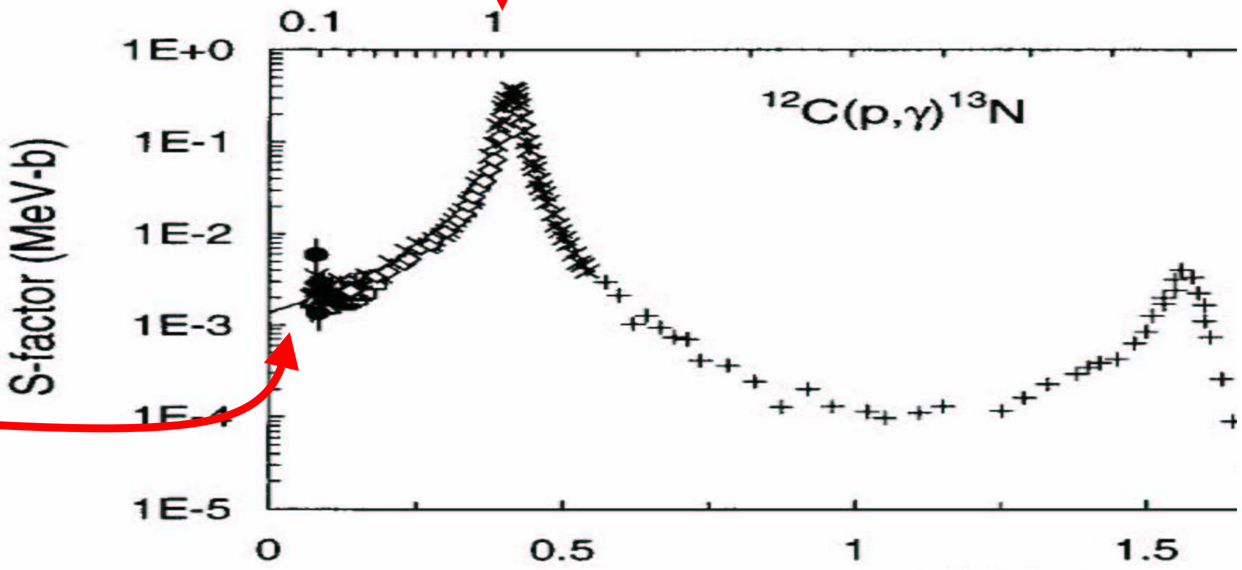
Un autre exemple : la capture radiative

$^{12}C(p,\gamma)^{13}N$





Résonance



Structure nucléaire nécessaire pour extrapoler !!!

Réactions astro 5/11

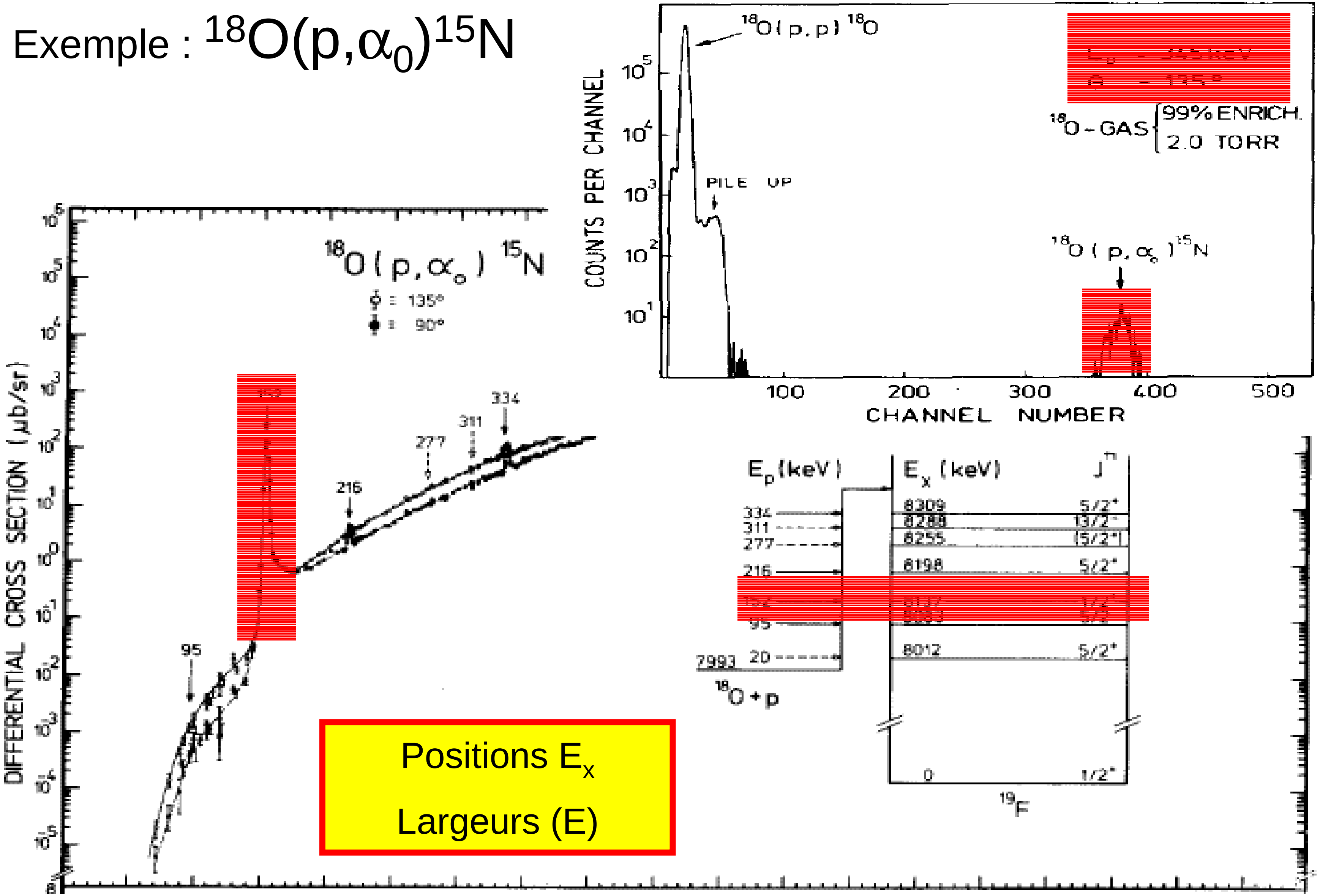
$$\underbrace{\sigma(E)}_{\text{La résonance est décrite avec la formule de Breit Wigner}} = \underbrace{\pi\bar{\lambda}^2}_{\frac{656.6}{A}\frac{1}{E}\,\text{barn}} \cdot \underbrace{\omega}_{\omega = \frac{2J_{NC}+1}{(2J_1+1)(2J_2+1)}} \cdot \frac{\Gamma_p(E)\Gamma_\gamma(E)}{(E-E_r)^2 + (\Gamma_{tot}(E)/2)^2}$$

il est nécessaire de connaître :

- La position des états excités,
- Les spins,
- Les largeurs,
- La dépendance des largeurs avec l’énergie

Réactions astro 6/11

Exemple : $^{18}O(p,\alpha_0)^{15}N$



Positions E_x

Largeurs (E)

H. Lorenz-Wirzba et al., NP A313 (1979)346

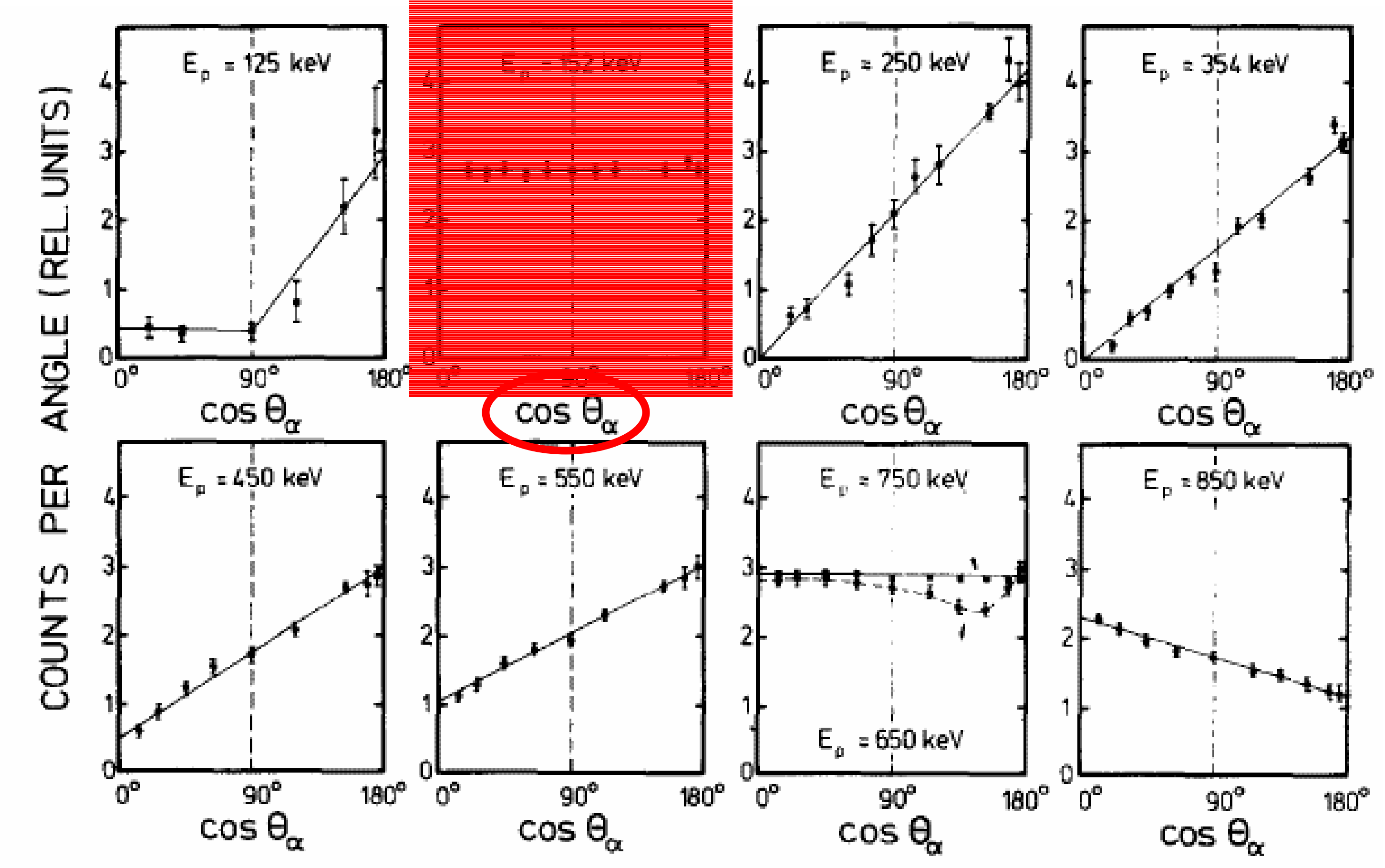
Réactions astro 7/11

Résonance à 152 keV

Isotrope, en accord avec $J^\pi = ½+$

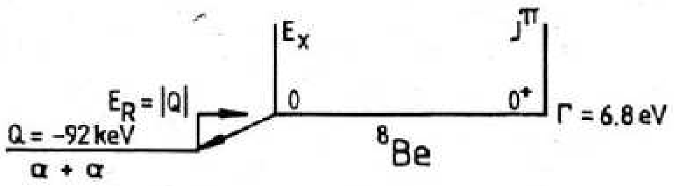
σ_{Total}

Spins (2 façons)

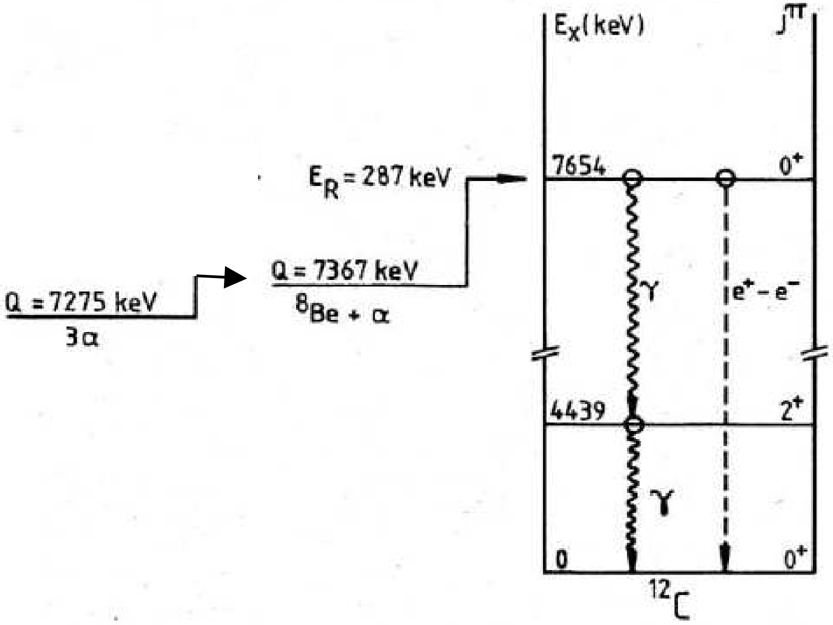


Réactions astro 8/11

FIRST STEP : $\alpha + \alpha \rightleftharpoons {}^{8}Be$



SECOND STEP : $^{8}Be(\alpha,\gamma)^{12}C$



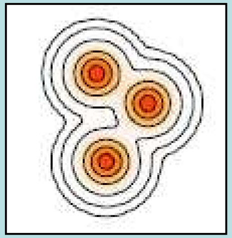
L'état de Hoyle

1954 Fred Hoyle
Il doit exister un état excité J=0+ (l=0) dans ^{12}C à ~7.7 MeV

1957 Cook et al., (PR 107, 508) découvrent l'état à 7.654 MeV.

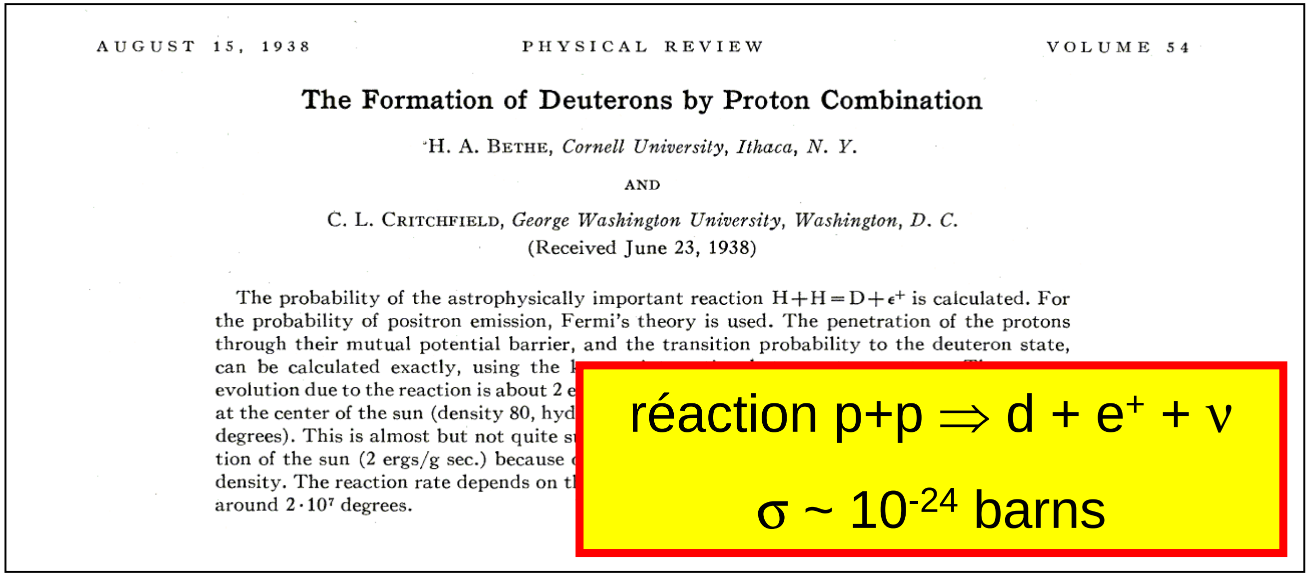
- $^{11}B(d,p)^{12}B$
- $^{12}B(\beta^-)^{12}C(0+)$
- $^{12}C(0+)(\alpha)^{8}Be(2\alpha)$

2007 L'état de Hoyle est décrit comme étant un état à 3 particules alpha, une espèce d'état de type condensat de Bose-Einstein



Phys. Rev. Lett. **98**, 032501 (2007)

Réactions astro 9/11



AUGUST 15, 1938 PHYSICAL REVIEW VOLUME 54

The Formation of Deuterons by Proton Combination

H. A. Bethe, *Cornell University, Ithaca, N. Y.*

and

C. L. Critchfield, *George Washington University, Washington, D. C.*

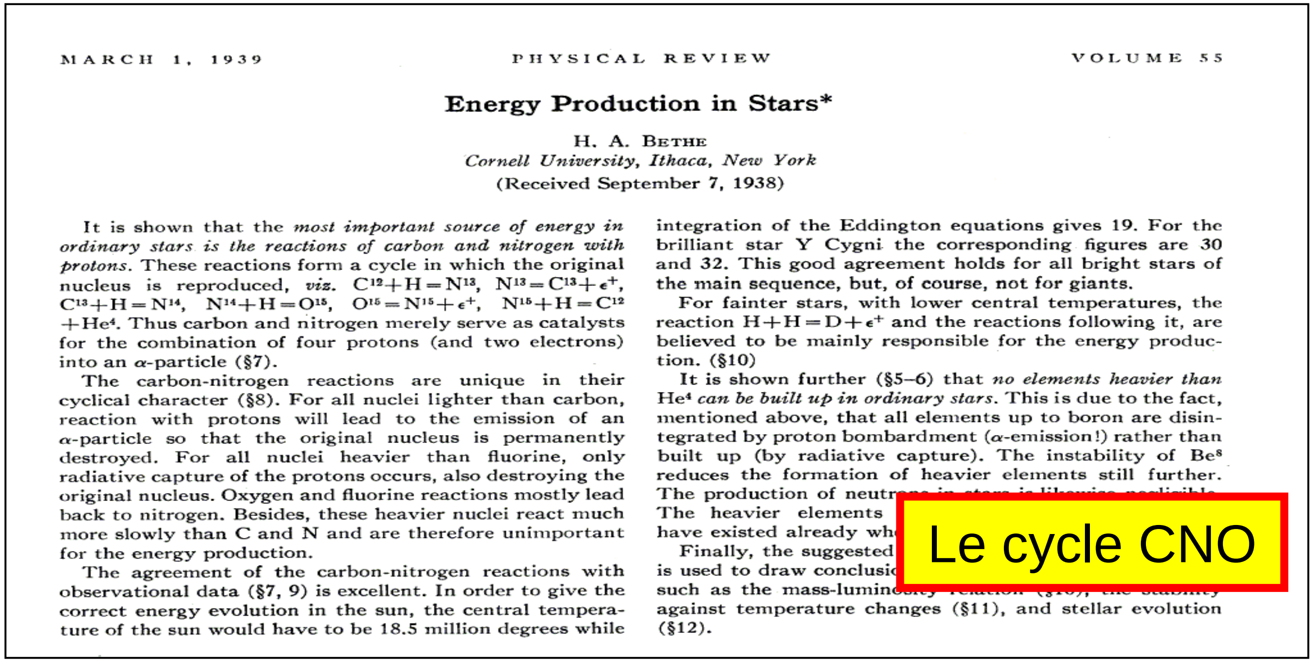
(Received June 23, 1938)

The probability of the astrophysically important reaction $H+H=D+\epsilon^+$ is calculated. For the probability of positron emission, Fermi's theory is used. The penetration of the protons through their mutual potential barrier, and the transition probability to the deuteron state,
can be calculated exactly, using the k
evolution due to the reaction is about 2 e
at the center of the sun (density 80, hyd
degrees). This is almost but not quite s
tion of the sun (2 ergs/g sec.) because
density. The reaction rate depends on t
around $2 \cdot 10^7$ degrees.

réaction p+p ⇒ d + e^+ + ν

σ ~ 10^{-24} barns

H. A. Bethe (1906 – 2005)



MARCH 1, 1939 PHYSICAL REVIEW VOLUME 55

Energy Production in Stars*

H. A. Bethe
Cornell University, Ithaca, New York

(Received September 7, 1938)

It is shown that the *most important source of energy in ordinary stars is the reactions of carbon and nitrogen with protons*. These reactions form a cycle in which the original nucleus is reproduced, *viz.* $C^{12}+H=N^{13}$, $N^{13}=C^{13}+\epsilon^+$, $C^{13}+H=N^{14}$, $N^{14}+H=O^{15}$, $O^{15}=N^{15}+\epsilon^+$, $N^{15}+H=C^{12}+He^4$. Thus carbon and nitrogen merely serve as catalysts for the combination of four protons (and two electrons) into an α-particle (§7).

The carbon-nitrogen reactions are unique in their cyclical character (§8). For all nuclei lighter than carbon, reaction with protons will lead to the emission of an α-particle so that the original nucleus is permanently destroyed. For all nuclei heavier than fluorine, only radiative capture of the protons occurs, also destroying the original nucleus. Oxygen and fluorine reactions mostly lead back to nitrogen. Besides, these heavier nuclei react much more slowly than C and N and are therefore unimportant for the energy production.

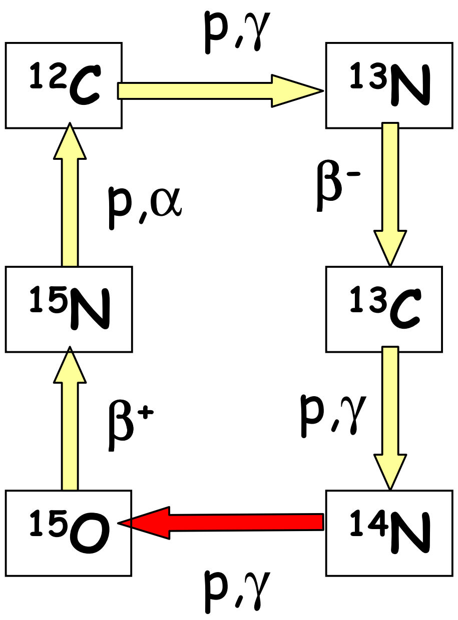
The agreement of the carbon-nitrogen reactions with observational data (§7, 9) is excellent. In order to give the correct energy evolution in the sun, the central temperature of the sun would have to be 18.5 million degrees while integration of the Eddington equations gives 19. For the brilliant star Y Cygni the corresponding figures are 30 and 32. This good agreement holds for all bright stars of the main sequence, but, of course, not for giants.

For fainter stars, with lower central temperatures, the reaction $H+H=D+\epsilon^+$ and the reactions following it, are believed to be mainly responsible for the energy production. (§10)

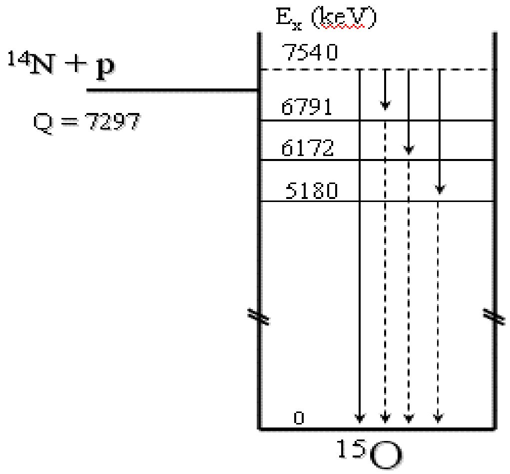
It is shown further (§5–6) that *no elements heavier than He^4 can be built up in ordinary stars*. This is due to the fact, mentioned above, that all elements up to boron are disintegrated by proton bombardment (α-emission!) rather than built up (by radiative capture). The instability of Be^8 reduces the formation of heavier elements still further.
The production of neutr
The heavier elements
have existed already wh

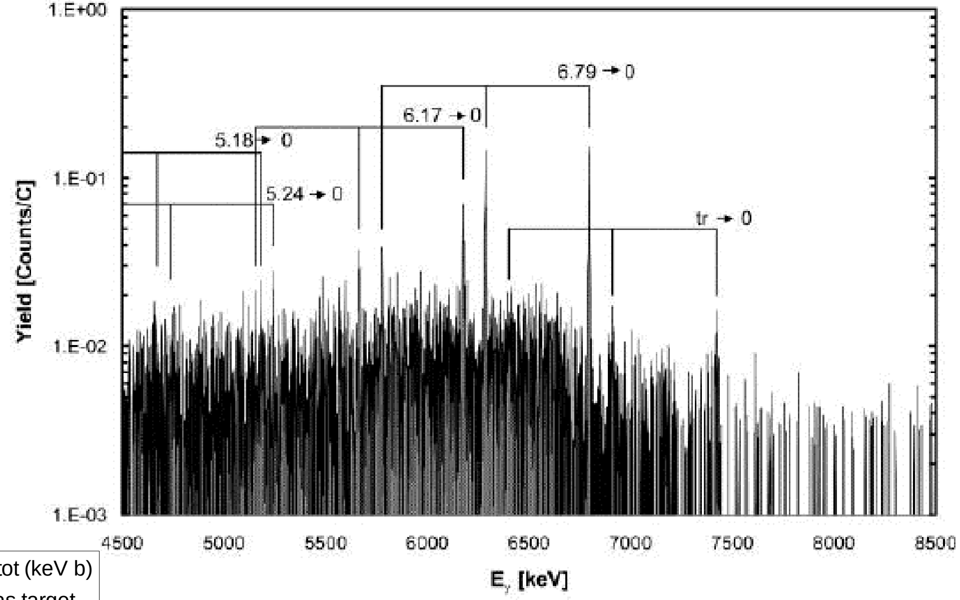
Finally, the suggested
is used to draw conclusi
such as the mass-lumin
against temperature changes (§11), and stellar evolution (§12).

Le cycle CNO

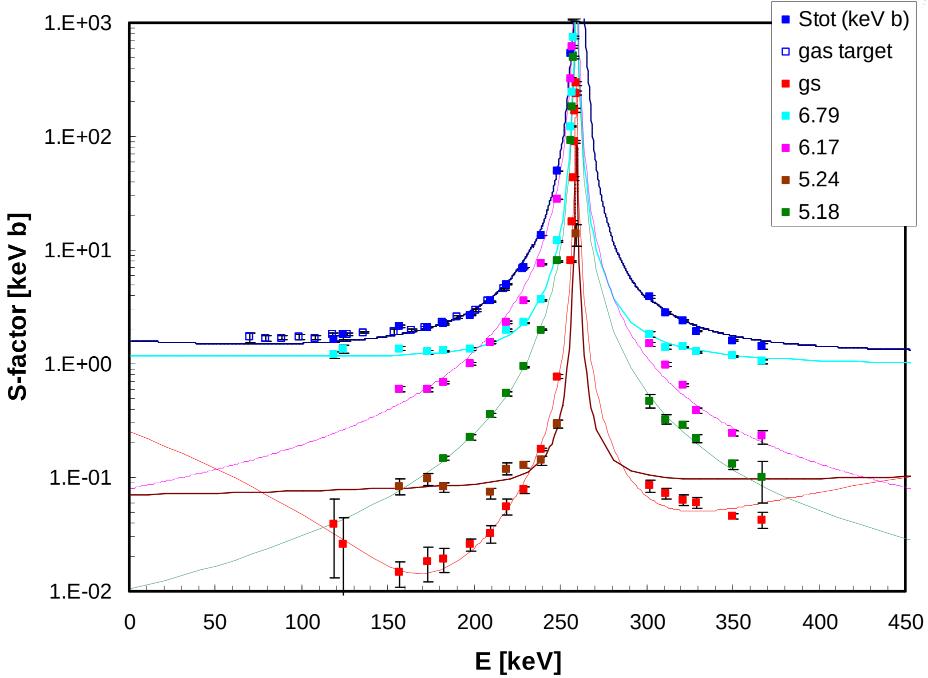


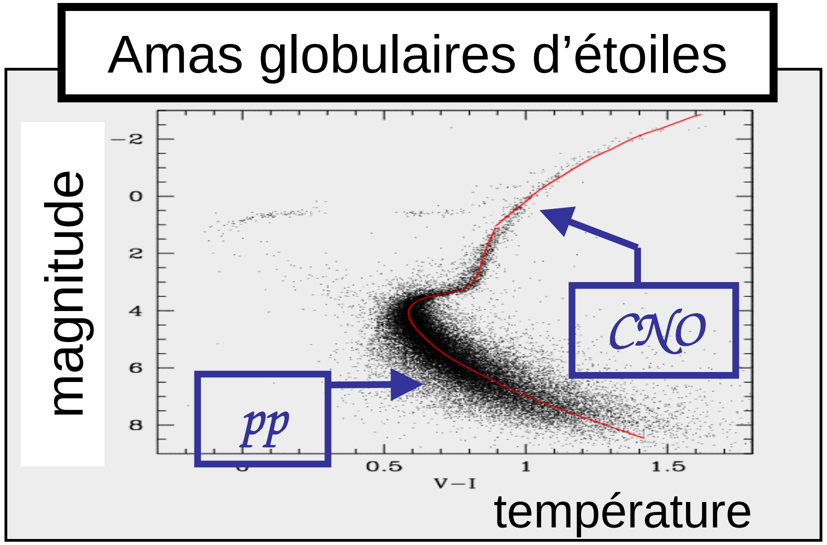
Réactions astro 10/11





LUNA – Gran Sasso - Italie





Amas globulaires d'étoiles

Age Univers > (14 ± 1) 10^9 ans

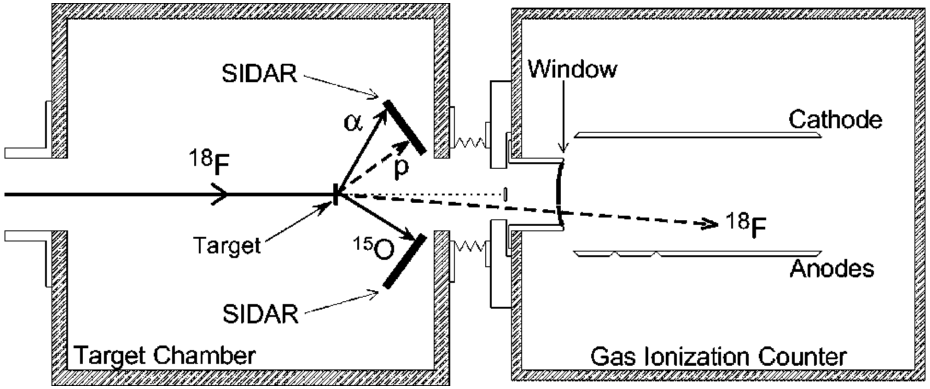
Imbriani *et al.* , Astronomy & Astrophysics, 420, 2004

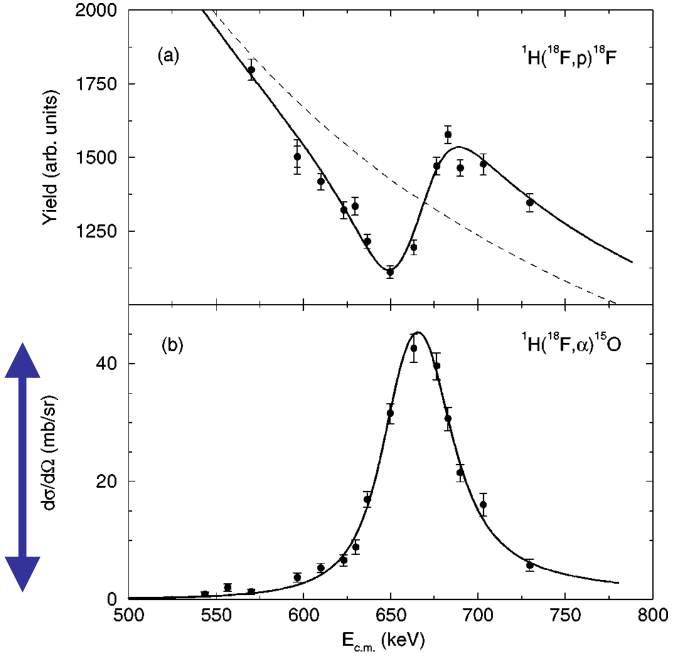
Réactions astro 11/11

Avec faisceaux radioactifs, étude de ^{18}F(p,α)^{15}O

Bardayan et al, Phys. Rev C, V63, 065802 (2001)

ORNL Holifield Radioactive Ion Beam Facility





0.5 b

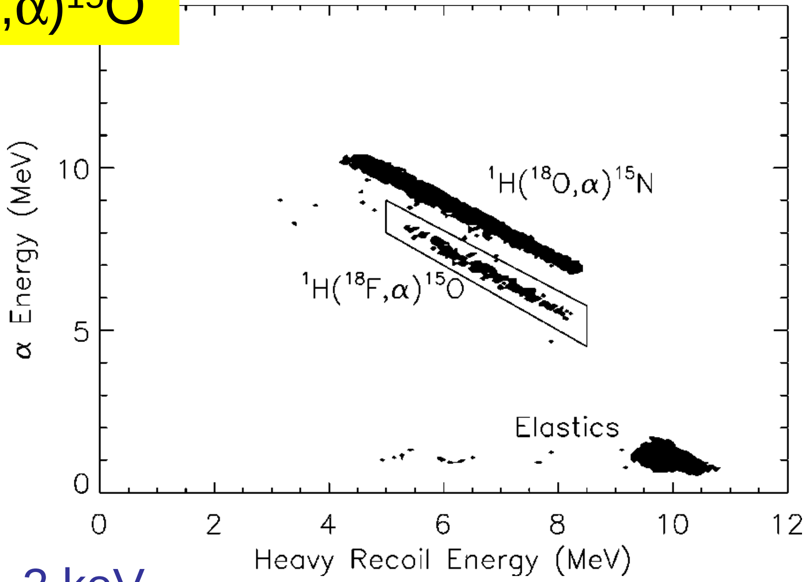
E_x = 7076 ± 2 keV

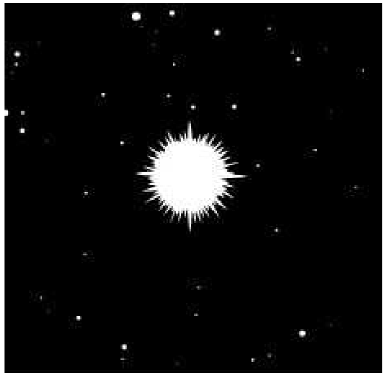
l=0

Γ= 39.0 ± 1.6 keV

Γ_p/Γ= 0.39 ± 0.02

$$J^{\pi} = \frac{3}{2}^{+}$$



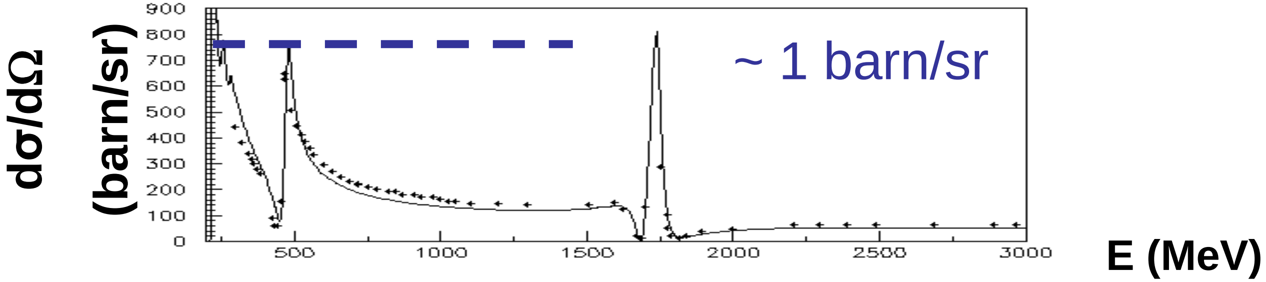


Novae

Emission de gamma

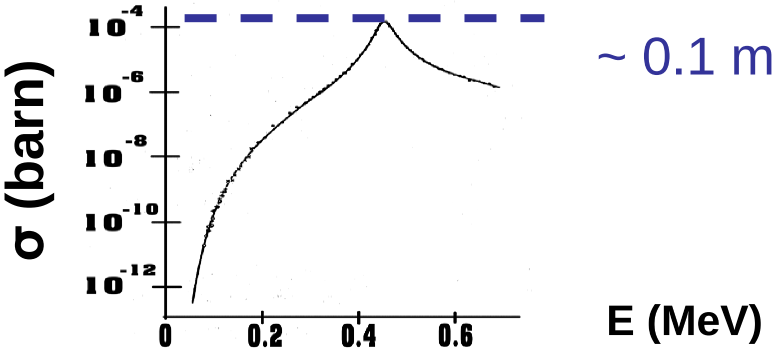
Diffusion inélastique 1/10

$^{12}C(p,p_0)^{12}C(g.s.)$



~ 1 barn/sr

$^{12}C(p,\gamma)^{12}C$

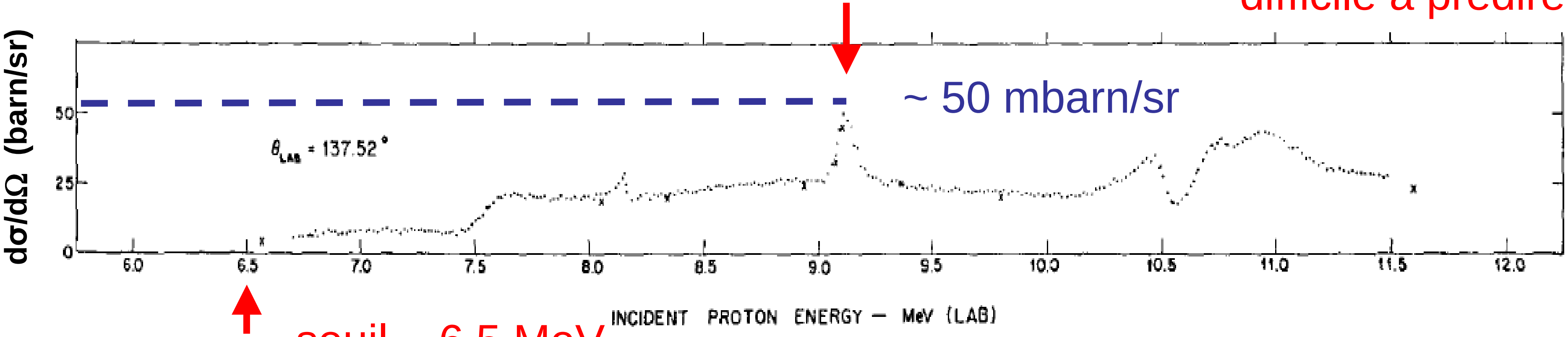


~ 0.1 mbarn

$^{12}C(p,p_1)^{12}C^*(4.44\ MeV)$

Diffusion inélastique résonante

Section efficace difficile à prédire



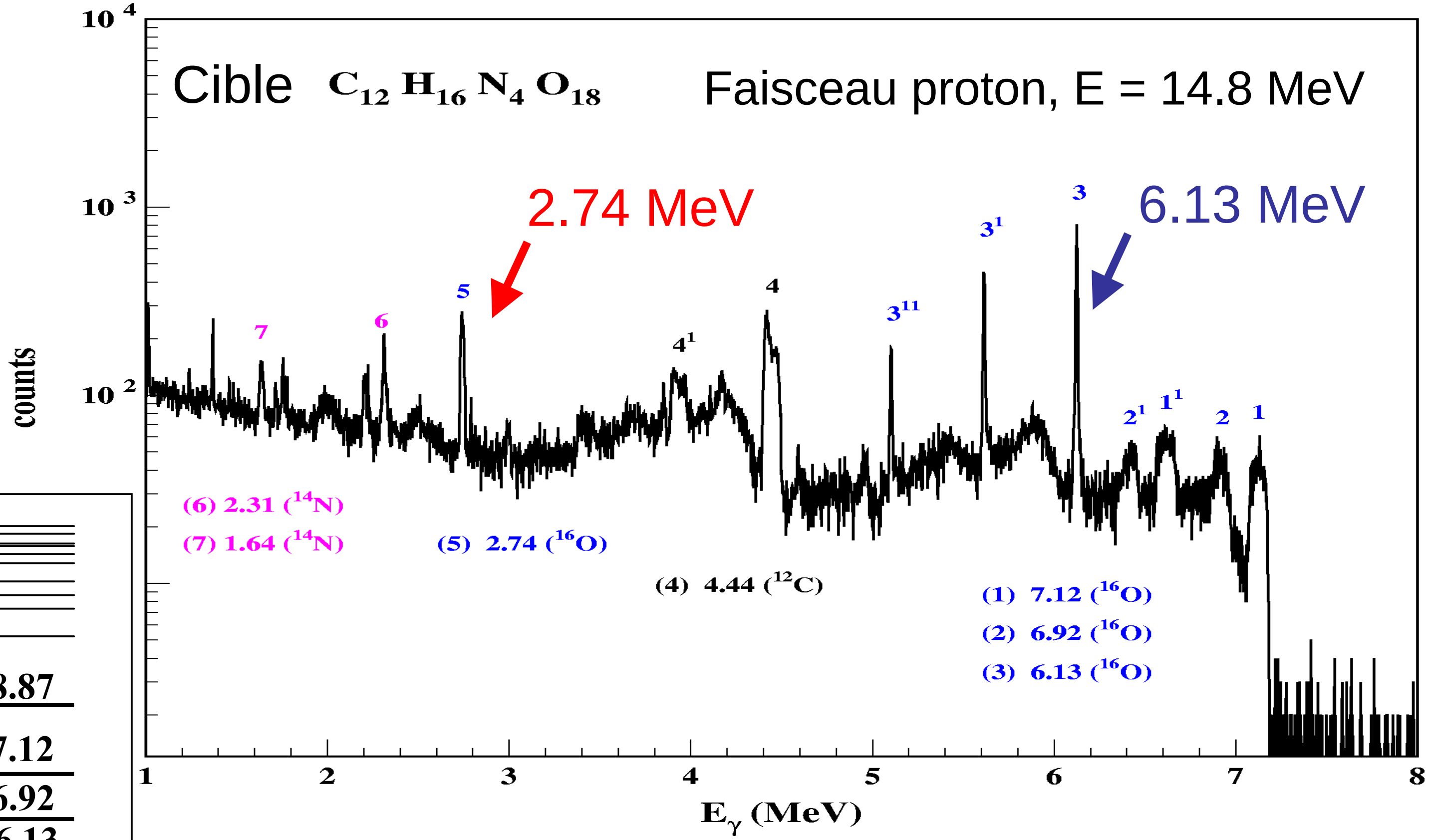
~ 50 mbarn/sr

seuil ~ 6.5 MeV

Diffusion inélastique 2/10

Faisceau sur cible épaisse.

On ne mesure que les gamma

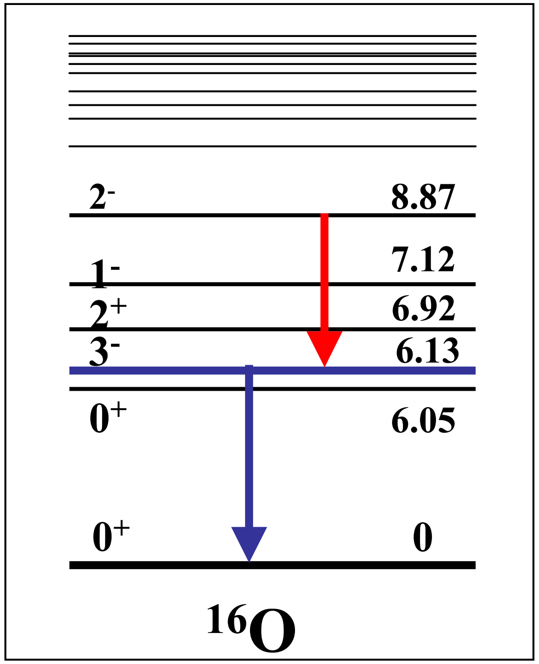


Cible $C_{12}H_{16}N_4O_{18}$

Faisceau proton, E = 14.8 MeV

2.74 MeV

6.13 MeV



1) On peut construire le schéma de niveaux avec les gammas, bonne résolution

2) On peut obtenir les rapports d'embranchement

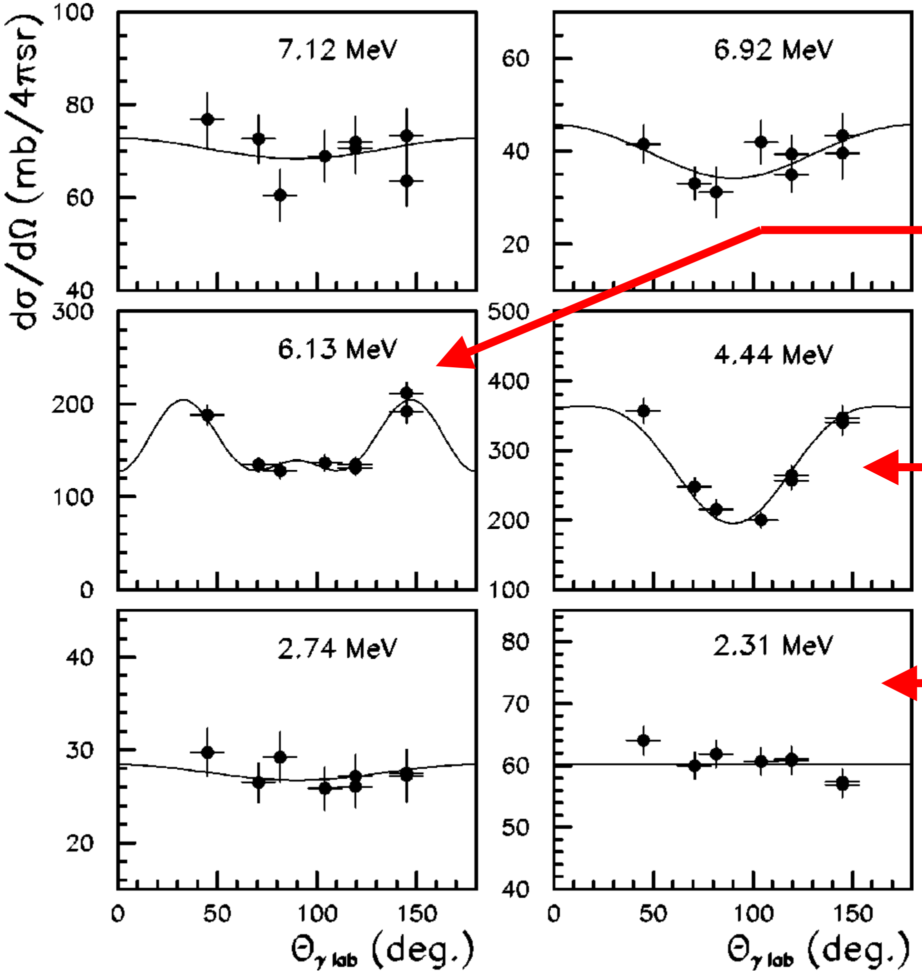
Kiener et al, Phys. Rev. C, 58, 2174 (1998)

Diffusion inélastique 3/10

Distribution angulaire

$$W(\Theta) = \sum_{l=0}^{l=l_{\max}} a_l \; Q_l \; P_l(\cos\Theta) \quad (l \;\; \text{even})$$

Polynôme de Legendre



^{16}O, l_{max}= 6, transition E3

^{12}C, l_{max}= 4, transition E2

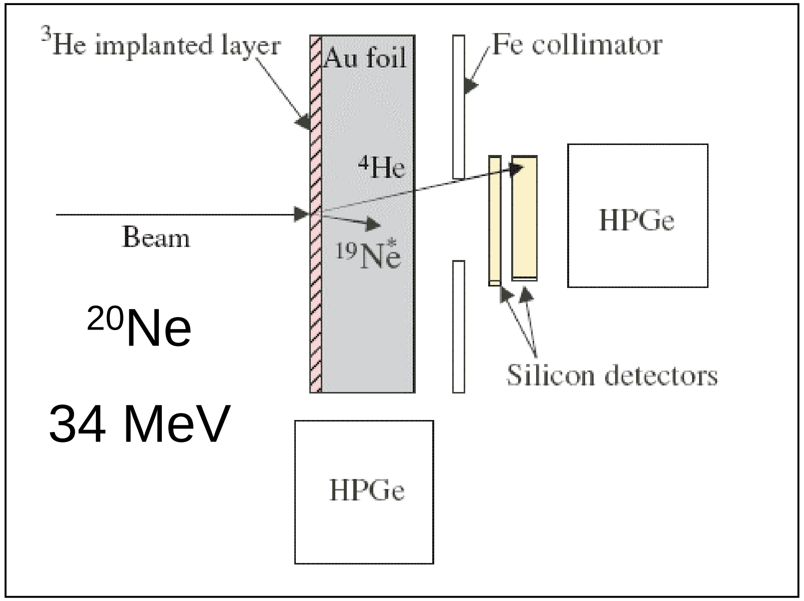
^{14}N, Isotrope, l_{max} = 0, J^{π} = 0+

3) Analyse distribution angulaire = spin

Kiener et al, Phys. Rev. C, 58, 2174 (1998)

Diffusion inélastique 4/10

DSAM (Doppler Shift Attenuation method)



^{20}Ne

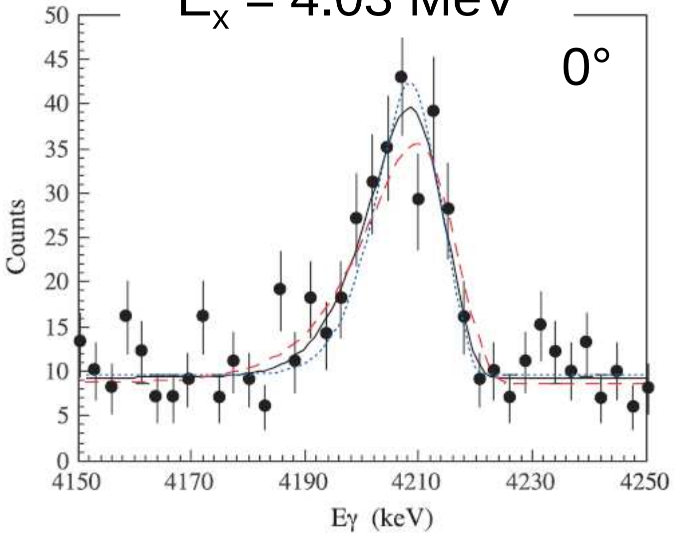
34 MeV

Effet Doppler

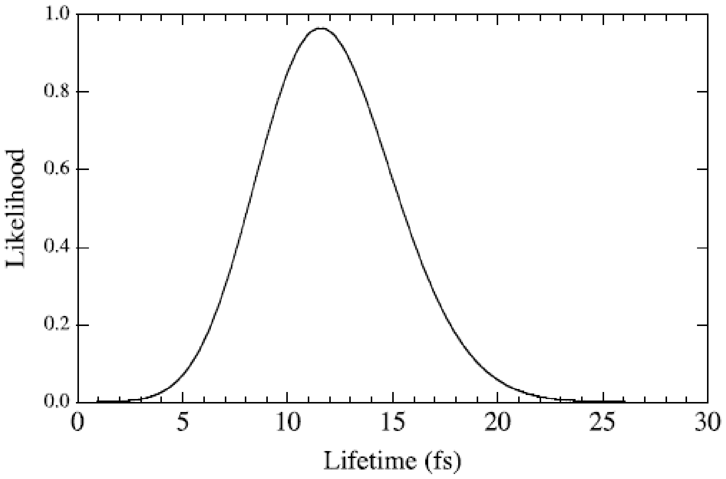
$$E_{\gamma,lab} = E_{\gamma,cm} \quad (1+ (v_{rec}/c) \, . \cos \theta_\gamma)$$

$$10^{-15} < t_{1/2}(s) < 10^{-11}$$

E_x = 4.03 MeV



Maximum de vraisemblance



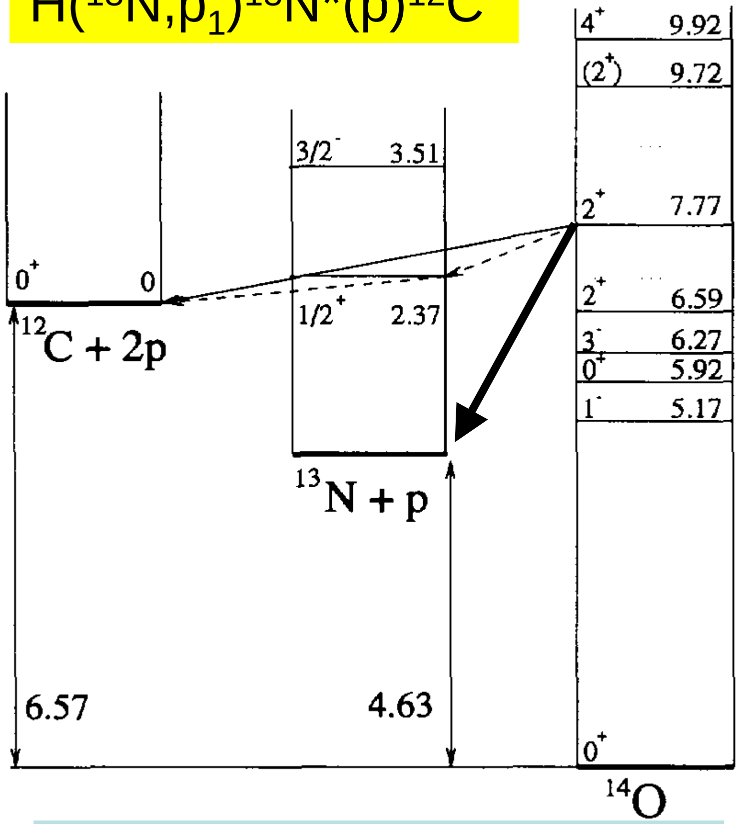
Kanungo et al, PRC74, 045803 (2006)

4) Analyse de la forme du pic = Mesure de durée de vie

Diffusion inélastique 5/10

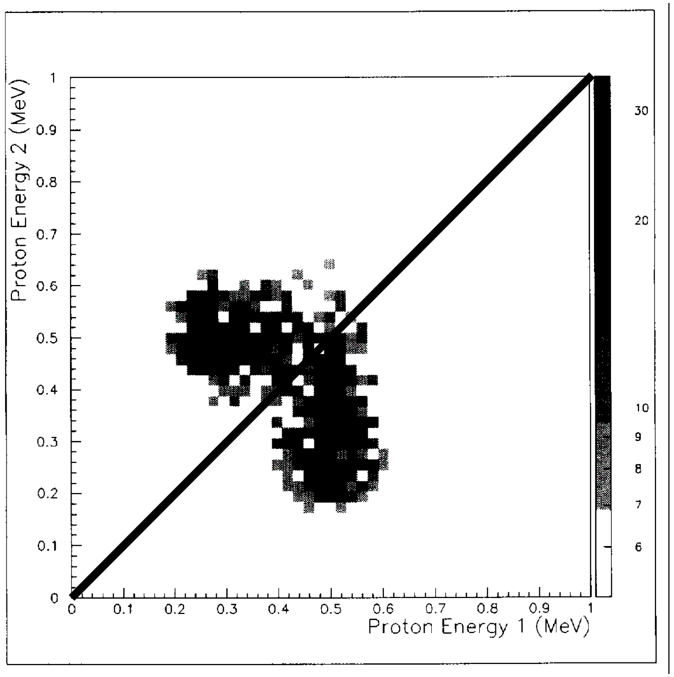
Emission résonante de 2 protons

$H(^{13}N,p_1)^{13}N^*(p)^{12}C$

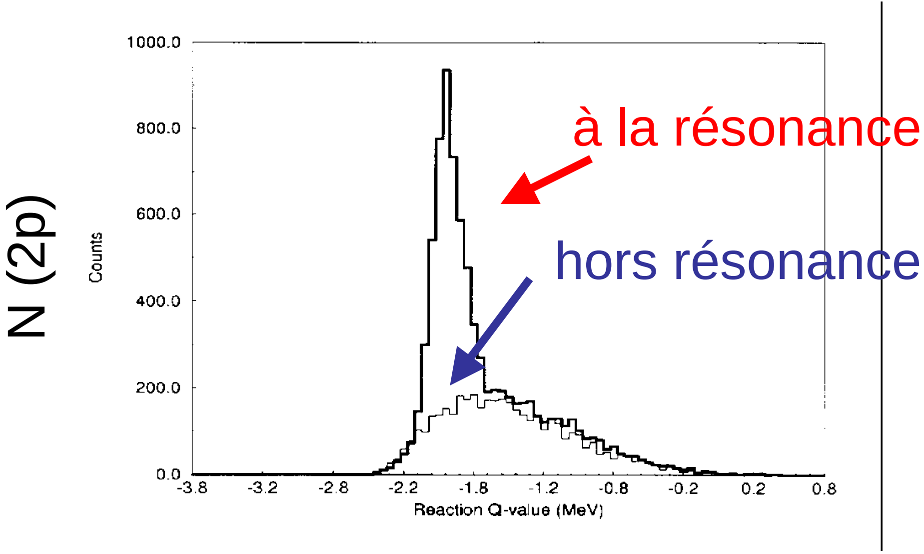


$$\Gamma_{2p} = 125 \pm 20\ \text{eV} \propto N_{2p}$$

$$\Gamma_{^2He} < 6\ \text{eV}$$



Bain et al, PLB 373, 35 (1996)



à la résonance

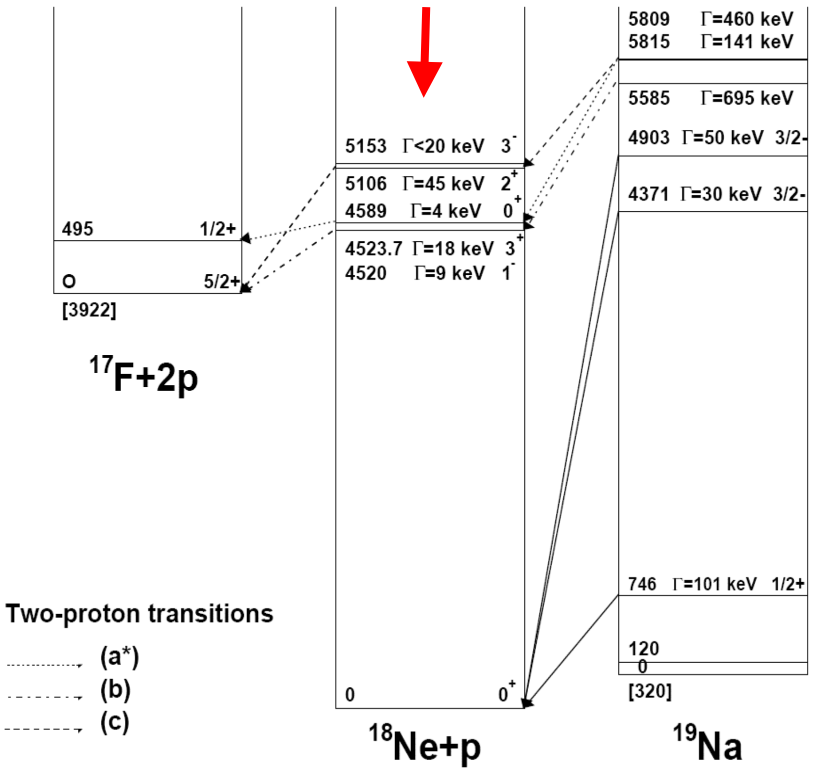
hors résonance

Diffusion inélastique 6/10

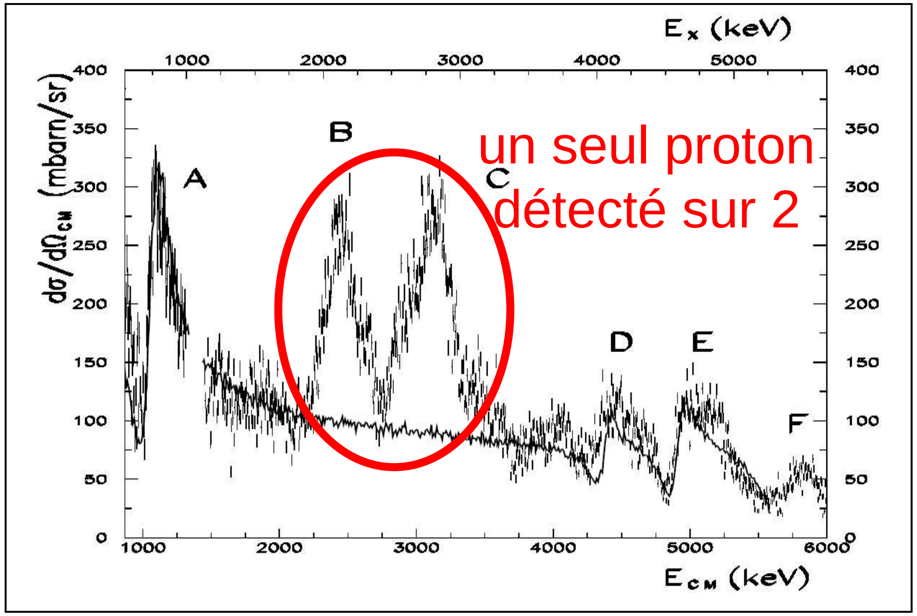
Première expérience SPIRAL

H(^{18}Ne,p)^{18}Ne

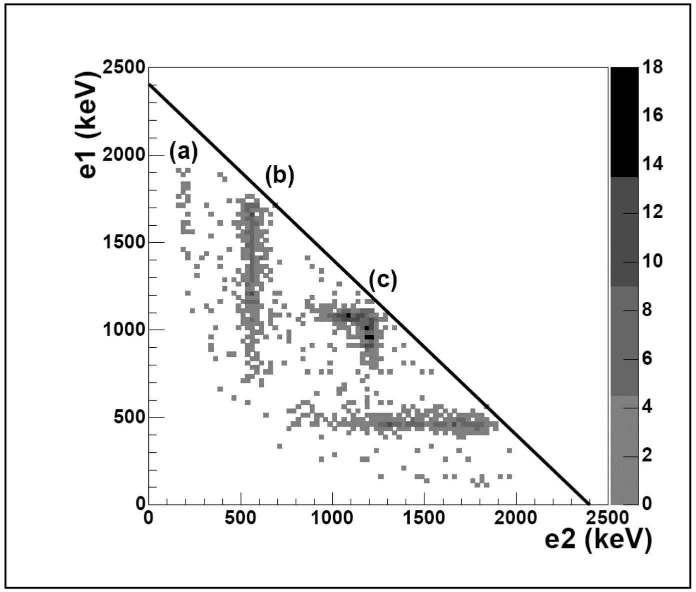
Étude de ces niveaux



(Surrogate method)



un seul proton détecté sur 2



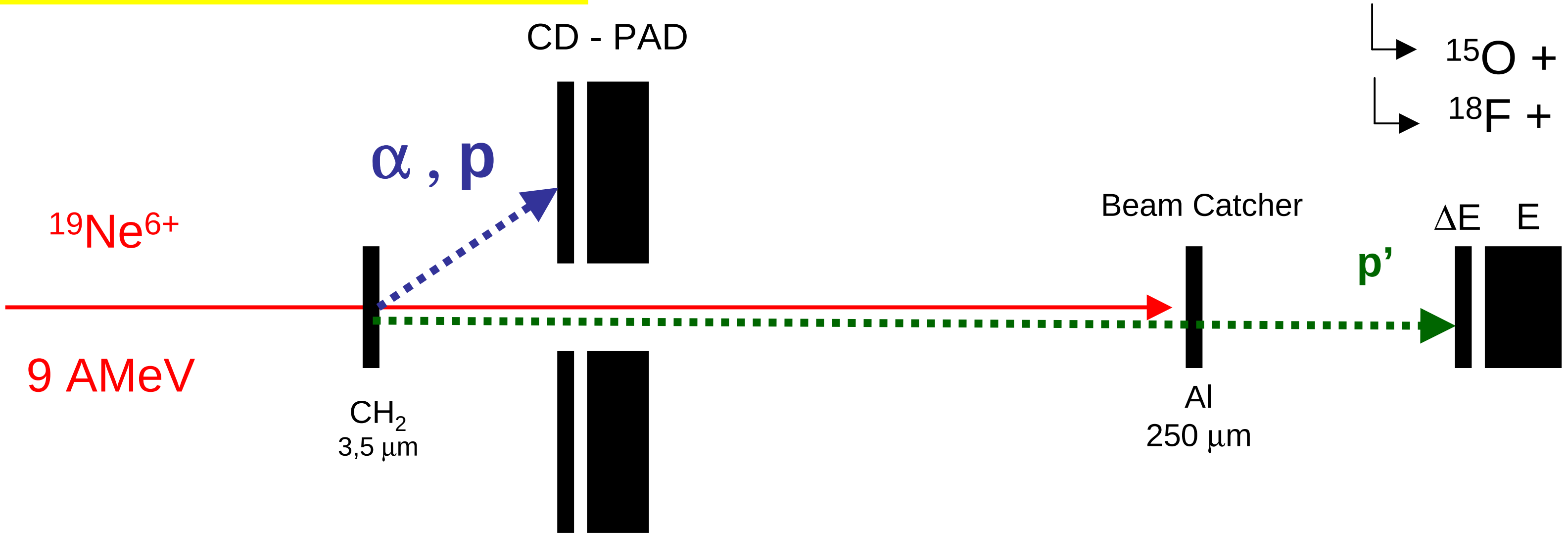
Diffusion inélastique 7/10

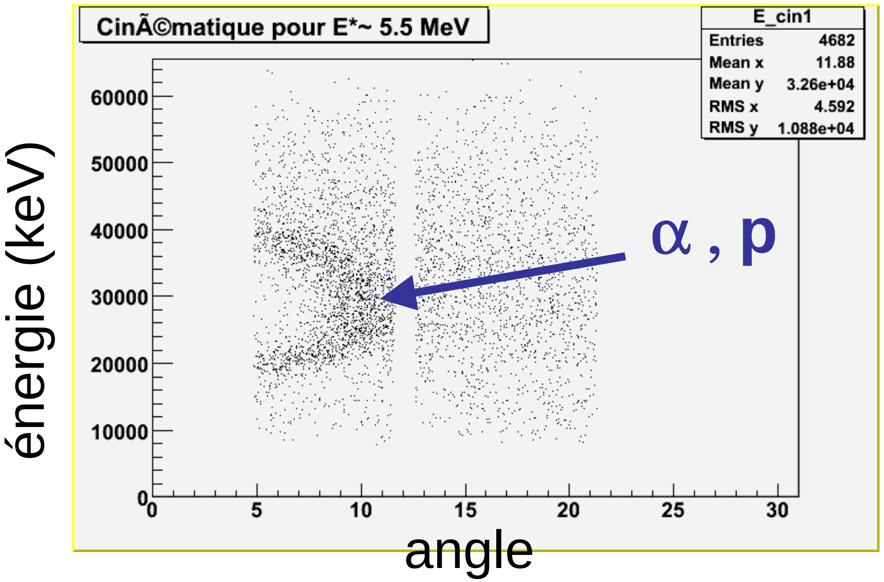
Emission résonante p-α

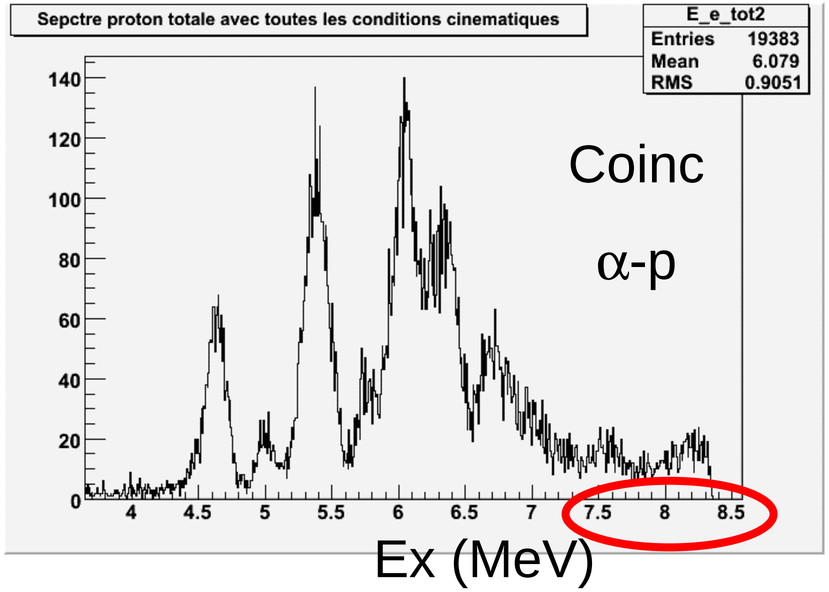
$^{19}Ne + ^{1}H \longrightarrow p' + ^{19}Ne^{*}$

$\hookrightarrow ^{15}O + \alpha$

$\hookrightarrow ^{18}F + p$







Thèse Jean-Christophe Dalouzy / GANIL

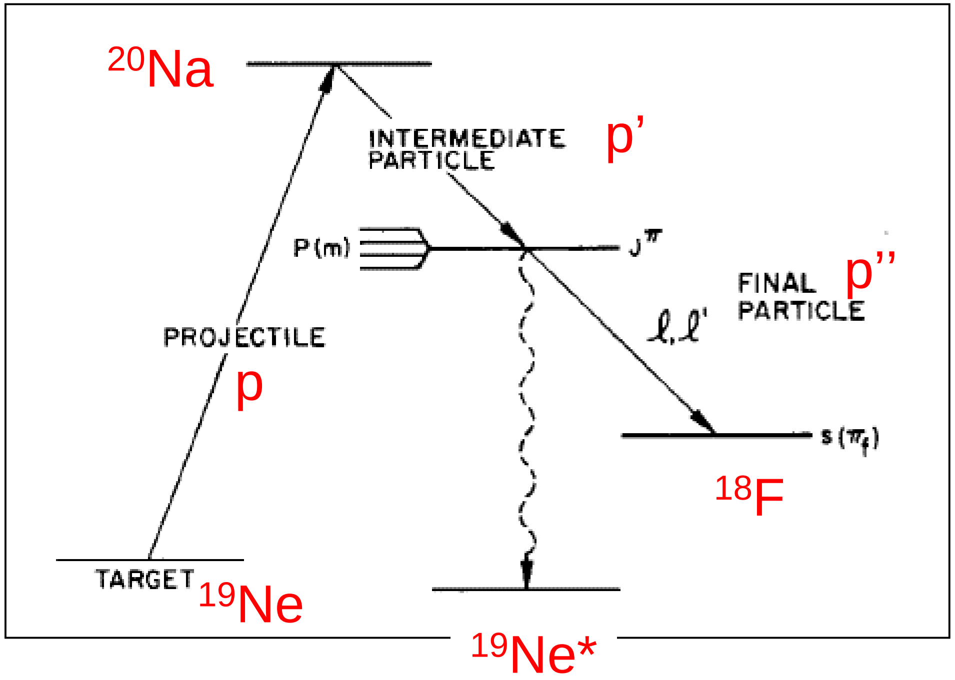
Diffusion inélastique 8/10

Analyse de corrélation angulaire

Prenons un exemple :

$$\begin{cases} {}^{19}\mathrm{Ne}(p,p')^{19}\mathrm{Ne}^*(3/2+,\ 7.07\ \mathrm{MeV}) \\ {}^{19}\mathrm{Ne}^*(p'')^{18}\mathrm{F} \end{cases}$$

- protons p’ détectés à zéro degrés
- protons p’’ détectés en coïncidence à l’angle θ



$$ {}^{19}\mathrm{Ne}^* \rightarrow {}^{18}\mathrm{F} + \mathrm{p} $$

$$ \frac{3}{2}^{+} \qquad \underbrace{1^{+} + \frac{1}{2}^{+}}_{s=\left(\frac{1}{2};\frac{3}{2}\right)} + \ell $$

$$ \Rightarrow \quad \left(s=\frac{3}{2};\ell=0\right) \quad \left(s=\frac{1}{2};\ell'=2\right) $$

Diffusion inélastique 9/10

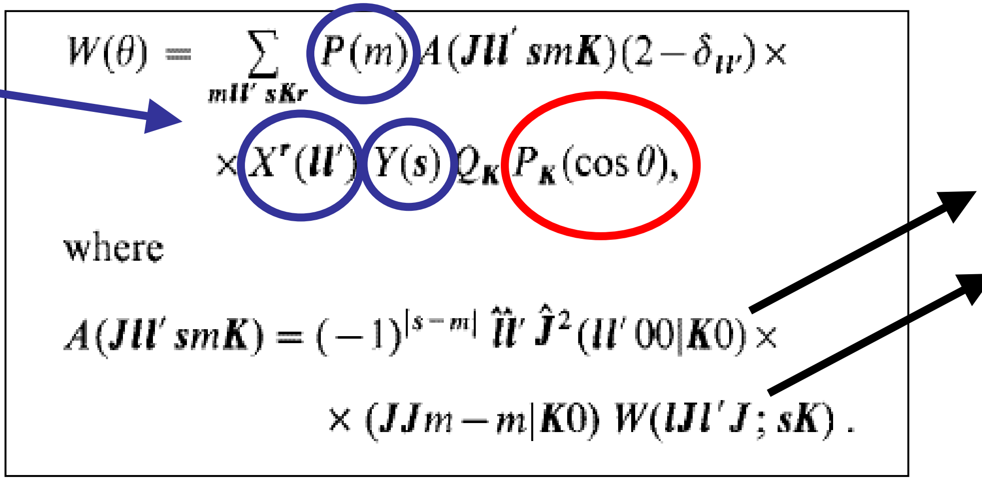
Ferguson « Angular correlation methods … »North-Holland Publ. 1965

Pronko et al, NIM98,445 (1972)

$$\sigma \propto \underbrace{W(\theta)}_{\text{Fonction de corrélation}}\, \mathrm{d}\Omega$$

populations,

paramètres libres



$$W(\theta) = \sum_{m l l' s K r} P(m) A(J l l'\, s m K)(2-\delta_{ll'}) \times X^r(ll')\, Y(s)\, Q_K P_K(\cos\theta),$$

where

$$A(J l l'\, s m K) = (-1)^{|s-m|}\, \hat{l}\hat{l}'\, \hat{J}^2 (l l'\, 00|K0) \times (J J m -m|K0)\, W(l J l' J; sK)\,.$$

Clesch-Gordan

Racah coef.

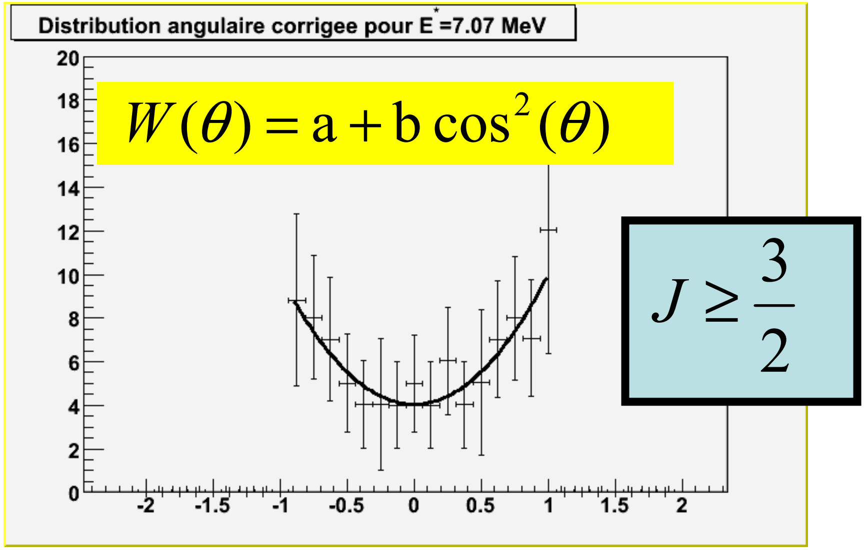
$$K_{\max} = \min(2J;2\ell) \quad \text{pair}$$

$$2J = 3 \quad 2\ell = 0\,;4$$

$$K_{\max} = (0;2)$$

$$W(\theta) = \mathrm{a} + \mathrm{b}\cos^2(\theta)$$

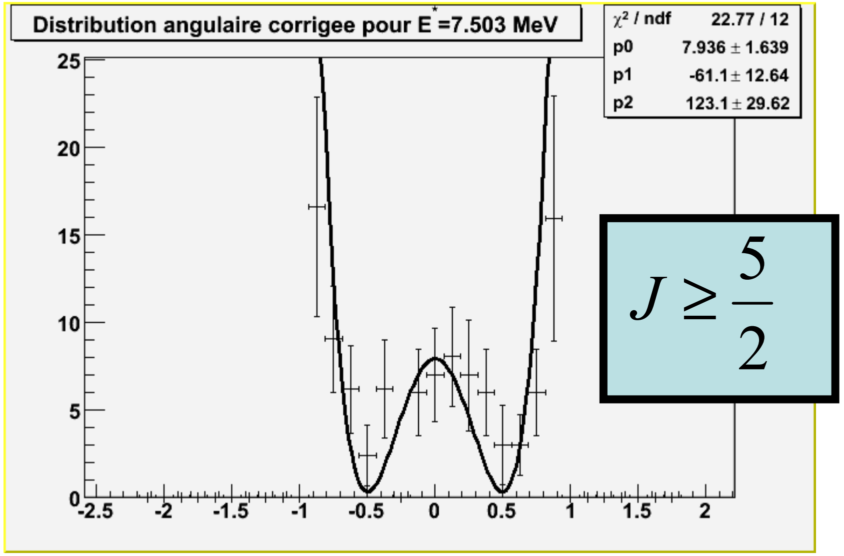
Diffusion inélastique 10/10



$$W(\theta) = \mathrm{a} + \mathrm{b}\cos^2(\theta)$$

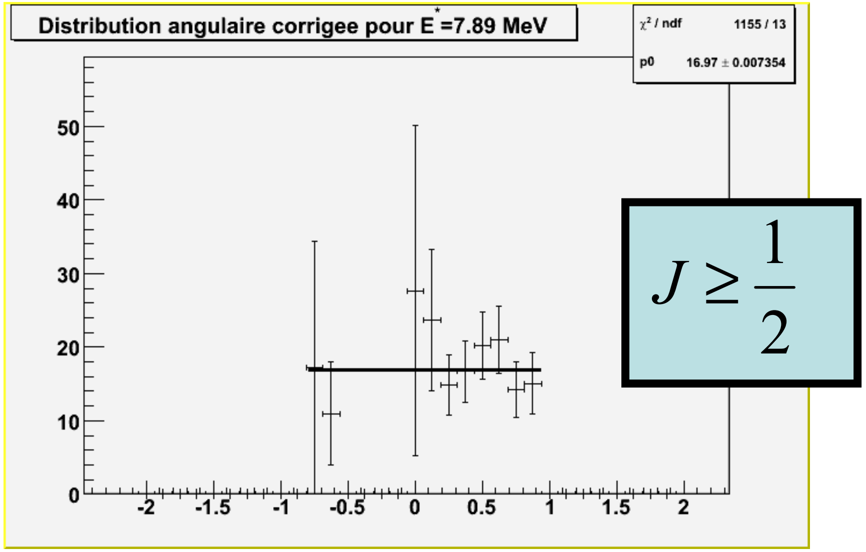
$$J \geq \frac{3}{2}$$

cos(θ)



$$J \geq \frac{5}{2}$$

cos(θ)



$$J \geq \frac{1}{2}$$

cos(θ)

^{19}Ne + ^{1}H ⟶ **p’** + ^{19}Ne*

↳ ^{18}F + **p’’**

$$W(\theta) = \sum_K a_K P_K(\cos\theta)$$

$$J \geq \frac{K_{\max}}{2}$$

On mesure les spins !

Thèse Jean-Christophe Dalouzy / GANIL

Résultats Préliminaires

Résumé général - final

Réactions aux basses énergies

Diffusion Coulombienne	Normalisation, identification (cible, faisceau)
Diffusion Elastique Résonante	Energie des états excités au dessus du seuil, spin et parité, largeurs partielles et totale…
Réactions Astro	Energie des états excités, spin et parité, largeurs partielles et totale, rapports d’embranchements, modes de décroissance
Diffusion Inélastique	Energie de tous les états excités, spin et parité, largeurs, rapports d’embranchement, mesure directe de temps de vie « longs », modes de décroissance

- Faisceaux Radioactifs
- Haute résolution
- Modes de décroissance
- Astro …

Perspectives