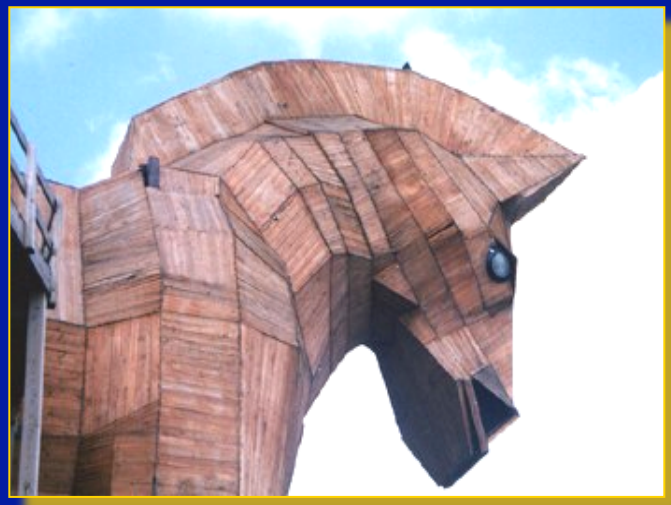
PREMIALE
LNS- ASTROFISICA NUCLEARE

Claudio Spitaleri

Dipartimento di Fisica ed Astronomia, Catania University-Italy
Laboratori Nazionali del Sud- Catania-Italy

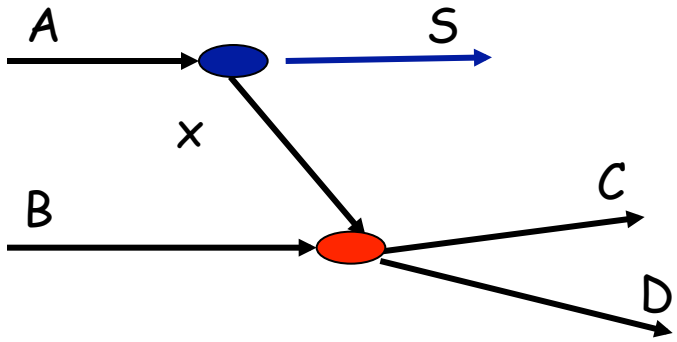
The TROJAN HORSE METHOD



Trojan Horse Method (THM)

The THM is an indirect technique to determine the **bare nucleus astrophysical S-factor** for rearrangement reaction. at astrophysical energies

(GAMOW ENERGY).



(x = charged particle or neutron)

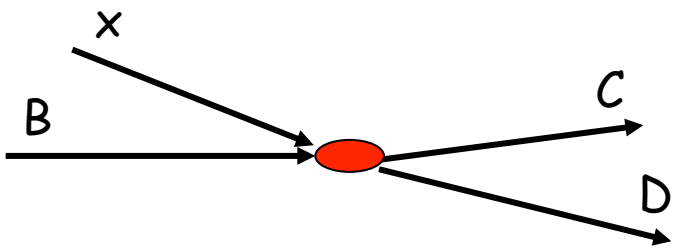
x -> partecipant

S -> spectator

Trojan Horse Method (THM)

Basic idea:

It is possible to extract astrophysically the relevant two-body cross section σ

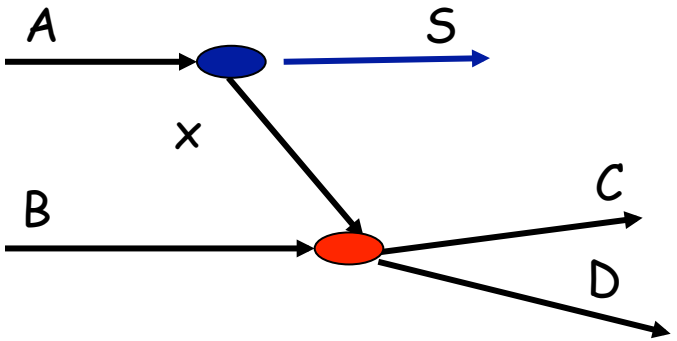


B + x → C + D

from **quasi- free contribution**

of an appropriate three-body reaction

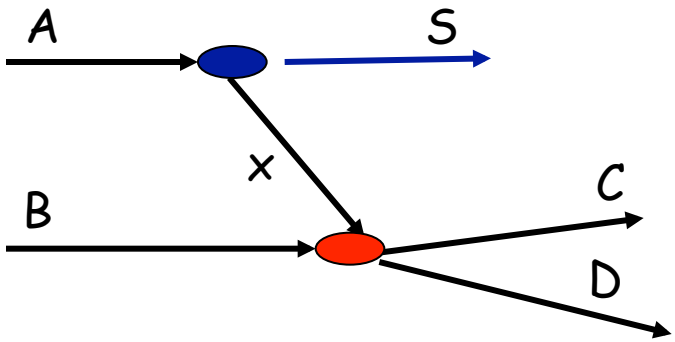
A + B → C + D + S



G.Baur: Phys. Lett.B178,(1986),135

This description is called
Impulse Approximation

A + B → C + D + S

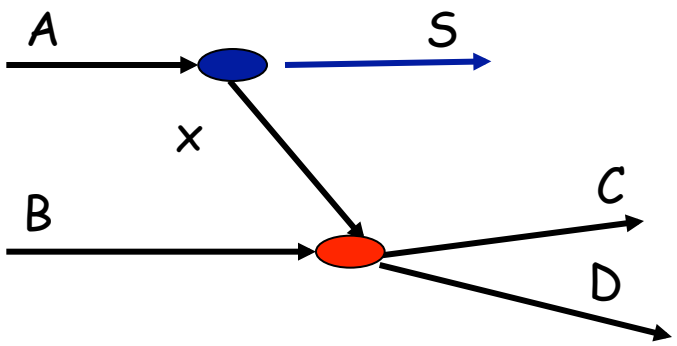


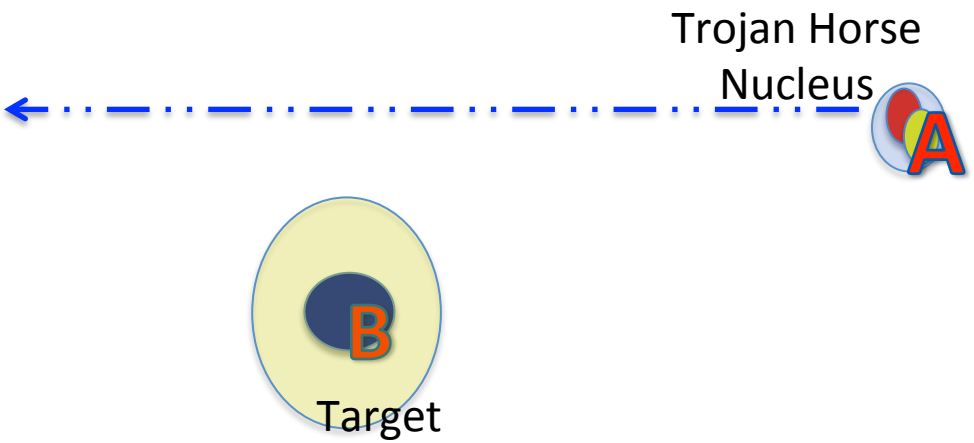
Quasi-free mechanism

The measurement is done with **quasi-free kinematics,** in which a "**TH nucleus**" **A = x ⊕ S**

is accelerate to energies above the Coulomb barrier.

$$E_{AB} > E_{AB}^{Coul.Bar.}$$



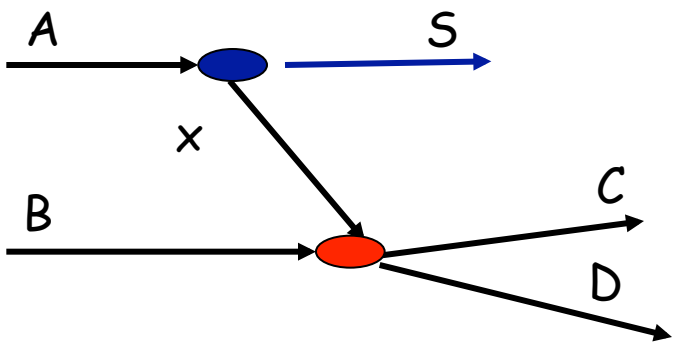


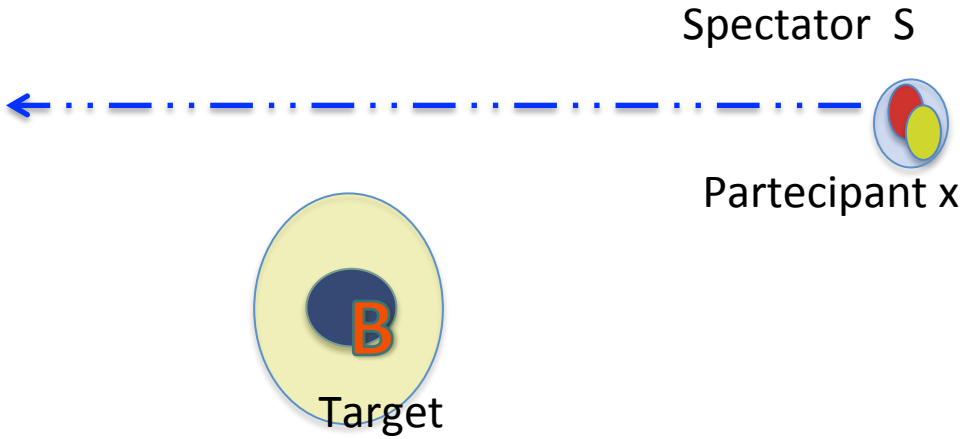
Quasi-free mechanism

The measurement is done with **quasi-free kinematics,** in which a "**TH nucleus**" **A = x ⊕ S**

is accelerate to energies above the Coulomb barrier.

$$E_{AB} > E_{AB}^{Coul.Bar.}$$



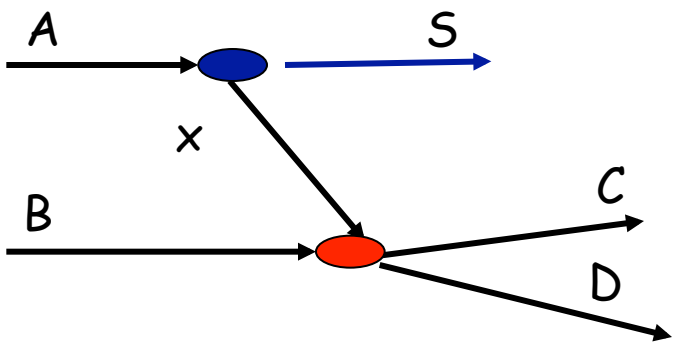


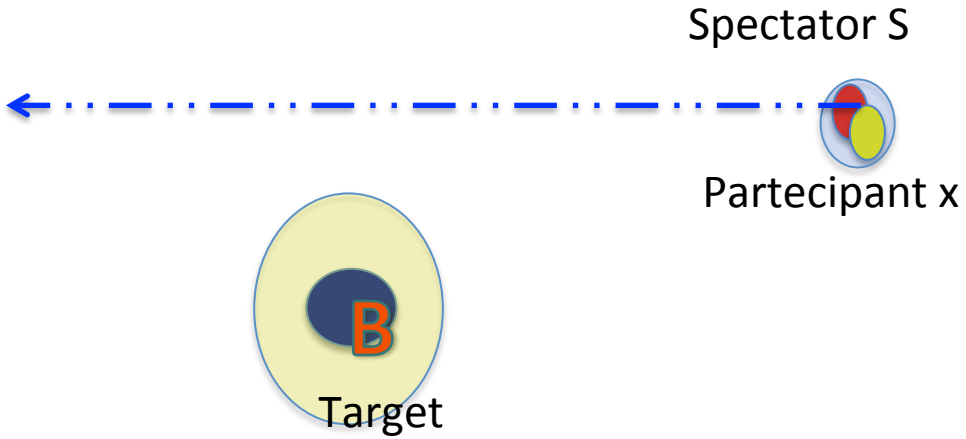
Quasi-free mechanism

The measurement is done with **quasi-free kinematics,** in which a "**TH nucleus**" **A = x ⊕ S**

is accelerate to energies above the Coulomb barrier.

$$E_{AB} > E_{AB}^{Coul.Bar.}$$



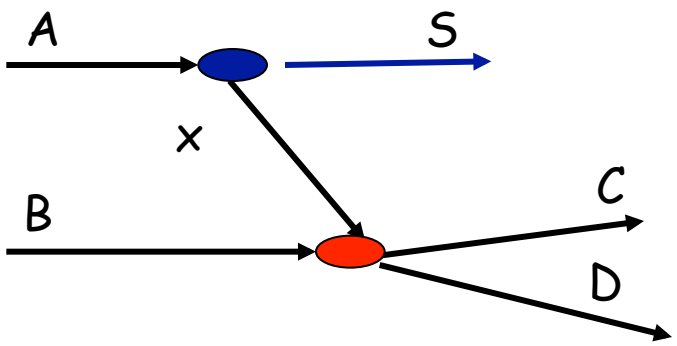


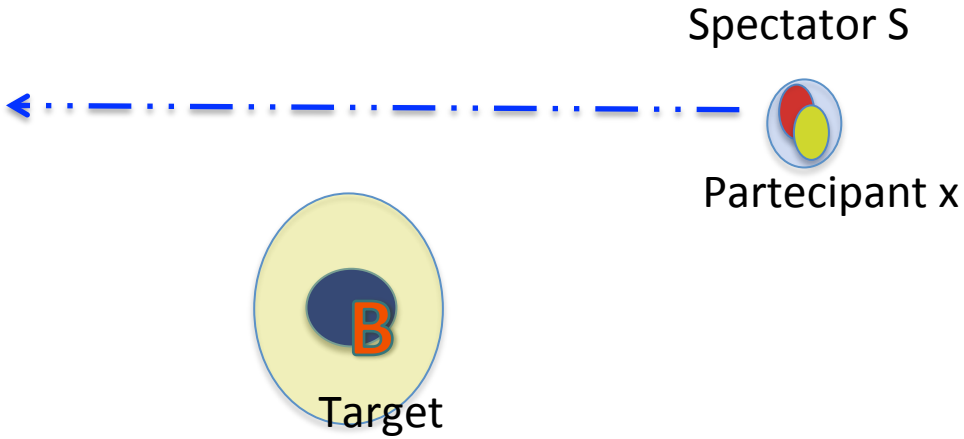
Quasi-free mechanism

The measurement is done with **quasi-free kinematics,** in which a "**TH nucleus**" **A = x ⊕ S**

is accelerate to energies above the Coulomb barrier.

$$E_{AB} > E_{AB}^{Coul.Bar.}$$



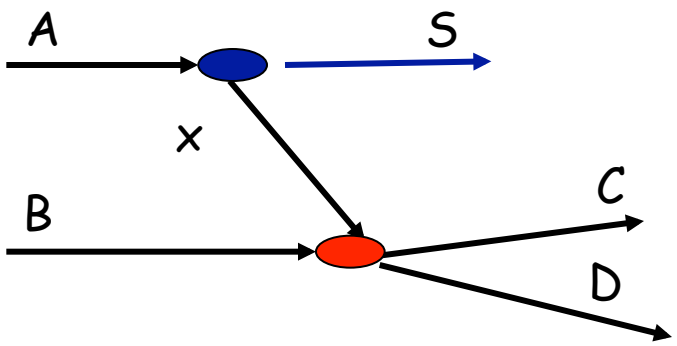


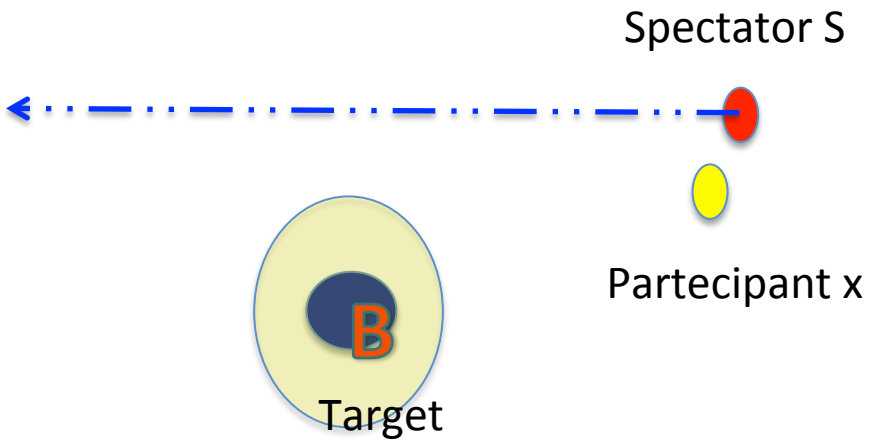
Quasi-free mechanism

The measurement is done with **quasi-free kinematics,** in which a "**TH nucleus**" **A = x ⊕ S**

is accelerate to energies above the Coulomb barrier.

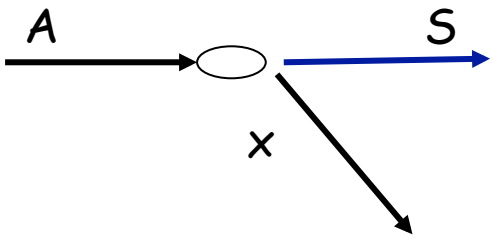
$$E_{AB} > E_{AB}^{Coul.Bar.}$$



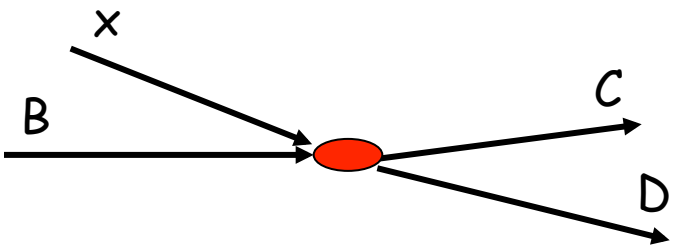


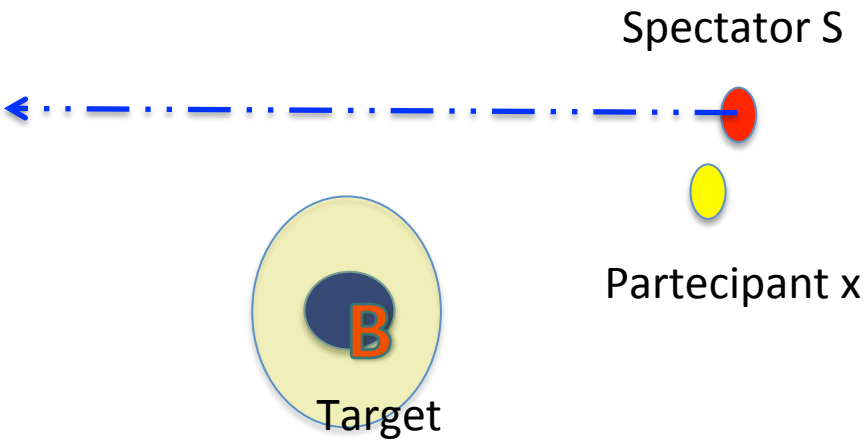
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus **A** breaks up,



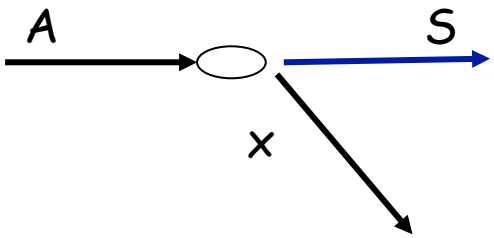
leaving **x** to interact with the target **B** while the projectile fragment **S** flies away.



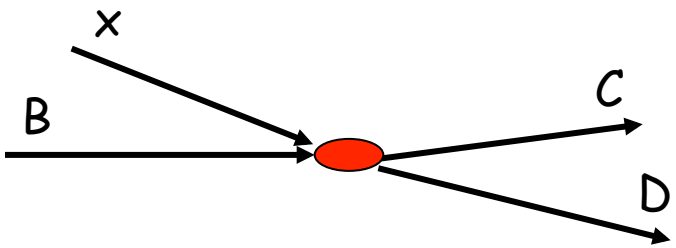


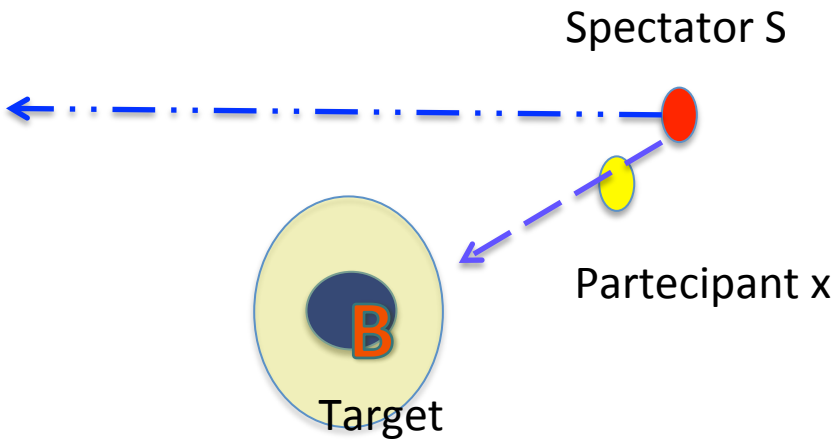
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus A breaks up,



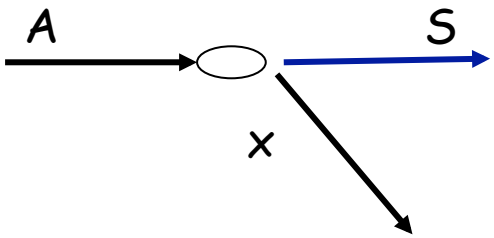
leaving x to interact with the target B while the projectile fragment S flies away.



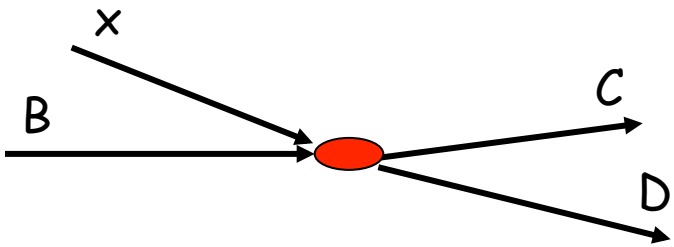


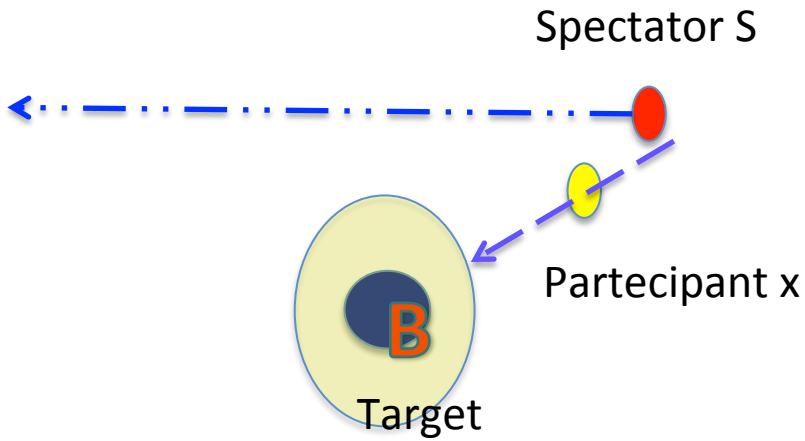
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus A breaks up,



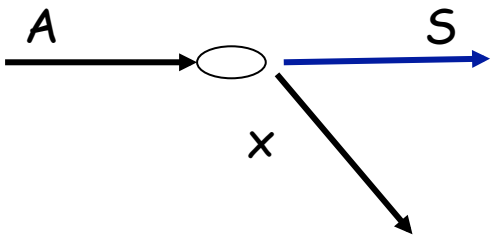
leaving x to interact with the target B while the projectile fragment S flies away.



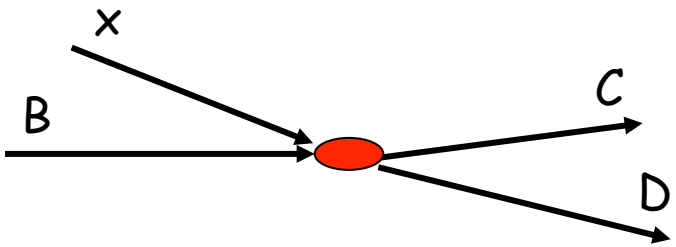


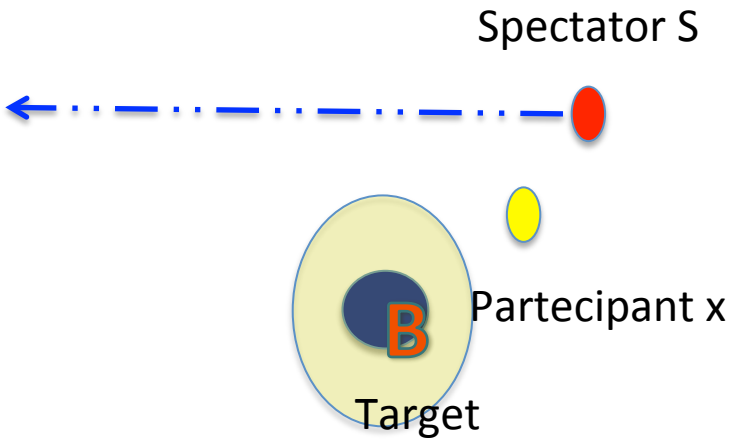
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus A breaks up,



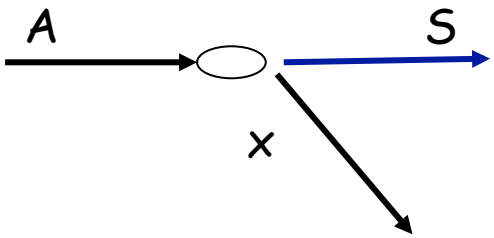
leaving x to interact with the target B while the projectile fragment S flies away.



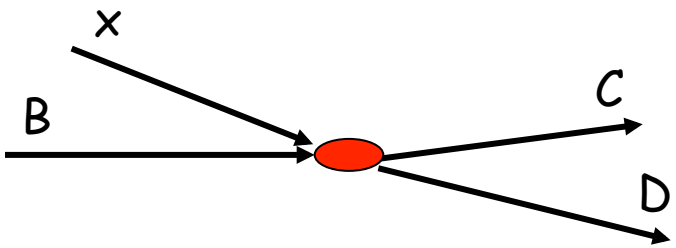


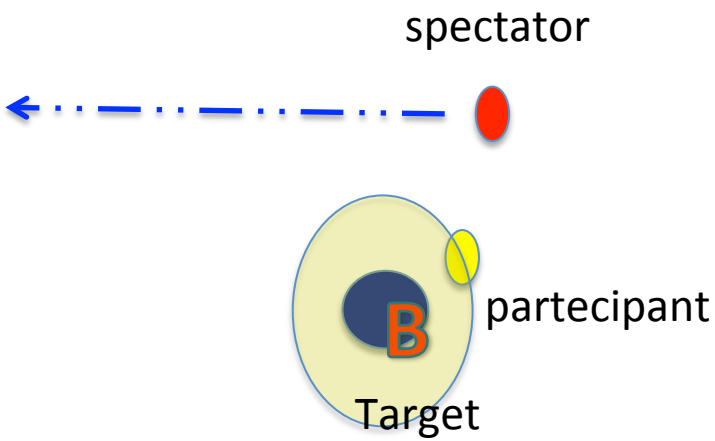
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus **A** breaks up,



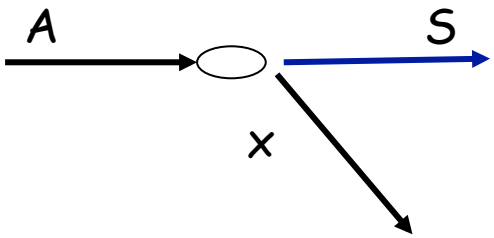
leaving **x** to interact with the target **B** while the projectile fragment **S** flies away.



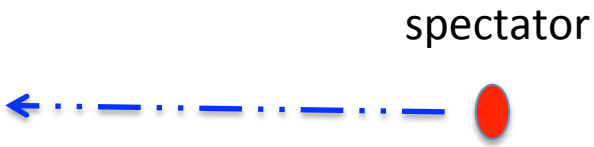


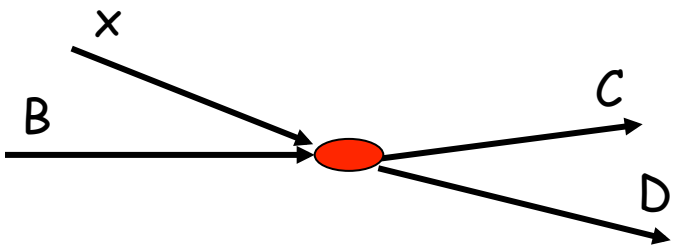
Quasi-free mechanism

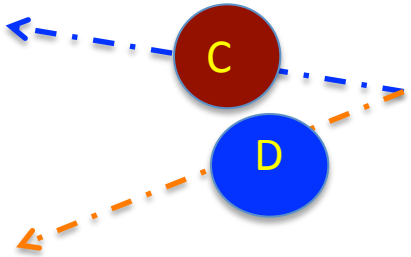
After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus **A** breaks up,



leaving **x** to interact with the target **B** while the projectile fragment **S** flies away.

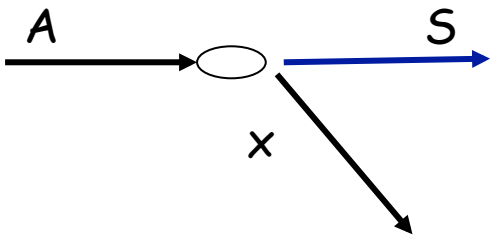




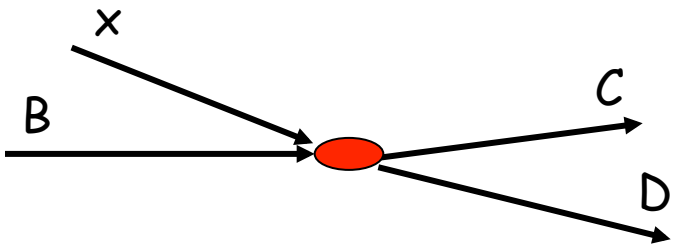


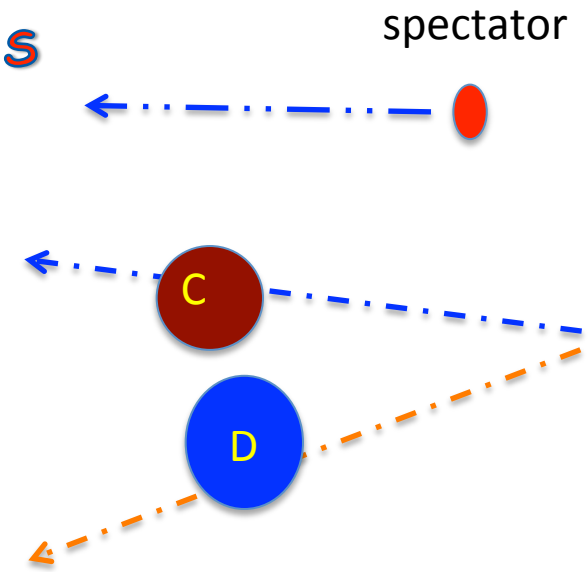
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus **A** breaks up,



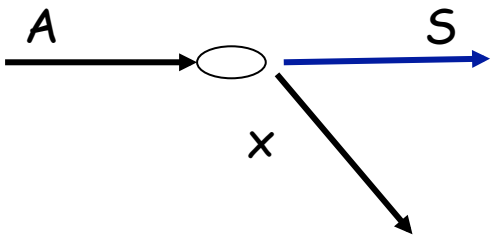
leaving **x** to interact with the target **B** while the projectile fragment **S** flies away.



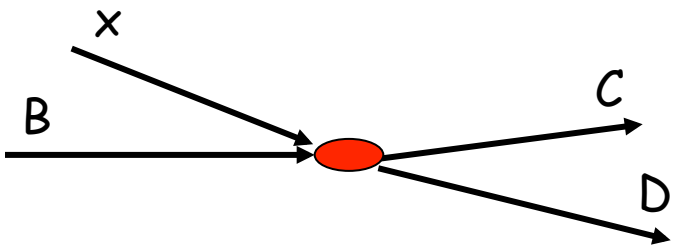


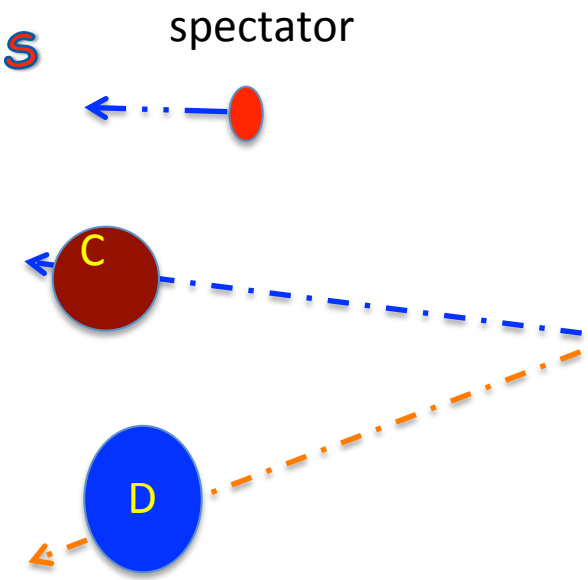
Quasi-free mechanism

After penetrating the Coulomb barrier , the nucleus A breaks up,



leaving x to interact with the target B while the projectile fragment S flies away.





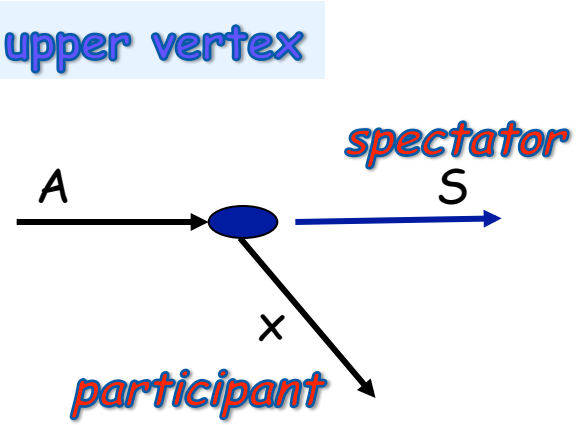
QUASI-FREE REACTION MECHANISM: Generality

A + B → C + D + S

-The **upper vertex** describes the

virtual break up of the target nucleus A into the cluster x *(participant)* and

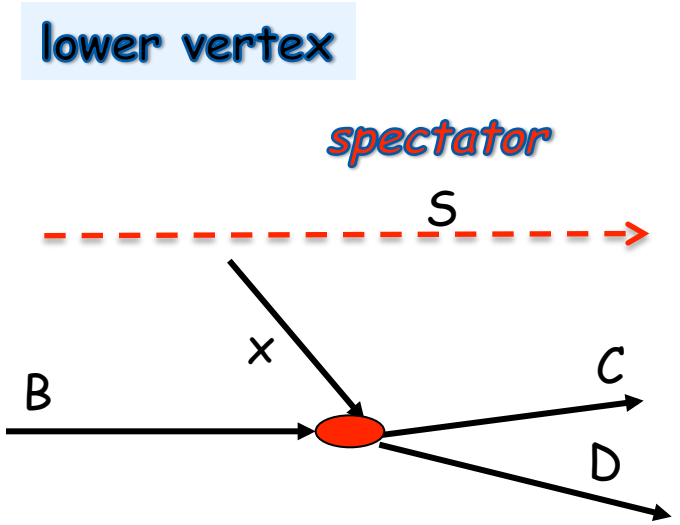
Cluster S *(spectator)*



-The S cluster acts as a spectator to

x + B → C + D

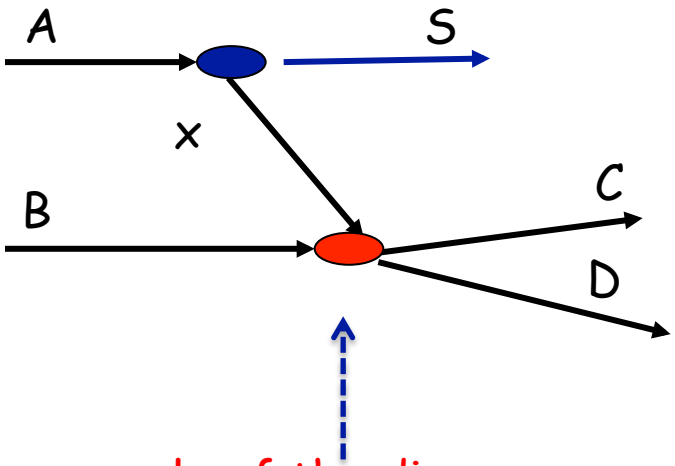
virtual reaction which takes place in the **lower vertex**.



Trojan Horse Method (THM)

The Feynman **simple diagram** is assumed to represent the dominant process **(Pole Approximation)**

"Pole Approximation"

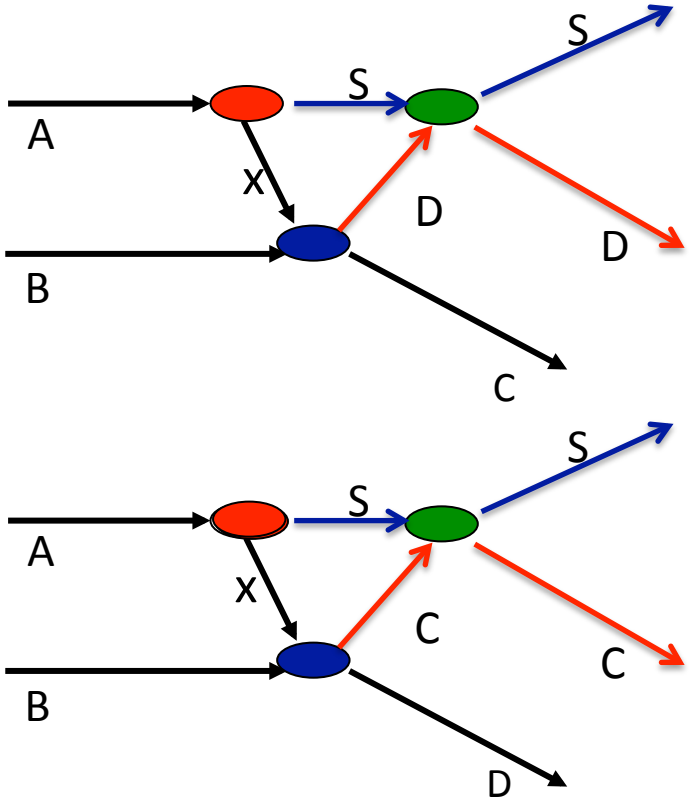


In this diagram the lower vertex describing the **B(x,C)D** virtual reaction is called the **"pole of the diagram"**, while the upper vertex accounts for the virtual decay **A→ x + S.**

Trojan Horse Method (THM)

While

other graphs (triangle graphs) indicating re-scattering between the reaction products, are neglected.



QUASI-FREE REACTION MECHANISM:

Basic theory

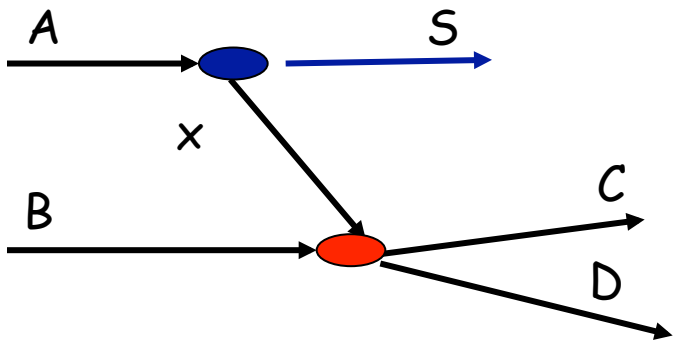
In **Impulse Approximation** (IA) the three body reaction cross section

A + B → C + D + S

is proportional to the cross section of the binary reaction

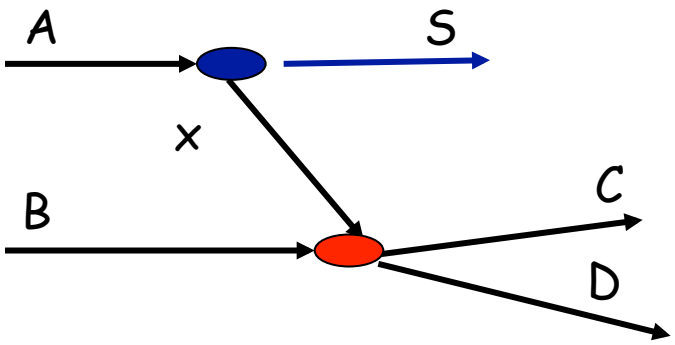
x + B → C + D

and can be factorized into two terms corresponding **to** the vertices of figure



QUASI-FREE REACTION MECHANISM: Basic theory

With this **IA** the simplest suitable theoretical approach is the PWIA is given by:



$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_C d\Omega_D dE_C} \propto (KF)\left|\phi(k_{X-S})\right|^2 \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}\right]^{HOES}$$

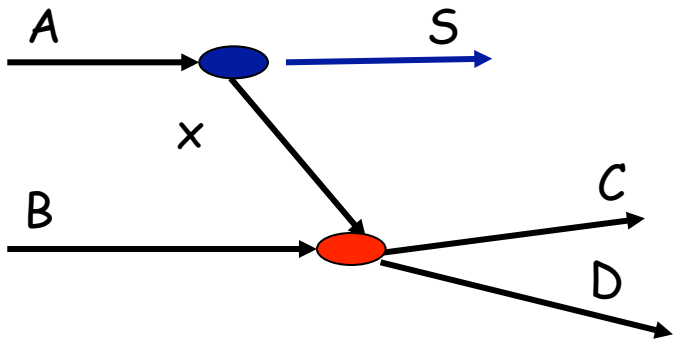
KF kinematical factor

$\left[\frac{d\sigma}{d\Omega}\right]^{HOES}$ is the half-off-energy-shell differential cross section for the binary B(x,C)D reaction at the center of mass energy E_{CM}

$\left|\phi(k_{x\text{-}s})\right|^2$ is the Fourier transform of the radial wave function for the x-S inter-cluster

Trojan Horse Method (THM):MOMENTUM PRESCRIPTION

TH reaction mechanism should dominate in a restrict region of three-.body phase space in which the momentum transfer to the spectator nucleus S is small.



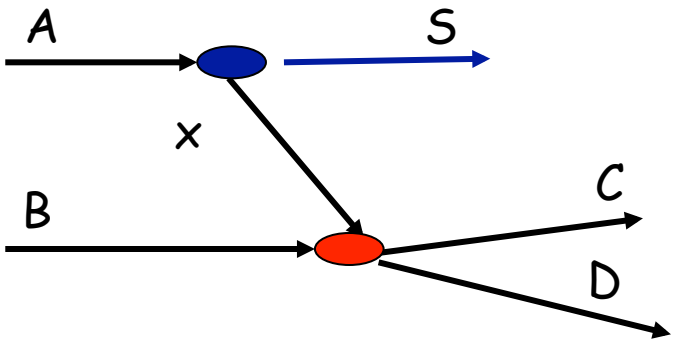
The region where the **pole diagram** is expected to be predominant in the reaction mechanism was suggested to be

$$0 \le p_{x-S}^{\max} \le k_{x-S}$$

Shapiro I.S et al. NPA 1965
Shapiro I. S. 1967 in *Interaction of High-Energy Particles with Nuclei, International School of Physics "Enrico Fermi", Course 38*

Trojan Horse Method (THM):MOMENTUM PRESCRIPTION

With p_{x-s} the momentum in the half off energy shell (HOES), of the cluster x when it interacts with the particle B and K_{x-s} the momentum on energy shell (OES) defined by the relation



$$k_{x-S} = \sqrt{2\mu_{x-S}B_{x-S}} = \sqrt{2\mu_{x-S}Q_{x-S}}$$

Shapiro I.S et al. NPA 1965

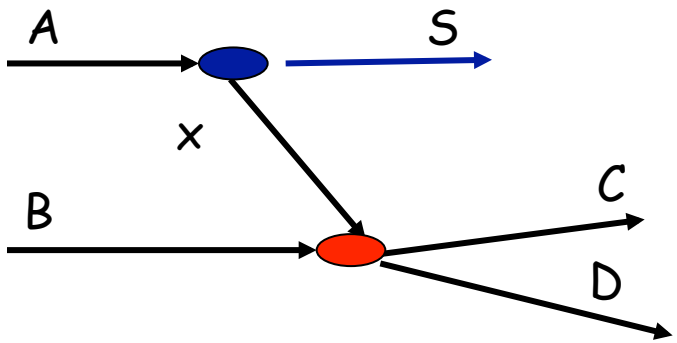
Shapiro I. S. 1967 in *Interaction of High-Energy Particles with Nuclei, International School of Physics "Enrico Fermi", Course 38*

Trojan Horse Method (THM):

The **TH** cross section can be used to determine the energy dependence of the bare nuclear **S-factor** for the binary process

x + B → C + D.

down to zero relative kinetic energy of **x** and **B**.



If the relative energy E_{xB} between

the incoming cluster **x**

$$E_{xB} < (E_{Coul.Barr.})^{xB}$$

Under proper QF kinematical conditions [$E_{C-D} = Q_{2B}$] **we can obtain**

$$E_{cm} = 0$$

$E_{c.m.}$ is given in postcollision prescription by

$$E_{cm} = E_{C-D} - Q_{2B}$$

- Q_{2b} is the two-body **Q-value** of
- the **x + B → C + D** reaction
- E_{C-D} is the relative energy between the outgoing particles **C** and **D**

Trojan Horse Method (THM): Two body CROSS SECTION

The **two body cross section**, in **arbitrary units**,

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_C d\Omega_D dE_C} \propto (KF)\left|\phi(k_{X-S})\right|^2 \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}\right]^{HOES}$$

is derived by dividing the selected three-body coincidence **yield (Y)** by the result of the Monte Carlo calculation of the product of kinematical factor time the interval **experimental** momentum distribution

measured

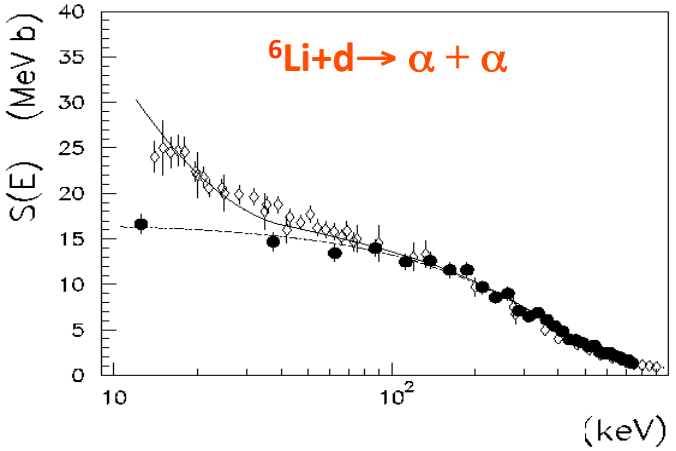
$$\left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_{cm},\theta_{cm})\right]^{HOES} \propto \frac{Y}{(KF)\left|\phi(p_{x-s})\right|^2_{\text{exp.}}}$$

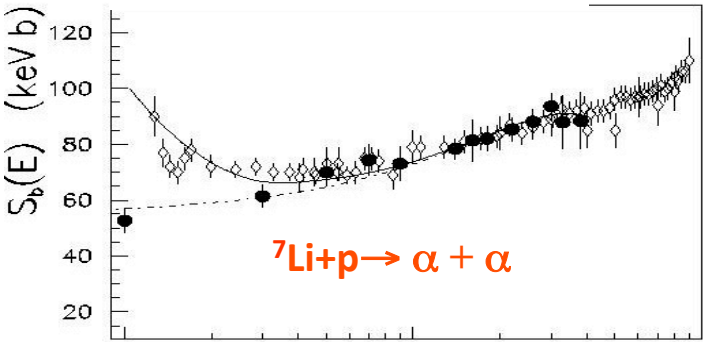
calculated measured

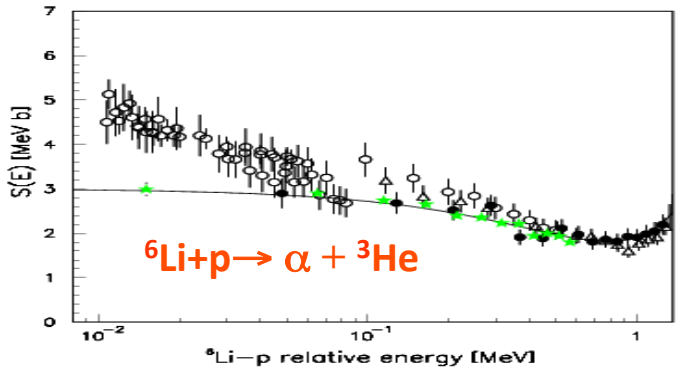
Trojan Horse Method (THM): ABSOLUTE UNITS

The **absolute value** of **S(E)**, however, must be determined by normalizing to direct measurements at higher energies. **where electron screening effects are absent.**

$$\left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{THM}_{arb.units} \rightarrow \left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{THM}_{abs.units}$$







Trojan Horse Method (THM)

The main advantage of the **TH** method is that the low-energy cross sections can be deduced from a reaction that **is not strongly suppressed by**

Coulomb barriers ⟵

or strongly alterated by

electron screening. ⟵

- VALIDITY TESTS OF THE POLE APPROXIMATION
below the Coulomb Barrier

TO COMPARE the cross section THM AND OES

$^7Li+p \rightarrow \alpha + \alpha$

$$\left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{THM} \propto \left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{HOES} x\ P_l$$

THM Indirect 2-body cross section

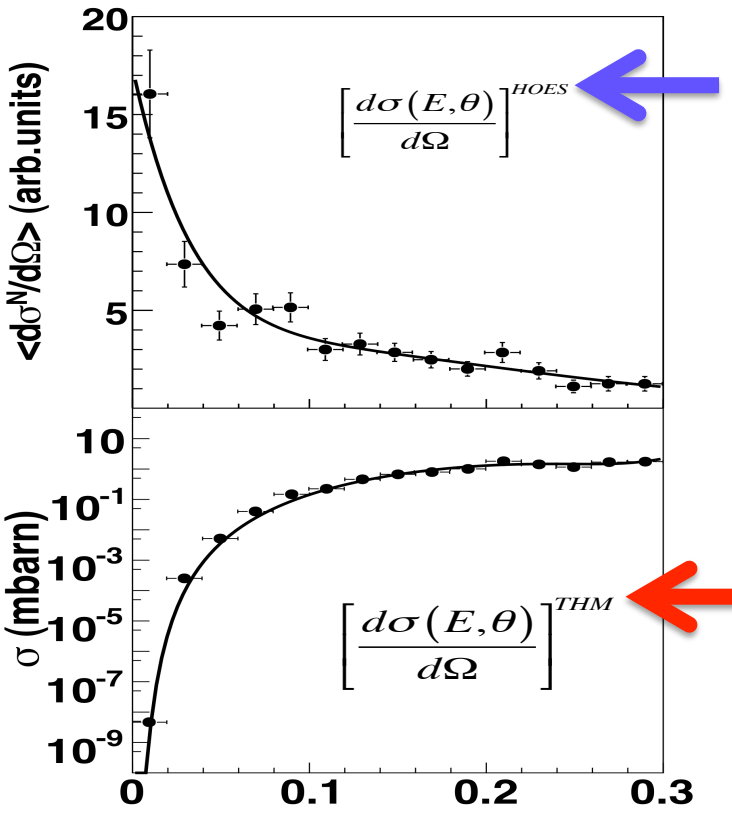
Indirect 2-body cross section

Penetration factor

Below the Coulomb barrier correction for the Penetration factor is necessary

$$P_l(k_{xB}r_{xB}) = \frac{k_{xB}r_{xB}}{F_l^2(k_{xB}r_{xB}) + G_l^2(k_{xB}r_{xB})}$$

F_l and G_l are the regular and irregular Coulomb wave functions, k_{xB} and r_{xB} the x-B relative wave number and interaction radius, respectively .



C.Spitaleri et al.: Phys. Rev. C (1999)

Validity tests of POLE APPROXIMATION

NECESSARY CONDITIONS:

The angular distribution and/or excitation function HALF OFF ENERGY SHELL cross section

$$\left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{HOES}_{x+B\rightarrow C+D}$$

MUST SHOW

the same behaviour of the angular distribution and/or excitation function of the binary reaction ON ENERGY SHEL

$$\left[\frac{d\sigma(E,\theta)}{d\Omega}\right]^{OES}_{x+B\rightarrow C+D}$$

"It is very important to have **same criterion** with the aid of which we may establish experimentally the correctness of the pole approximation in each specific case"

Shapiro: Lectures Varenna School 1967).

EXPERIMENTAL PROCEDURE

WHAT HAS TO BE DONE PRACTICALLY? :

Before data taking

EXPERIMENTAL PROCEDURE

WHAT HAS TO BE DONE PRACTICALLY? :

After data taking

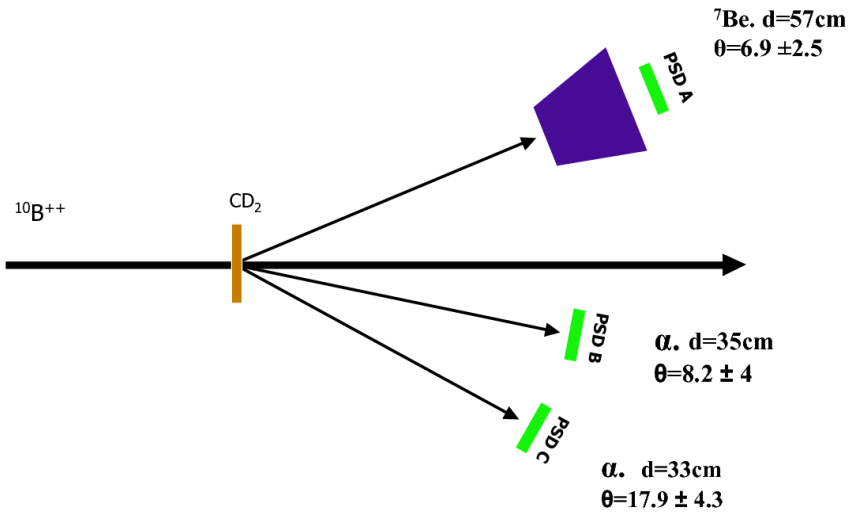
After data taking

1) Selection events from the three body reaction of interest.
2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others (sequential decay).
3) Reconstruct σ_b and multiply it by the penetration factor P_l.

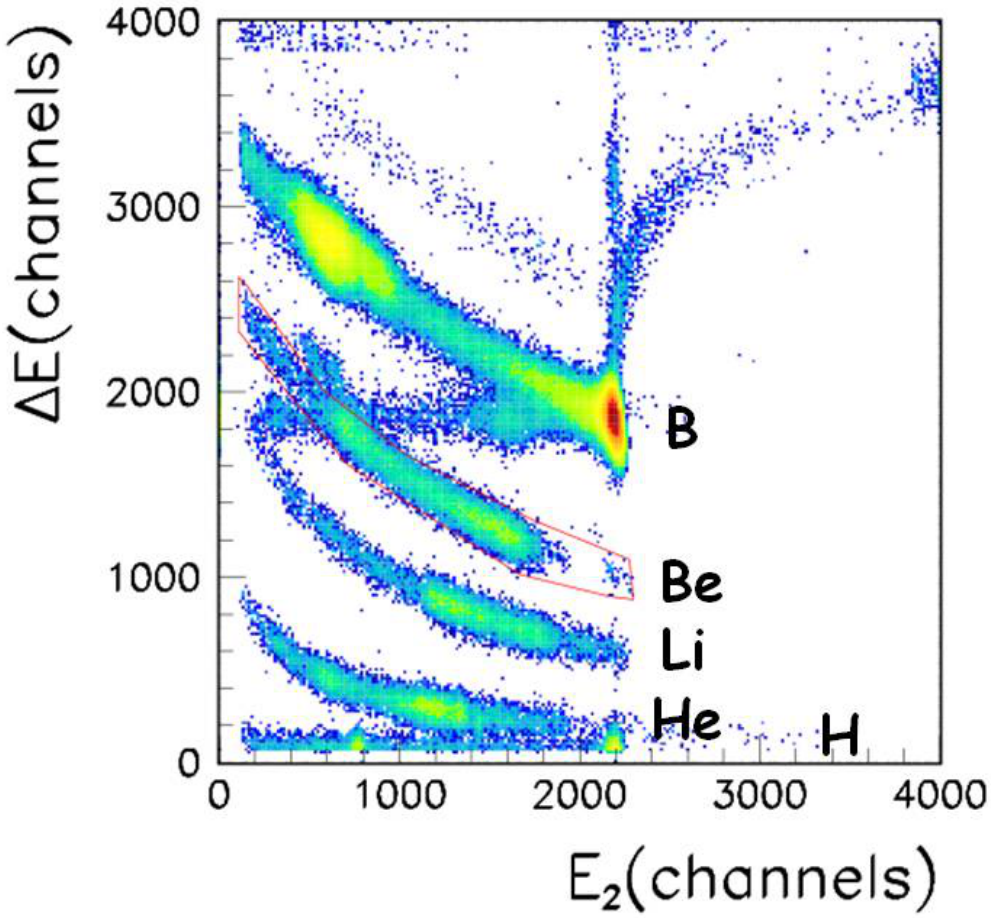
4) Normalise to $\sigma_{b\ Direct}$.

5) Verify that all direct data are reproduced
   - excitation functions including resonances
   -angular distributions (Validity tests)

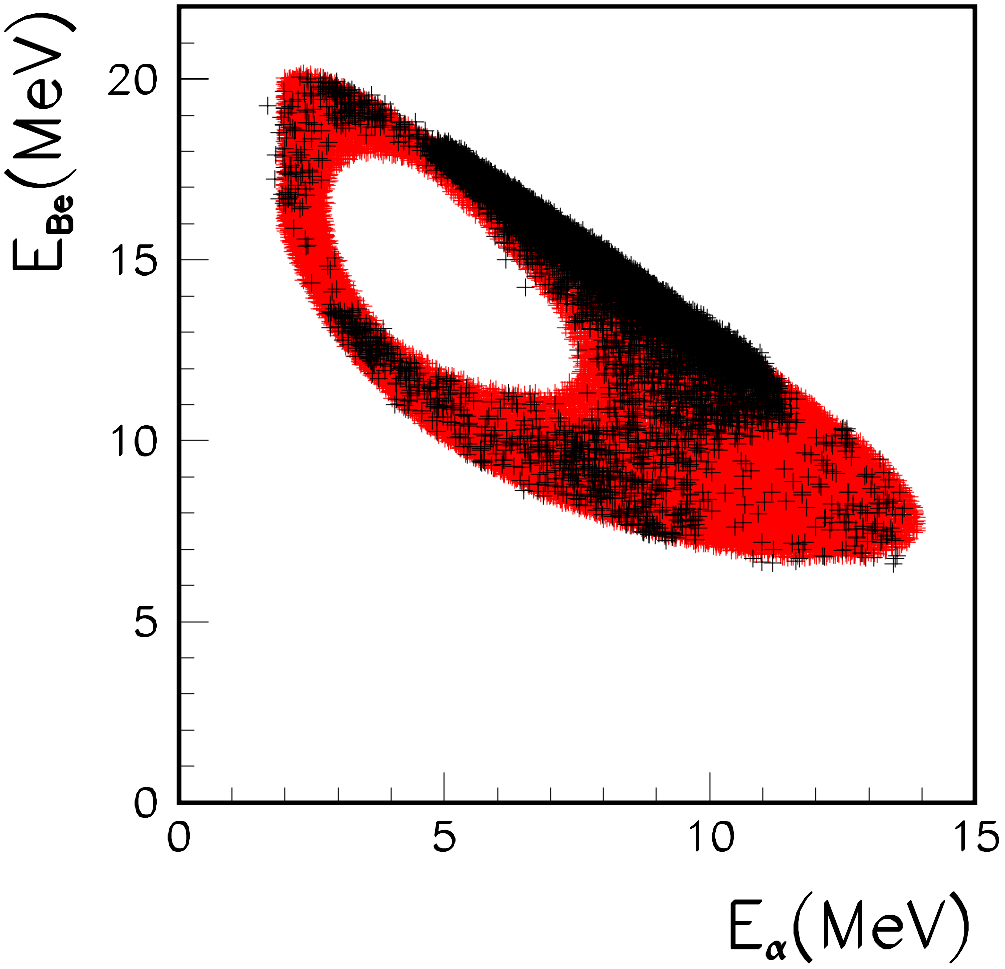
2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel



2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel

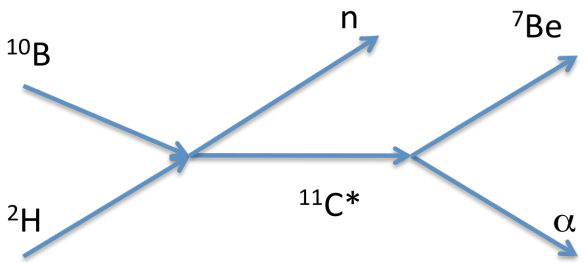


2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel

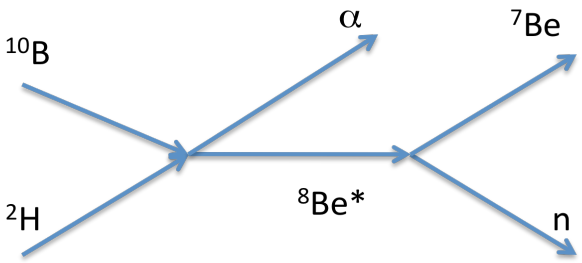


2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel

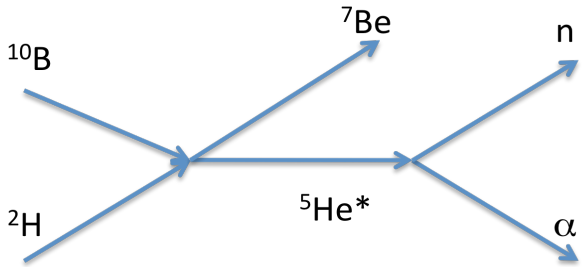
a)



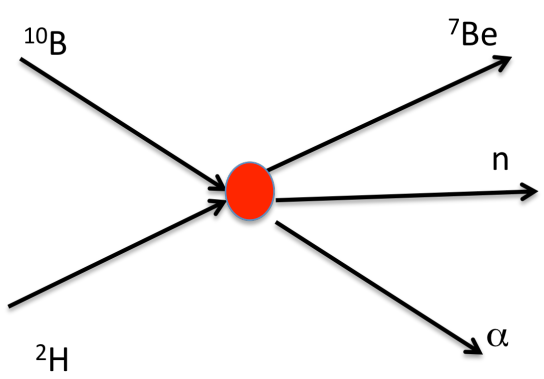
b)



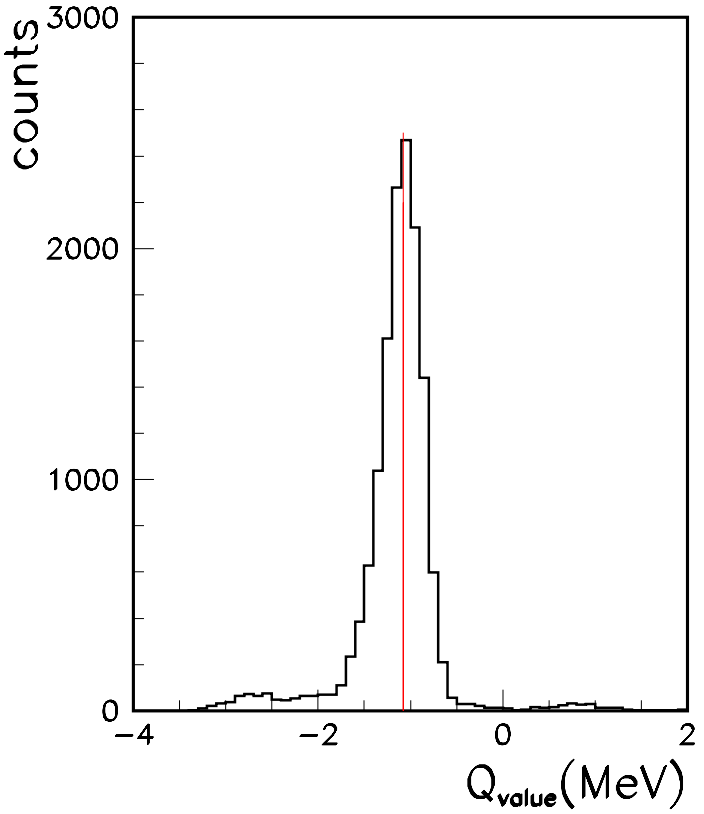
c)



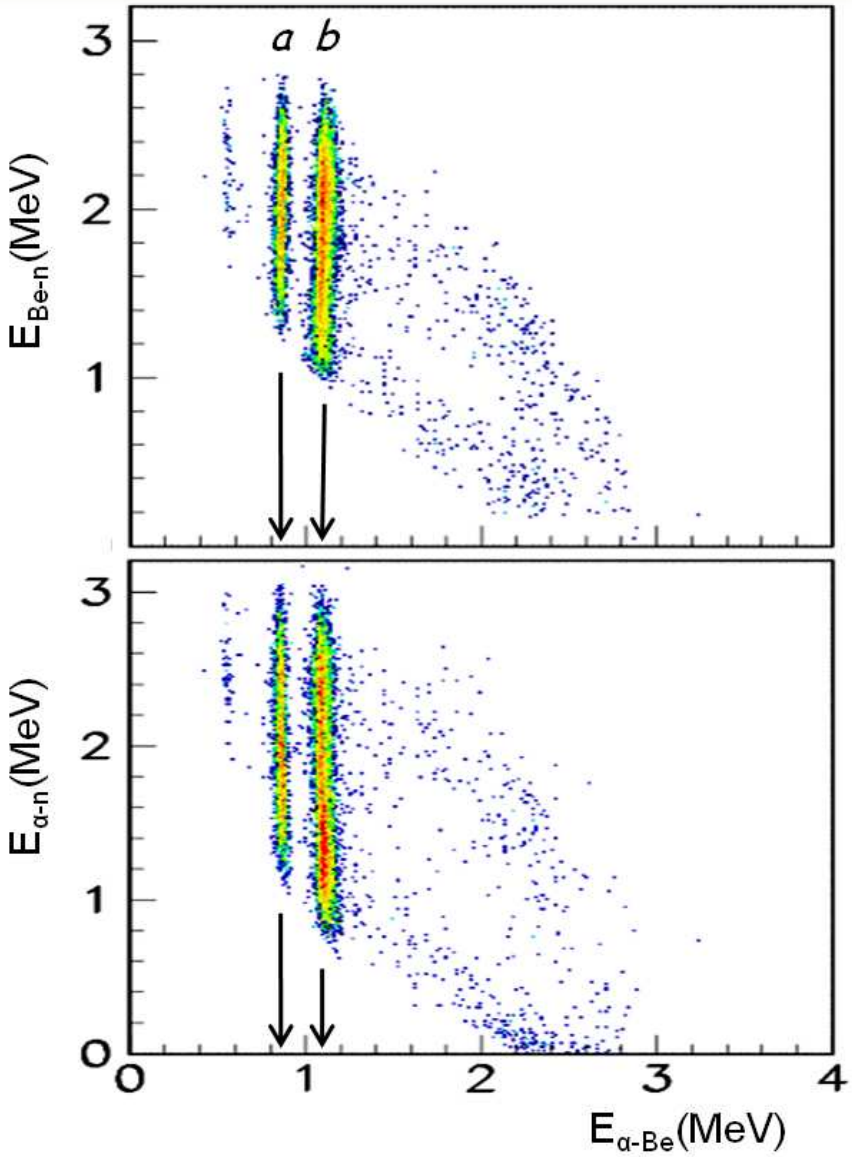
d)



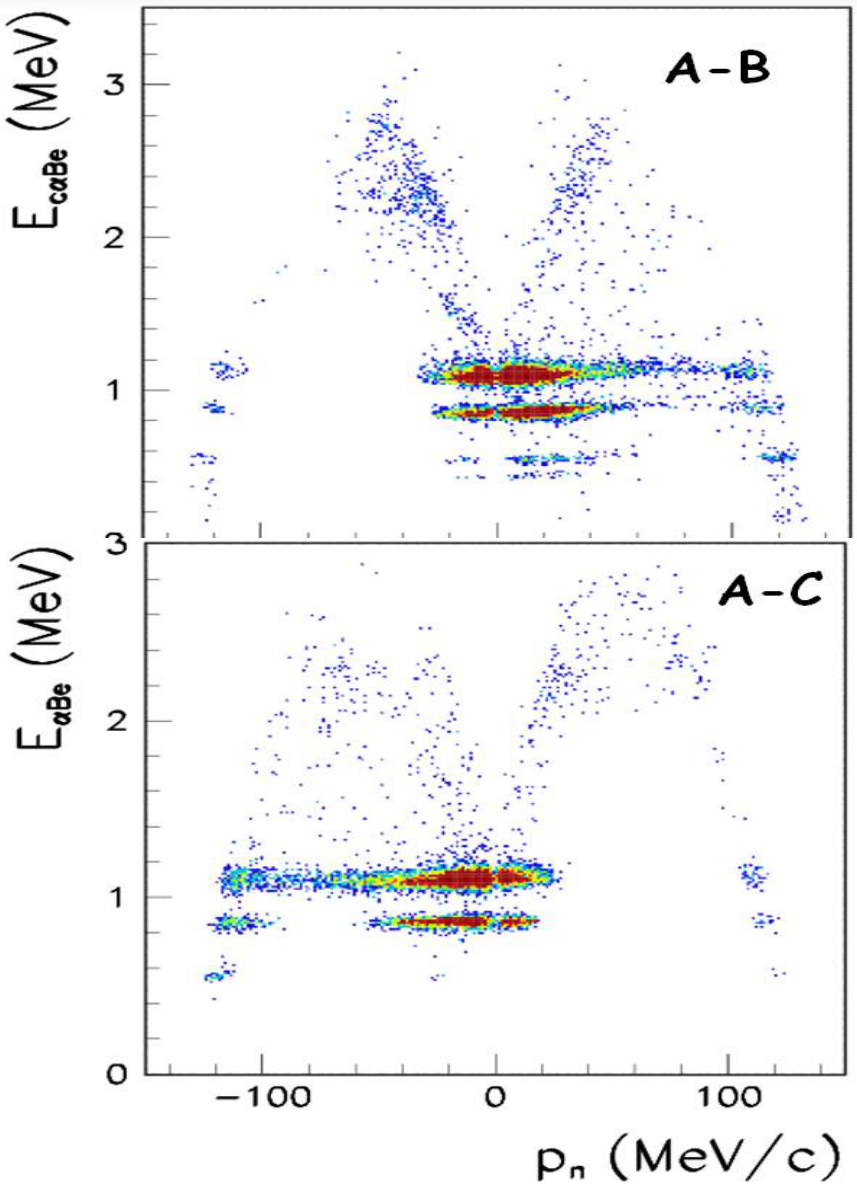
2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel



2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel

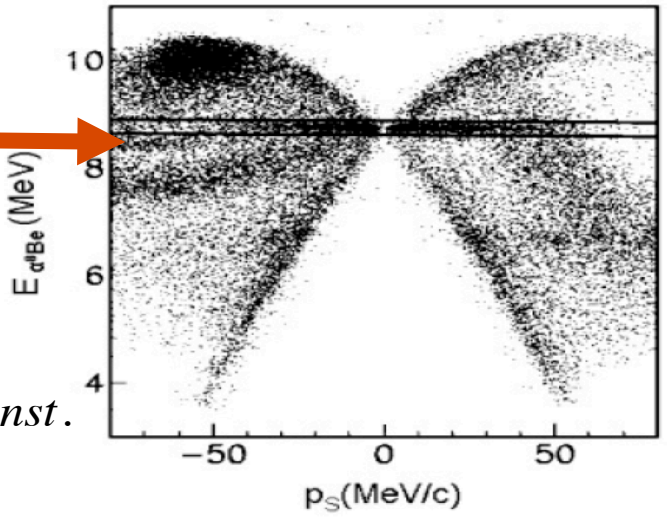


2) Check if the quasi free reaction mechanism is present and can be discriminated from others mechanisms with the same C,D,S particles in exit channel



$$\Delta\theta_{CM} \cong const.$$
$$\Delta E_{CM} \cong const.$$

$$\left[\frac{d\sigma(E,\theta)_{CM}}{d\Omega}\right]^{HOES} \cong const.$$

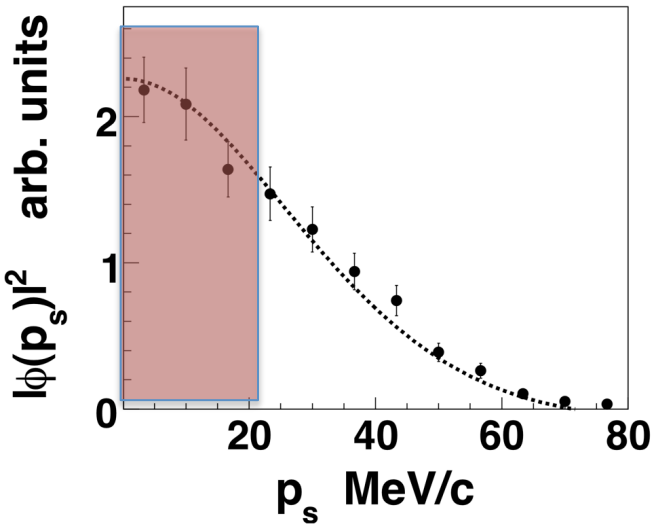


$$\left[\phi(p_{xS})\right]^2 \propto \frac{\frac{d^3\sigma}{dE_C d\Omega_C d\Omega_D}}{[KF]\left[\frac{d\sigma(E,\theta)_{CM}}{d\Omega}\right]^{HOES}}$$

$^{11}B + p \rightarrow \alpha_o + {}^8Be$

E_{11B}=27 MeV

Figure 9. Quasi-free energy $E_{a\text{-}8Be}$ as a function of the spectator momentum k_S further $^2H(^{11}B,a^8Be)n$ reaction.



Hulthe'n wave function

$$\psi(r) = \sqrt{\frac{ab(a+b)}{2\pi(a-b)^2}}\ \frac{e^{-\alpha r} - e^{-\beta r}}{r}$$

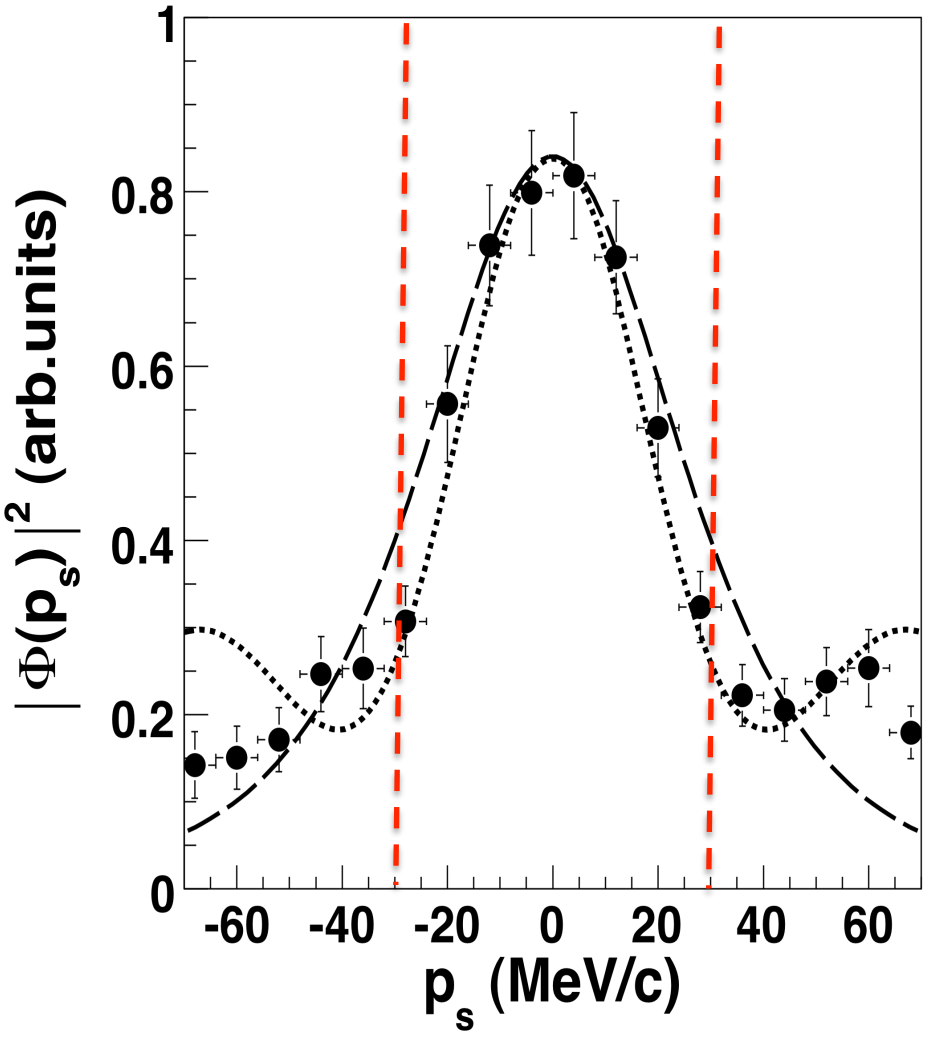
α=0.2317 fm^{-1} ; β=1.202 fm^{-1}

Figure 10. Experimental momentum distribution *p-n* (full dots) compared with the theoretical one given in terms of equation (12) (full line) for the $^2H(^{11}B,a^8Be)n$ reaction. The squared Hulthen function in momentum space

C.S.et al. Phys. Rev C 2004

2b) Comparison PWIA Experimental momentum distribution with theDWBA Calculations.

$^{17}O(d,\alpha^{14}N)n$



DWBA

PWIA

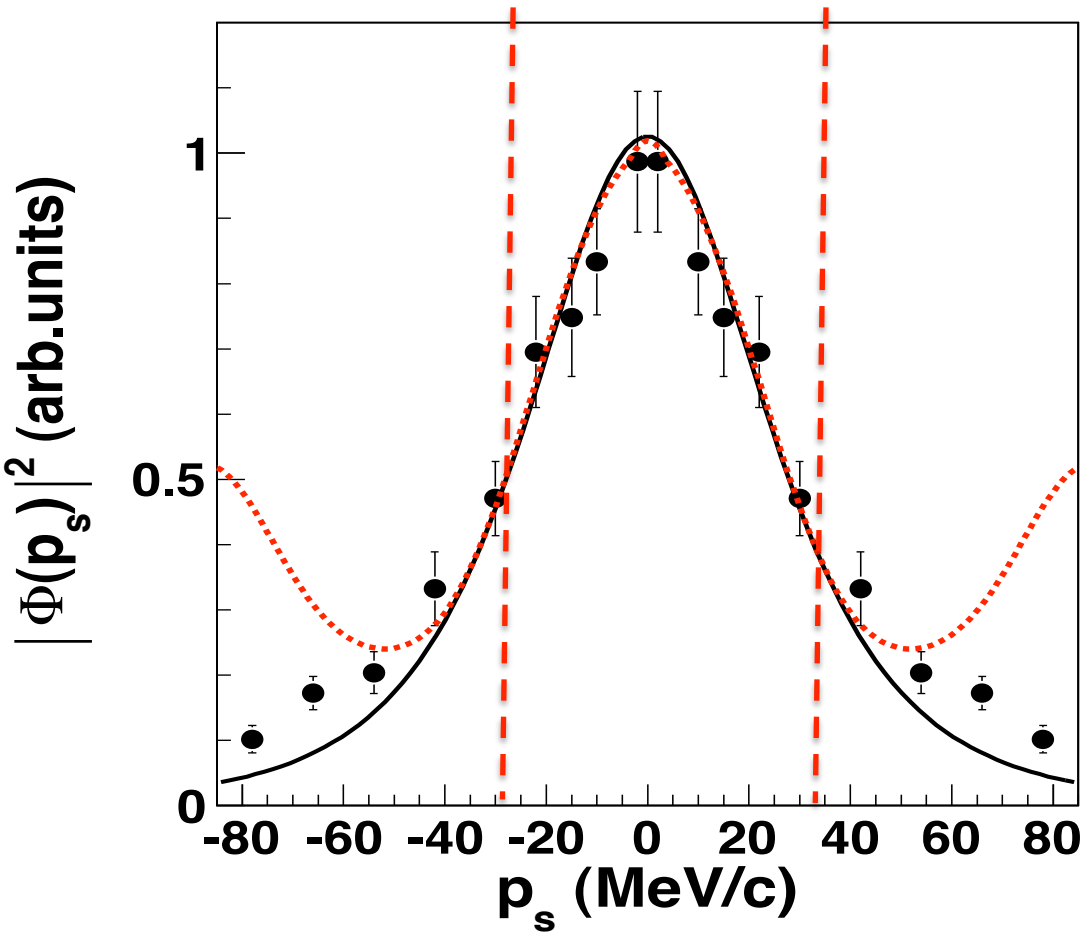
THE APPLICABILITY OF THE POLE APPROXIMATION IS LIMITED TO SMALL MOMENTUM p_{x-s}.

$$0 \le p_{x-S}^{\max} \le k_{x-S}$$

M.L. Sergi et al. Phys.Rev C (R) 82, 032801 (2010).

2b) Comparison PWIA Experimental momentum distribution with the DWBA Calculations.

$^{18}O(d,\alpha^{15}N)n$



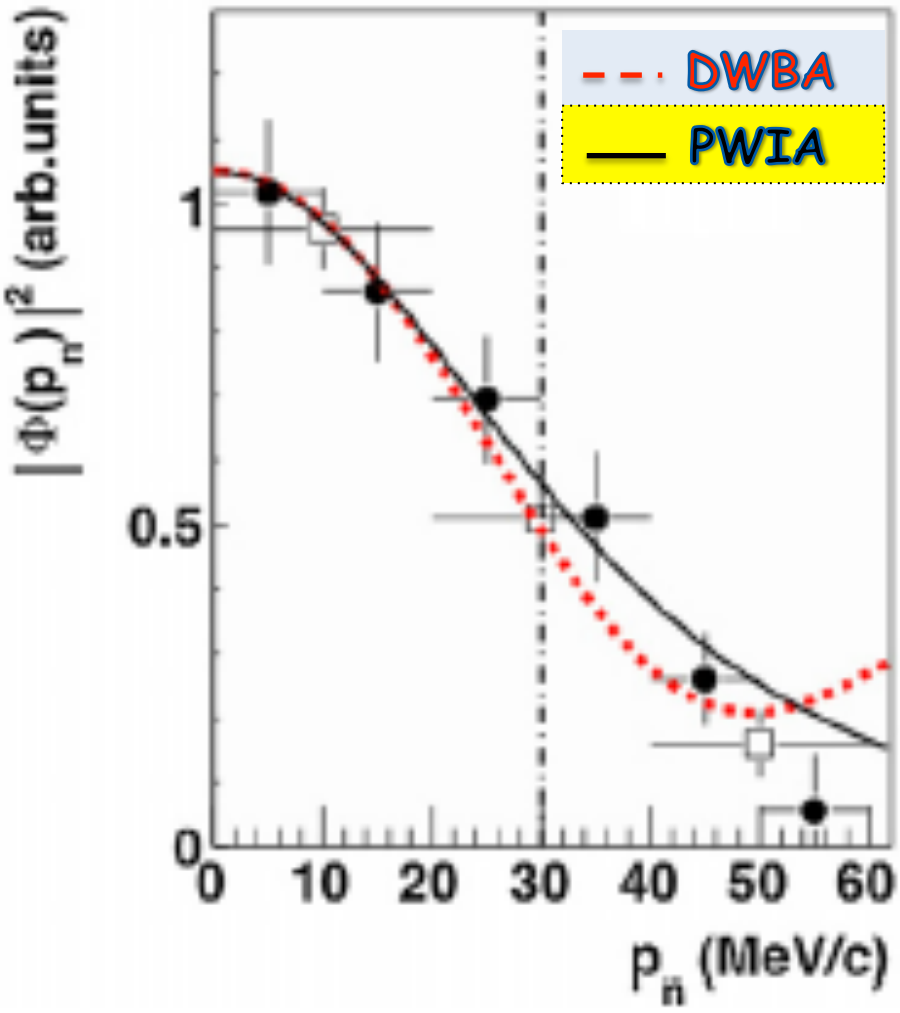
THE APPLICABILITY OF THE POLE APPROXIMATION IS LIMITED TO SMALL MOMENTUM p_{x-s}.

$$0 \le p_{x-S}^{\max} \le k_{x-S}$$

M.La Cognata et al. Phys.Rev.Lett. 10, 152501 (2008).

2b) Comparison PWIA Experimental momentum distribution with the DWBA Calculations.

$^{11}B(d,\alpha_0{}^8Be)n$



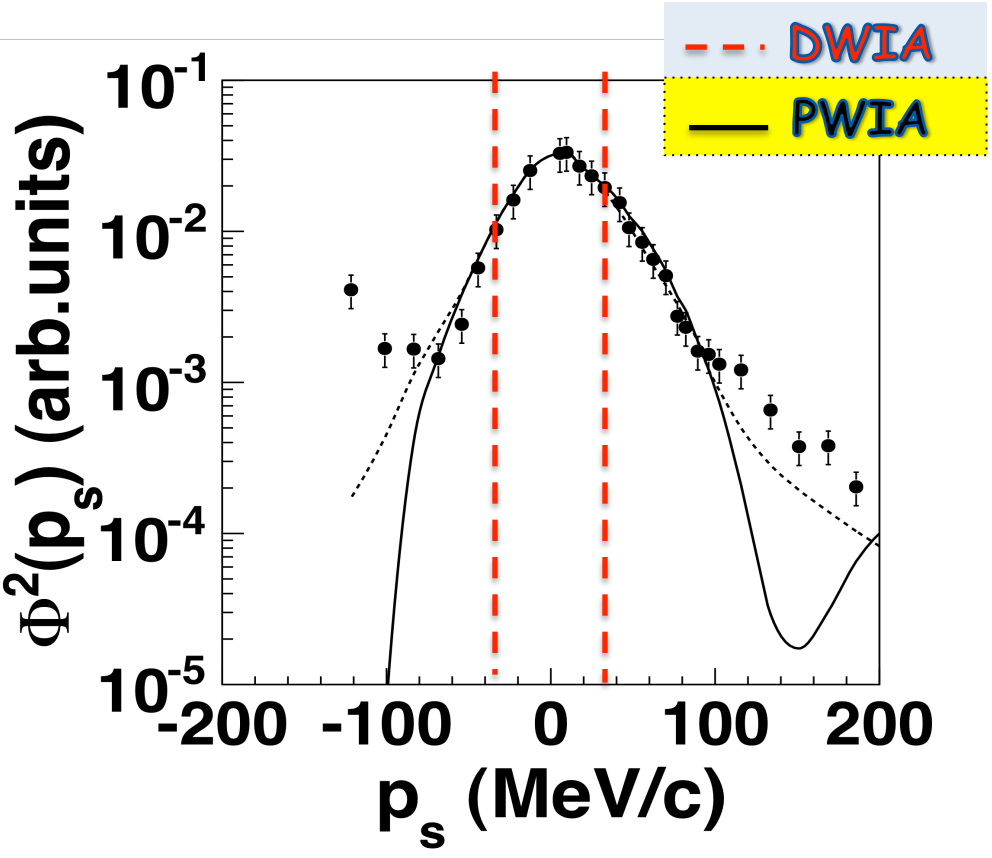
THE APPLICABILITY OF THE POLE APPROXIMATION IS LIMITED TO SMALL MOMENTUM p_{x-S}.

$$0 \le p_{x-S}^{\max} \le k_{x-S}$$

L.Lamia et al J. P. G, vol. 39, p. 015106-015129,(2011)

3b) Comparison PWIA Experimental momentum distribution with the DWIA Calculations.

$^6Li(p,p\alpha)^2H$



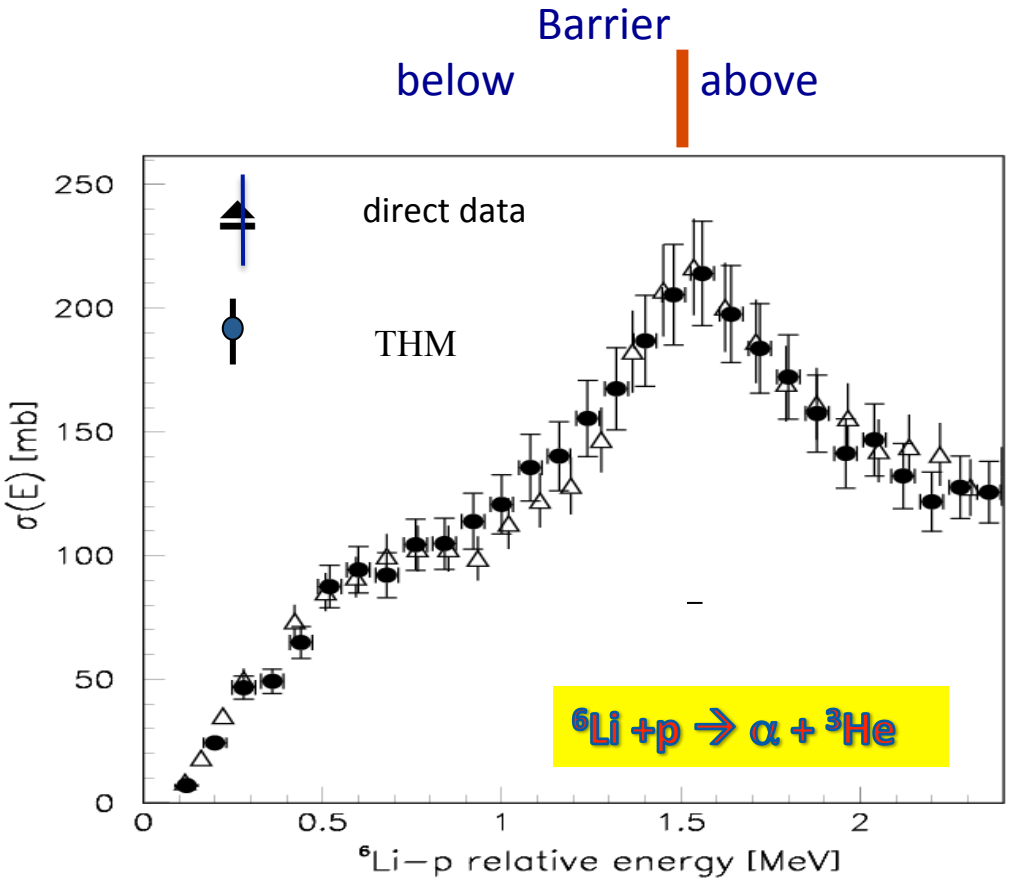
THE APPLICABILITY OF THE POLE APPROXIMATION IS LIMITED TO SMALL MOMENTUM p_{x-s}.

$$0 \leq p_{x-S}^{\max} \leq k_{x-S}$$

N.S. Chant and P.G. Roos, Phys. Rev. C15 57 (1977)

C.Spitaleri et al Phys. At. Nucl. 74,1725 (2011)

Validity tests of POLE APPROXIMATION



E_{Li} =12 MeV
Tandem LNS-Catania

Modified Plane Wave Born Approximation

A. Tumino et al.: Phys. Pev. C 2003

S.Typel and G.Baur Ann. Phys.305,228,(2003)

6) Normalise $[\sigma(E)^{THM}]_{rel.units.}$ to $[\sigma(E)^{OES}]_{abs.\ units}$

The energy dependence of the half-off-shell (HOS)

(red dashed line)

and on-shell (OS)

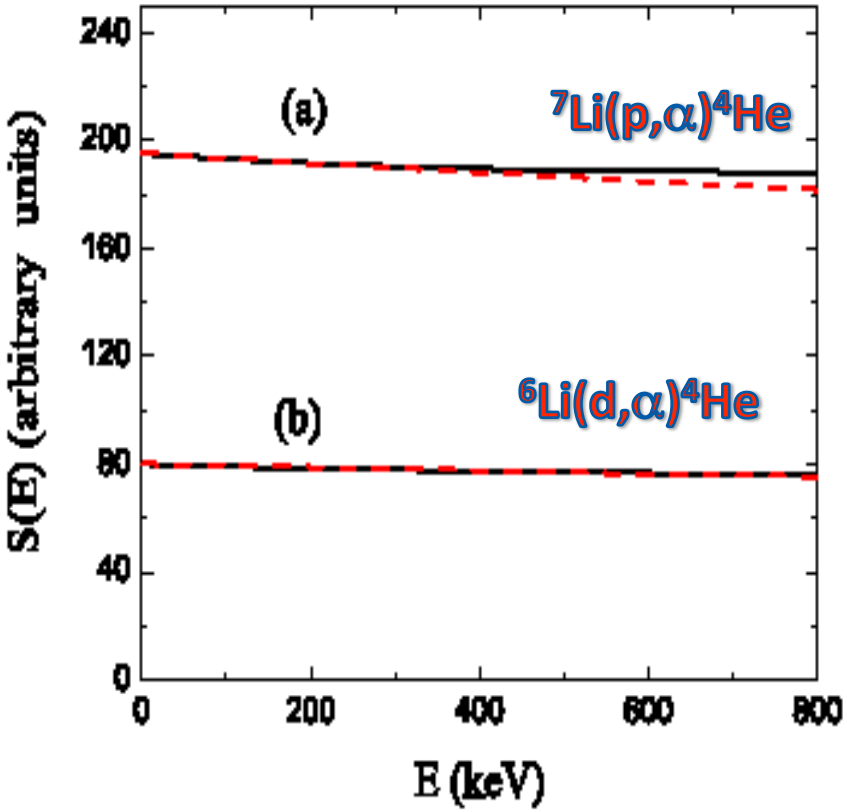
(black solid line)

astrophysical factors S(E)

for

(a)the $^{7}Li(p,\alpha)^{4}He$ reaction;

(b)the $^{6}Li(d,\alpha)^{4}He$ reaction.

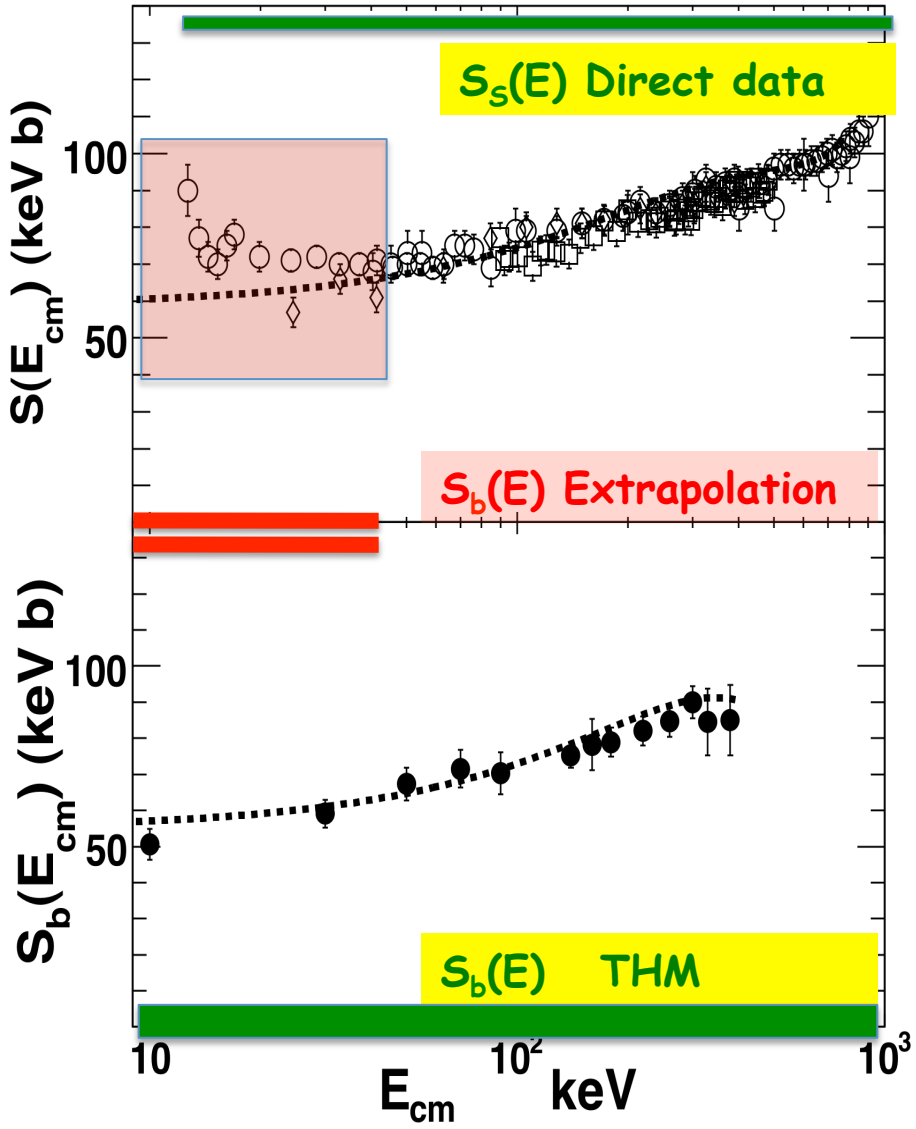


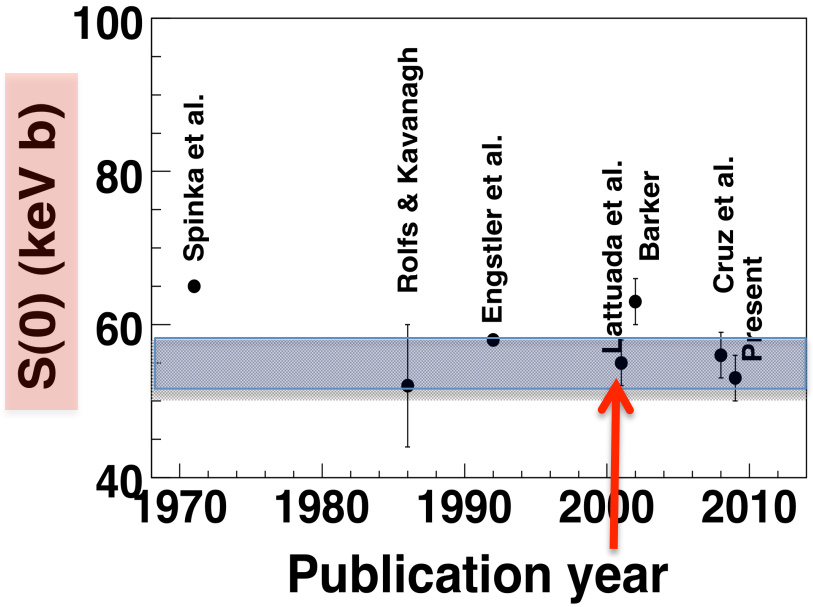
AFTER THE NORMALIZATION

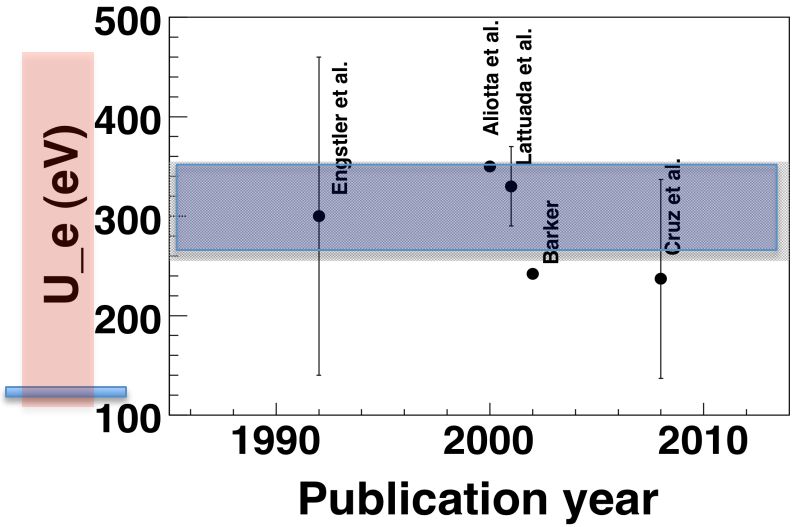
The Energy dependences are the same !!

A.Mukhamedzhanov et al: JPG (2008)

$^{7}Li\ (p,\alpha)^{4}He$

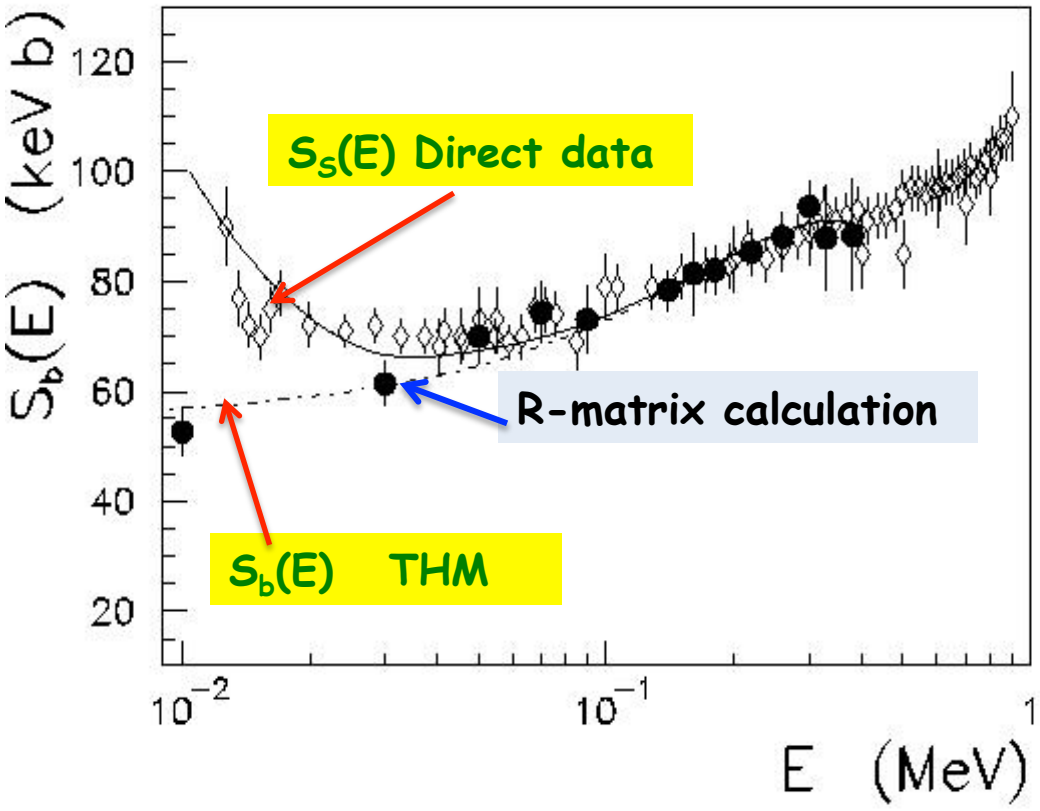






^{7}Li (p,α)^{4}He

Trojan Horse Method (THM):
determination of the electron screening potential
$^7Li+p \rightarrow \alpha + \alpha$

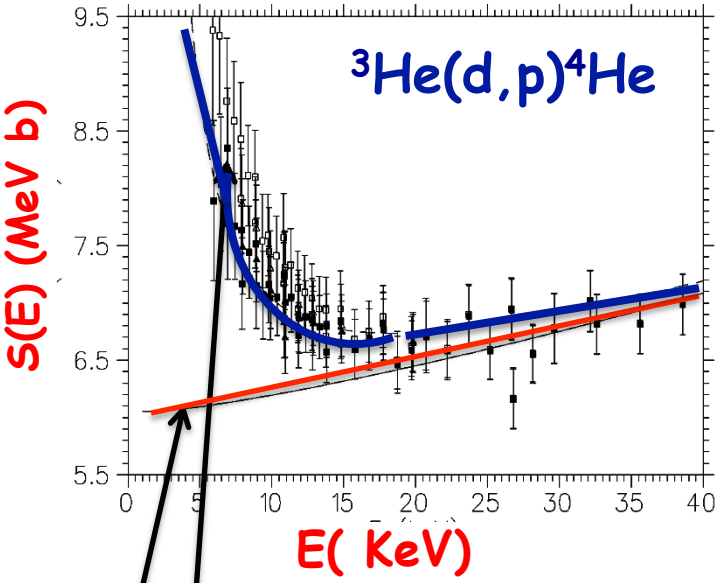


U_e (ad)	U_e (THM) ^7Li+p	U_e (Dir) ^7Li+p
186 eV	330 ± 40 eV	300 ± 160 eV

S_0=55 ± 3 keV b

Spitaleri et al. PRC (1999)
Lattuada et al. ApJ (2001)

Experimental approach to measured the electron screening potential U_e by binary reaction



$$S_s(E) \approx S_b(E)\exp\left(\pi\eta\frac{U_e}{E}\right)$$

electron screening potential

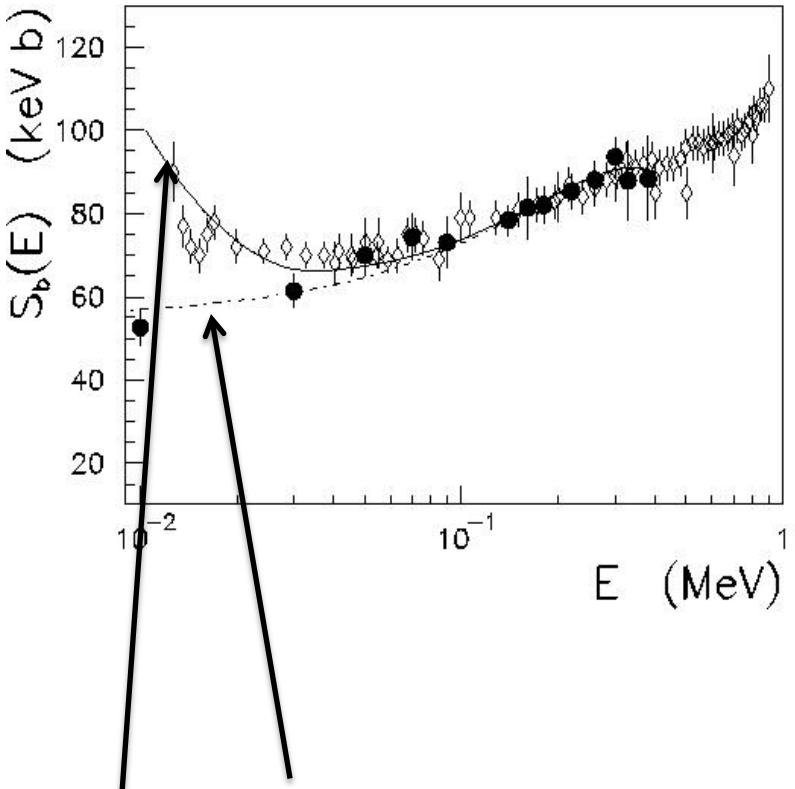
$$U_e = \frac{E}{\pi\eta}\ln\frac{S_b(E)}{S_S(E)}$$

Obtained by extrapolation

Directly measured

Experimental approach to measured the electron screening potential U_e by indirect reaction

$$S_s(E) \approx S_b(E)\exp\left(\pi\eta\frac{U_e}{E}\right)$$

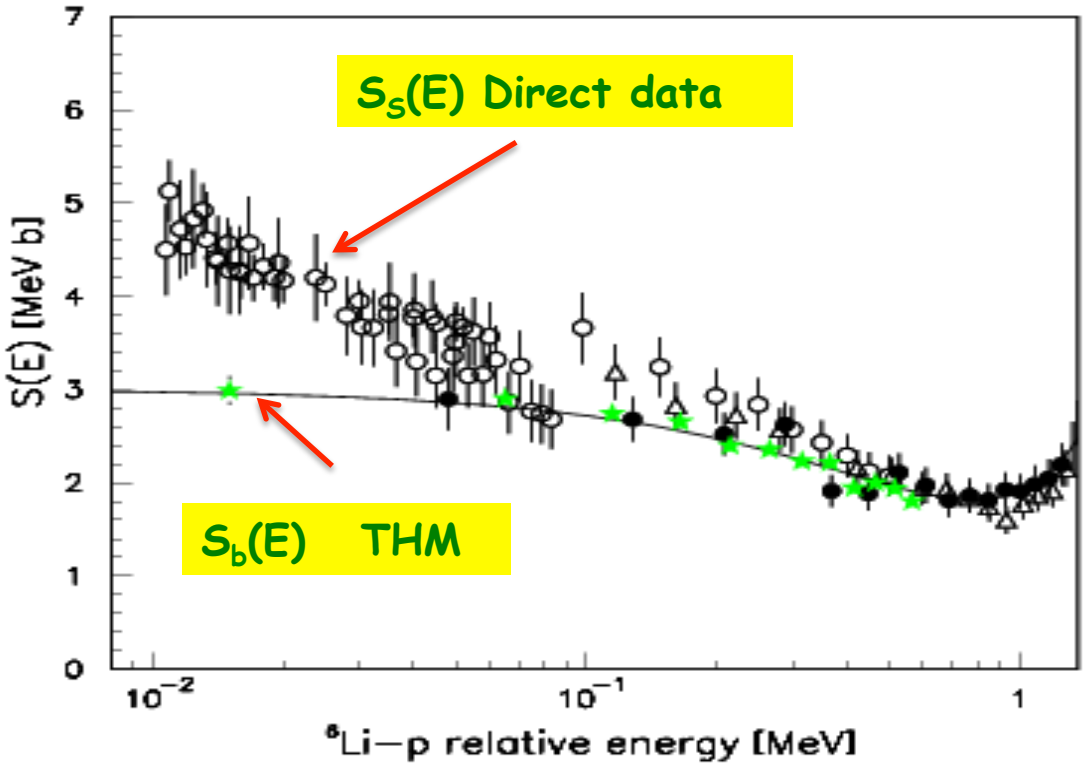


Obtained by indirect measurementsr

$$U_e = \frac{E}{\pi\eta}\ln\frac{S_b(E)}{S_S(E)}$$

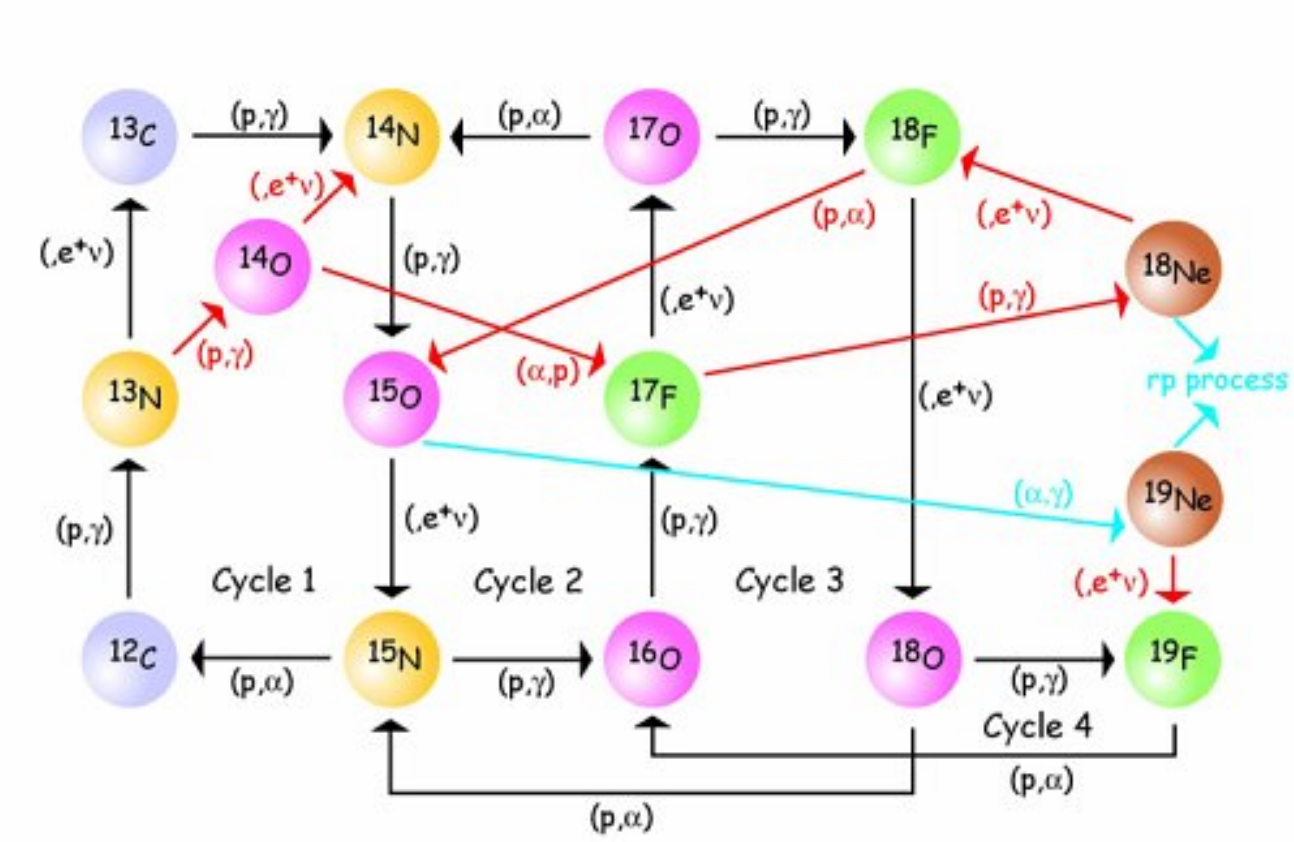
Directly measured

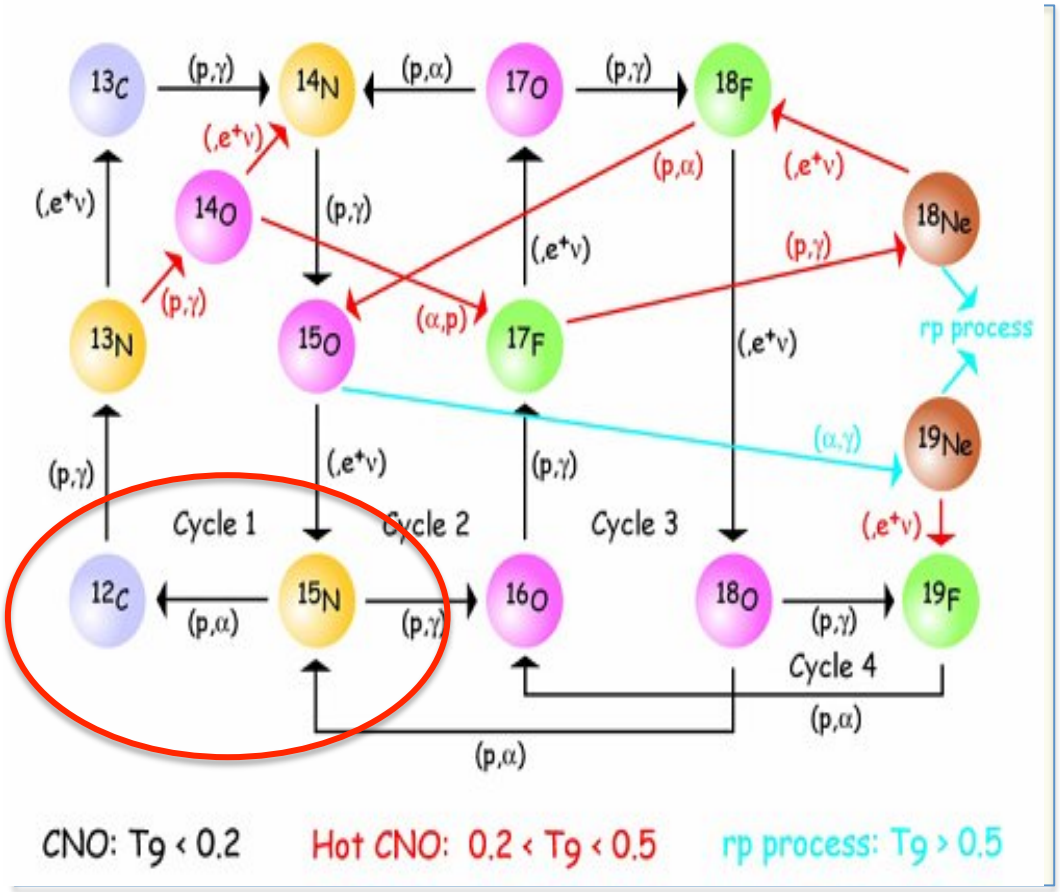
Trojan Horse Method (THM):
determination of the electron screening potential
$^6Li+p \rightarrow \alpha + {}^3He$



U_e (ad)	U_e(THM) ^{6}Li+p	U_e(Dir) ^{6}Li+p
186 eV	435 ± 40 eV	440 ± 80 eV

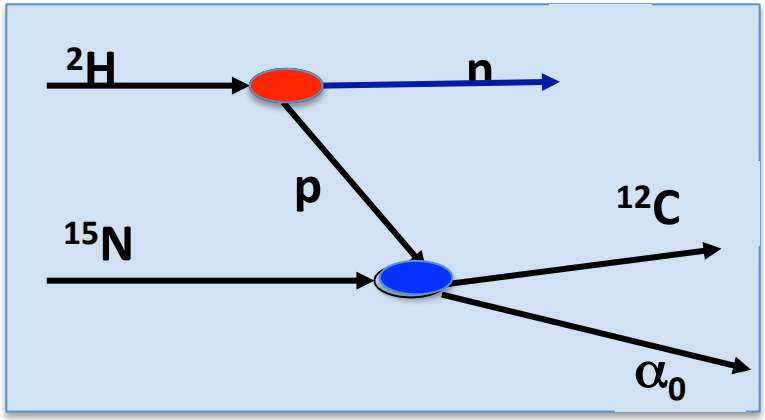
Asrophysical Application : CNO Cycles





Reaction: $^{15}N + p \rightarrow \alpha_o + {}^{12}C$

via the $^{15}N + d \rightarrow \alpha_o + {}^{12}C + n$

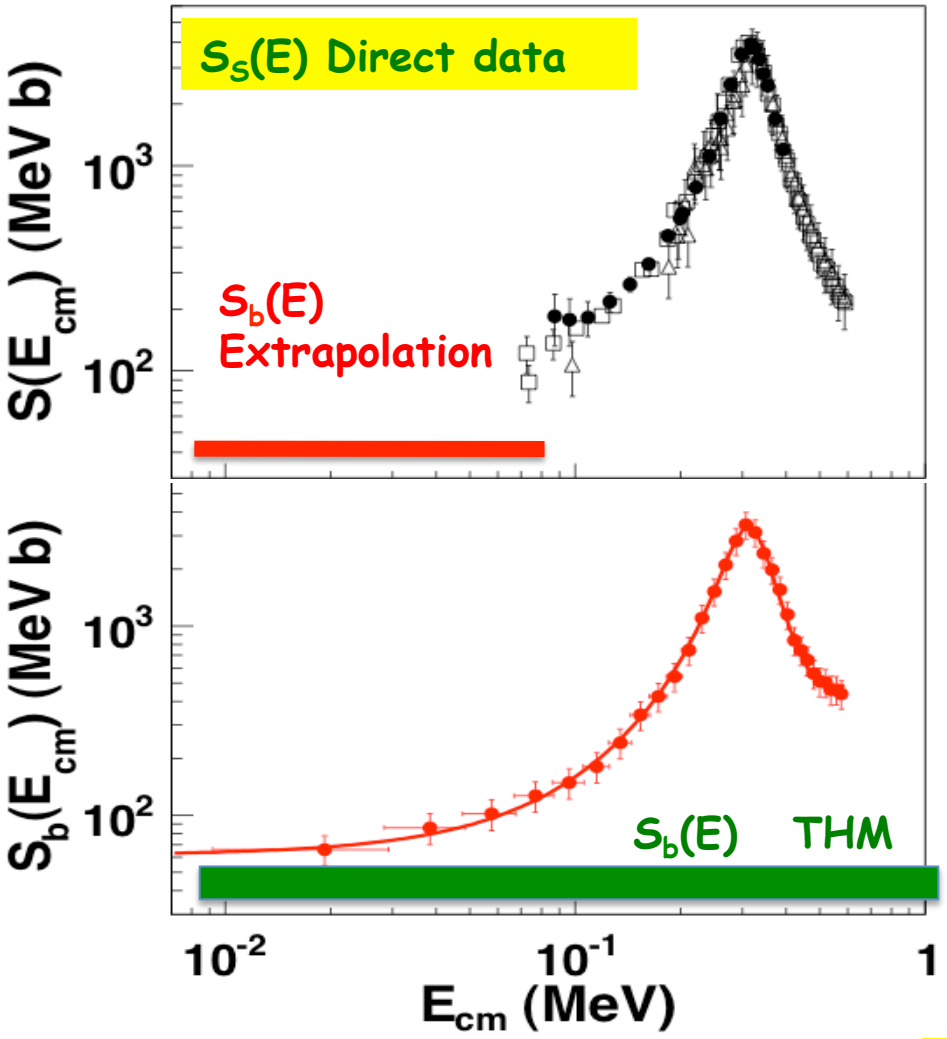


The Fluorine problem in the AGB :

$^{15}N\ (p,\alpha)^{12}C$

Reaction: $^{15}N + p \rightarrow \alpha_o + {}^{12}C$

via the $^{15}N + d \rightarrow \alpha_o + {}^{12}C + n$

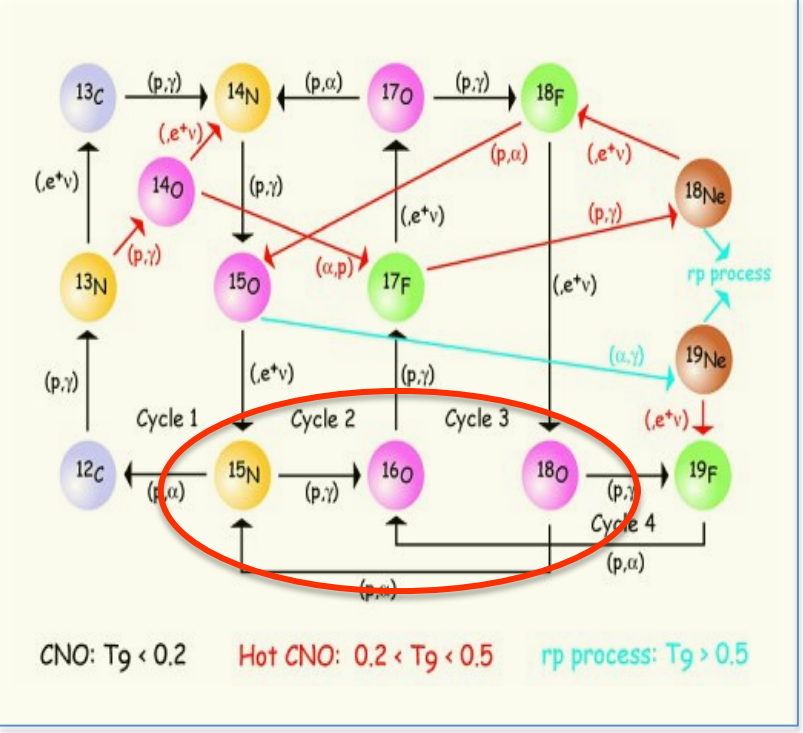


CYCLOTRON- Texas A&M University, College Station, Texas, USA

E_{15N}= 60 MeV

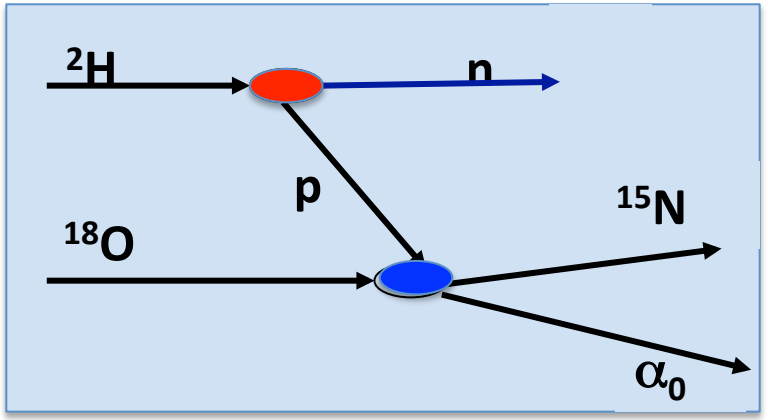
Target CD_2

M. La Cognata, C.S. et a. PRC, (2008))



Reaction: $^{18}O + p \rightarrow \alpha_o + {}^{15}N$

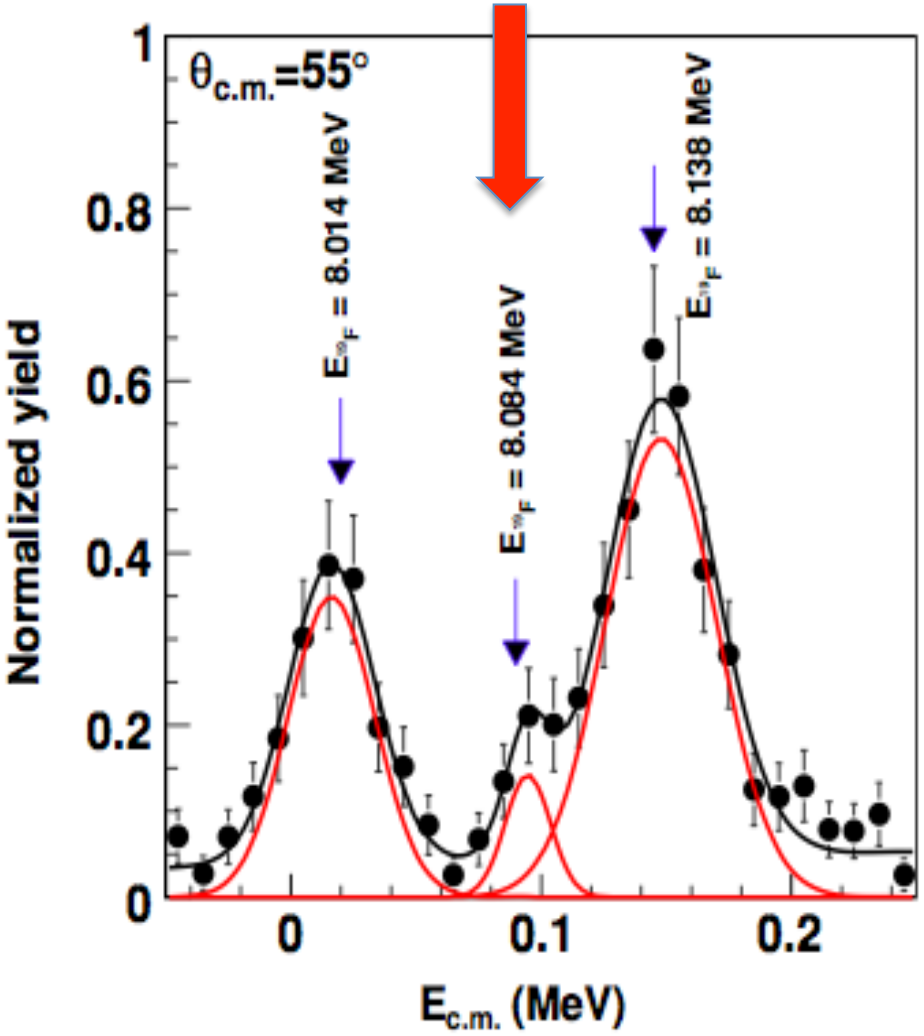
via the $^{18}O + d \rightarrow \alpha_o + {}^{15}N + n$



The Fluorine problem in the AGB :

$^{18}O\ (p,\alpha)^{15}N$

New resonance



Reaction: $^{18}O + p \rightarrow \alpha_o + {}^{15}N$

via the $^{18}O + d \rightarrow \alpha_o + {}^{15}N + n$

CYCLOTRON- Texas A&M University, College Station, Texas, USA

E_{18O}= 60 MeV

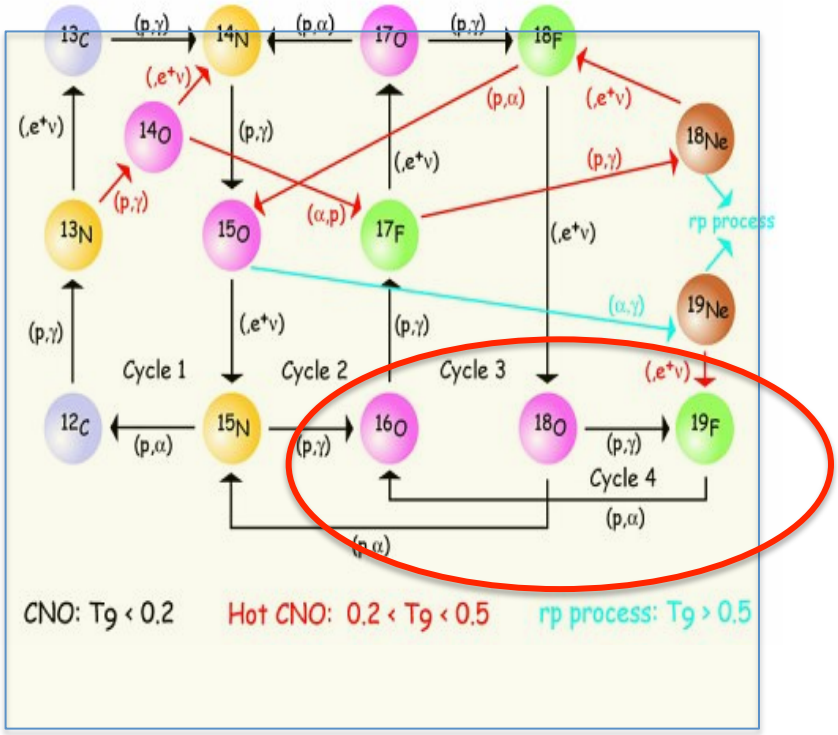
Target CD_2

TANDEM – Laboratori Nazionali del Sud –INFN, Catania, Italy

E_{18O} = 60 MeV

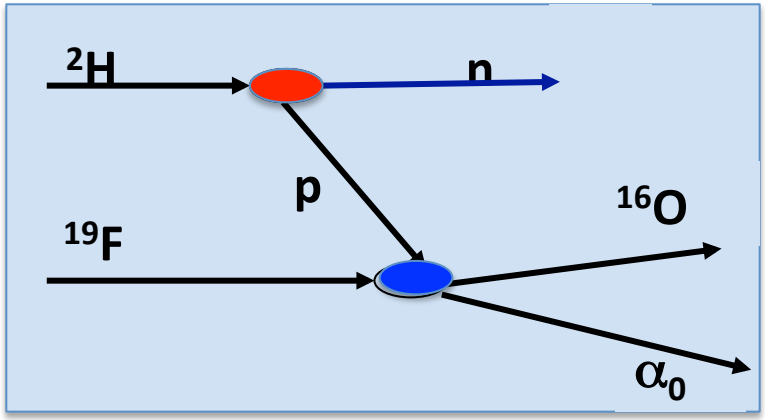
Target CD_2

La Cognata et al. : APJ 2010, PRC(2008), PRL, (2008)



Reaction $^{19}F + p \rightarrow \alpha_0 + {}^{16}O$

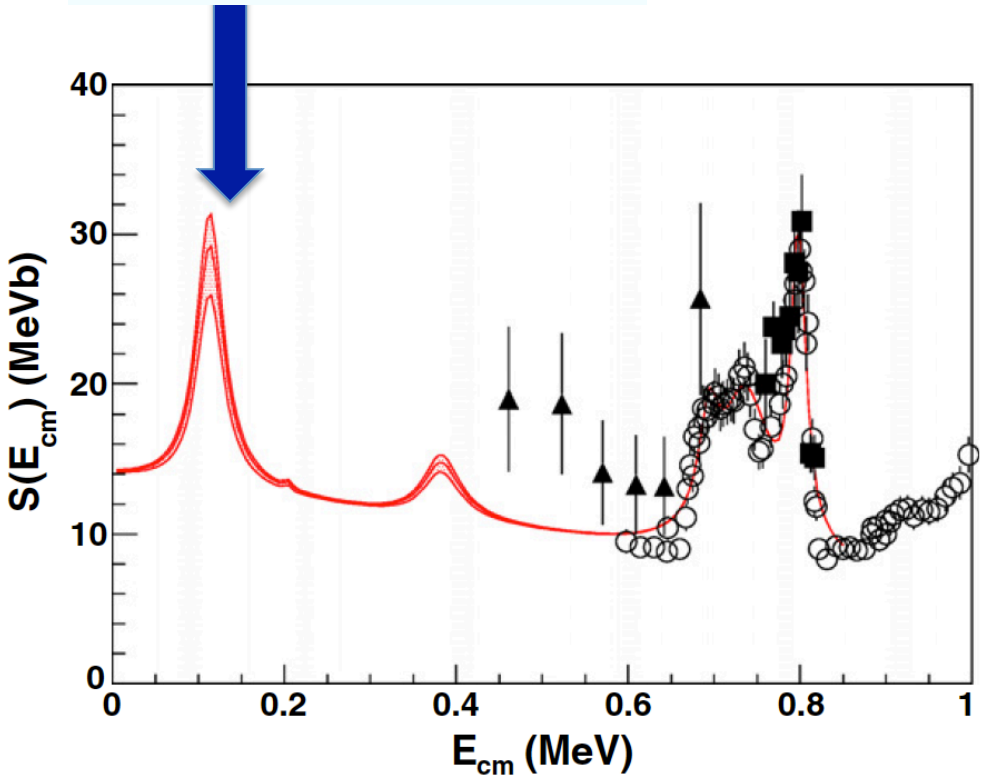
via the $^{19}F + d \rightarrow \alpha_0 + {}^{16}O + n$



The Fluorine problem in the AGB :

$$^{19}F\ (p,\alpha_0)^{16}N$$

New resonance



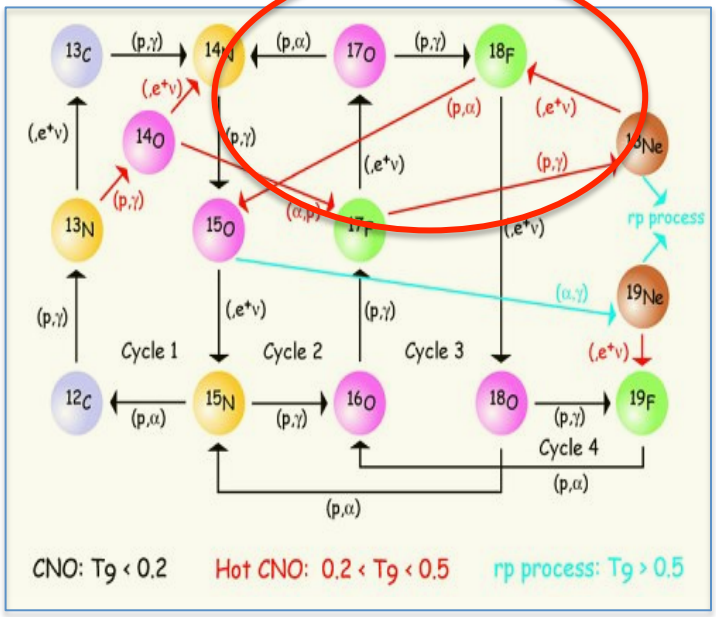
Reaction $^{19}F + p \rightarrow \alpha_0 + {}^{16}O$

via the $^{19}F + d \rightarrow \alpha_0 + {}^{16}O + n$

TANDEM – Laboratori Nazionali del Sud –INFN, Catania, Italy

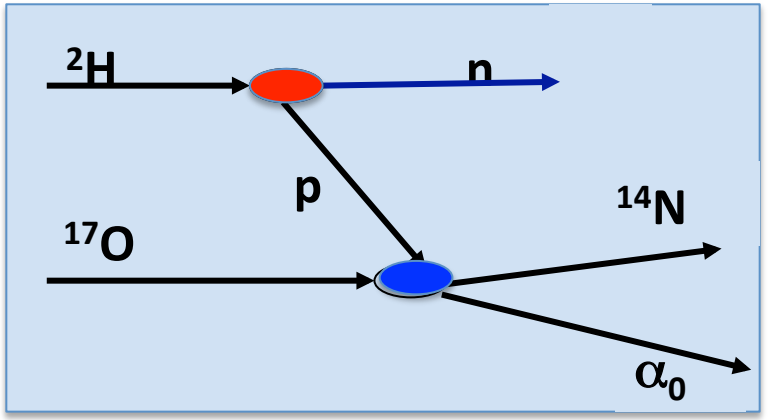
$E_{^{19}F} = 50$ MeV
Target CD_2

M. La Cognata et al. ApJ Lett. 2011



Reaction: $^{17}O + p \rightarrow \alpha_o + {}^{14}N$

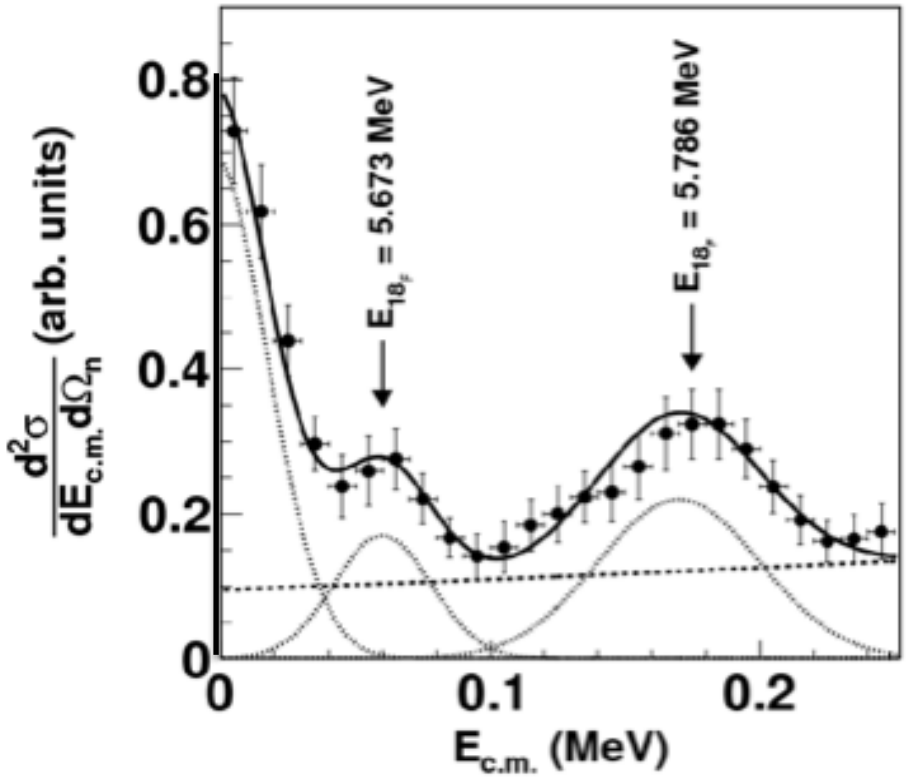
via the $^{17}O + d \rightarrow \alpha_o + {}^{14}N + n$



Novae

$^{17}O\ (p,\alpha)^{14}N$

First confimation resonance

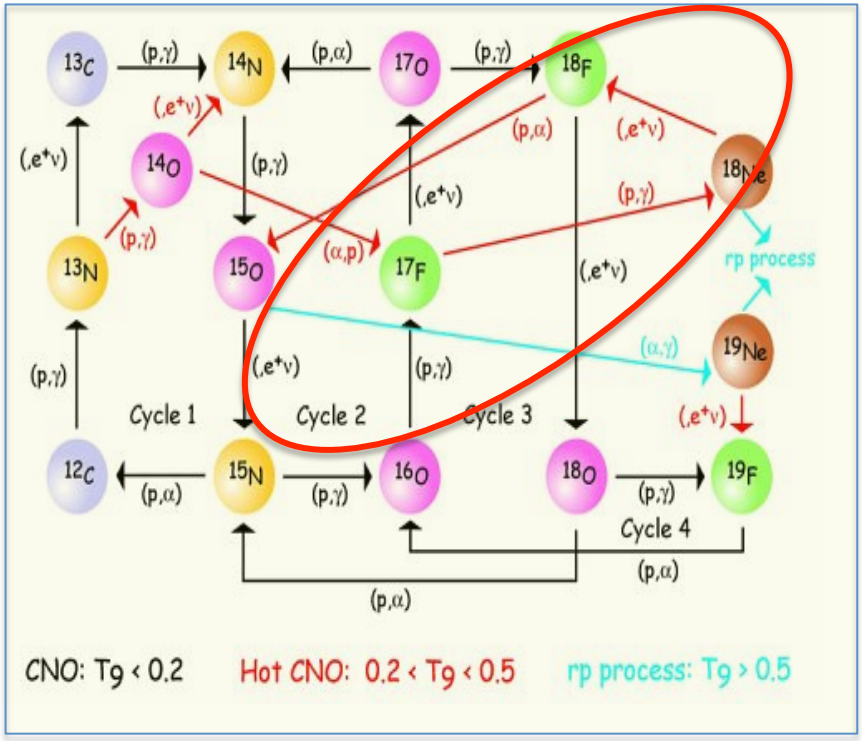


Reaction: $^{17}O + p \rightarrow \alpha_o + {}^{14}N$
via the $^{17}O + d \rightarrow \alpha_o + {}^{14}N + n$

TANDEM – Laboratori Nazionali del Sud –INFN, Catania, Italy

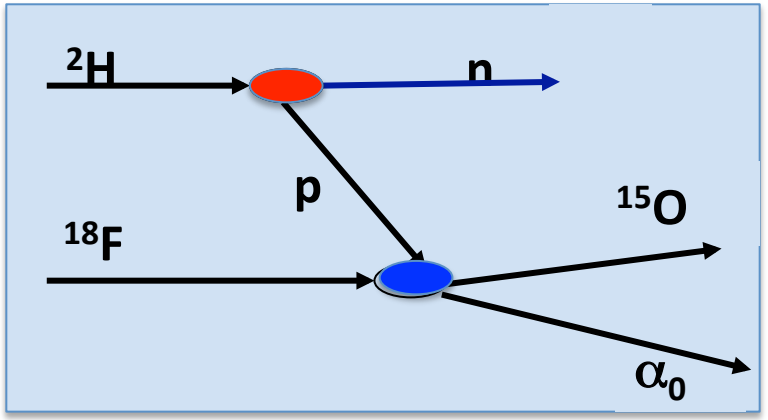
$E_{^{17}O}$ = 41 MeV
Target CD_2

L. Sergi, et al. et al PRC (R) (2010)



Reaction: $^{18}F + p \rightarrow \alpha_o + {}^{15}O$

via the $^{18}F + d \rightarrow \alpha_o + {}^{15}O + n$



Novae

$^{18}F\ (p,\alpha)^{15}O$

1. TITOLO

“Potenziamento delle risorse sperimentali dei LNS per ricerche di eccellenza nel campo dell’ Astrofisica Nucleare, con fasci stabili e radioattivi .”

TEMPI PER LA REALIZZAZIONE

Il progetto richiede uno sviluppo di 3 anni.

3. COORDINATORE DEL PROGETTO

Spitaleri Claudio

4. ELENCO DEI PARTECIPANTI

- **Clementina Agodi,**
- **Antonello Anzalone**
- **Luciano Calabretta,**
- **Francesco Cappuzzello**
- **Luigi Celona,**
- **Silvio Cherubini,**
- **Luigi Cosentino,**
- **Alessia Di Pietro ,**
- **Pier Paolo Figuera,**
- **Santo Gammino,**
- **Marisa Gulino,**
- **Marcello Lattuada,**
- **Rosario Gianluca Pizzone,**
- **Danilo Rifuggiato,**
- **Stefano Romano,**
- **Claudio Spitaleri,**
- **Salvatore Tudisco,**

Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN, Catania
Dipartimento di Fisica ed Astronomia, Università di Catania

6- Clementina Agodi,
7- Luciano Calabretta,
7- Antonello Anzalone,
8- Santo Gammino,
9- Alessia Di Pietro ,
10- Luigi Celona,
11- Luigi Cosentino,
12- Pier Paolo Figuera,
13- Rosario Gianluca Pizzone,
14- Danilo Rifuggiato,
15- Salvatore Tudisco,
16- Marisa Gulino,

Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN, Catania

17- Marco La Cognata[1]	FIRB INFN	**(ASFIN)**
18- Livio Lamia[2]	FIRB (univ.)	**(ASFIN)**
19- Giuseppe Rapisarda[1,2]	Ass. Univ·	**(ASFIN)**
20- Letizia Sergi[1,2]	Ass. Univ·	**(ASFIN)**
21- Sebastiana Puglia[1,2]	Ass. Univ·	**(ASFIN)**
22- Roberta Spartà[1,2]	Dottorato	**(ASFIN)**
23- Iolanda Indelicato[1,2]	Dottorato	**(ASFIN)**
24- Aurora Tumno[1]	Prof. Ass.	**(ASFIN)**
25 - Rithesh[1]	post. doct	**(ASFIN)**
26- Seya[1]	post. doct	**(ASFIN)**

27- Salvatore Russo[1]	(laureando **ASFIN)**	
28- Giuseppe D'Agata[1]	(laureando **ASFIN)**	

1-Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN, Catania
2- Dipartimento di Fisica ed Astronomia, Università di Catania

COLLABORAZIONI NAZIONALI ED INTERNAZIONALI

USA; TAMU; College Station,Texas
USA, TAMU, Converse
USA; FSU, Florida
USA; Notre Dame, Indiana

GIAPPONE; CNS-RIKEN,Tokyo

CINA; CIAE, Pechino

BRASILE; DPN,San Paolo

CANADA; Vancouver

KAZAKHISTAN; INP
UZBEKHISTAN; Taskent
RUSSIA; Mosca

COLLABORAZIONI NAZIONALI ED INTERNAZIONALI

REPUBLICA CECA; Rez

UNGHERIA; Debrecen

FRANCIA; Paris Sud (IN2P3)

FRANCIA ; CSNSM,Orsay,

CROAZIA; IRB Zagabria

REGNO UNIT, Edimburgo

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

	I° anno	II° anno	III° anno	Totale
Apparecchiature e altri beni durevoli	2,120	0,150	0,075	2,345
Materiale di consumo per la ricerca e servizi	0,930	0,070	0,050	1,050
Spese di personale (emolumenti)	1,300	0,90	0,90	1,480
Spese di personale (missioni)	0,140	0,100	0,060	0,300
Spese generali (overhead)	0,449	0,121	0,118	0,518
Totale	4,939	0,451	0,303	5,693

RISORSE DA ACQUISIRE

Finanziamento di 5,693 M€ in 3 anni,

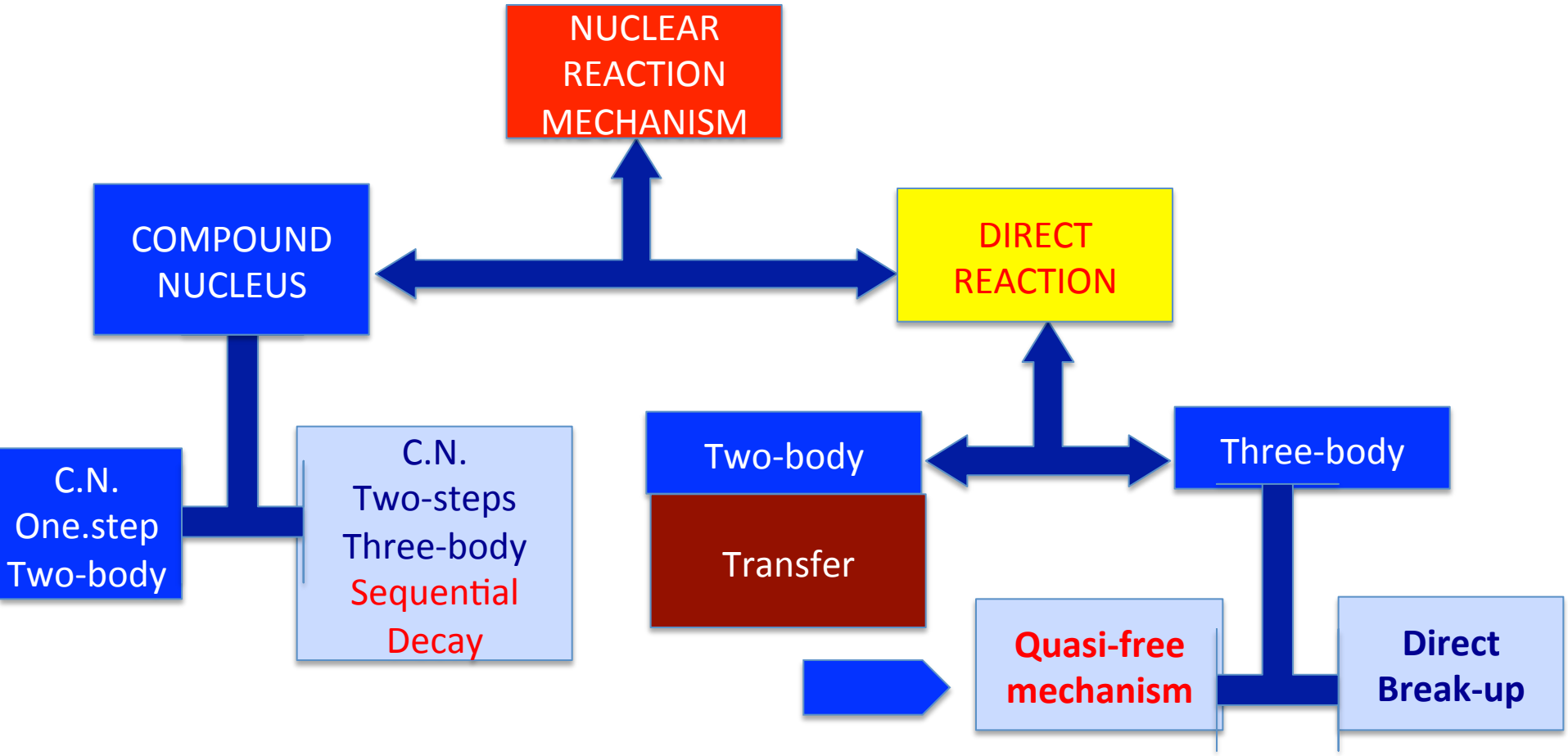
di cui 4,939M€ nel primo anno.

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

	I° anno	II° anno	III° anno	Totale
Apparecchiature e altri beni durevoli	2,120	0,150	0,075	2,345
Materiale di consumo per la ricerca e servizi	0,930	0,070	0,050	1,050
Spese di personale (emolumenti)	1,300	0,90	0,90	1,480
Spese di personale (missioni)	0,140	0,100	0,060	0,300
Spese generali (overhead)	0,449	0,121	0,118	0,518
Totale	4,939	0,451	0,303	5,693

ATTIVITA’ DI RICERCA

MAIN REACTION MECHANISMS WITH THREE PARTICLES IN THE FINAL STATE



	Binary reaction	Indirect reaction	E_{lab}	Q	Accelerator	Ref.
1	$^{7}Li(p, \alpha)^{4}He$	$^{2}H(^{7}Li, \alpha\,\alpha)n$	19-22	15.122	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(Spitaleri *et al.* PRC,1999, Lattuada *et al.* ApJ, 2001)
2	$^{7}Li(p, \alpha)^{4}He$	$^{7}Li(^{3}He, \alpha\,\alpha)d$	33	11.853	CYCLOTRON, Rez, Praha	(Tumino *et al.* EPJ, 2005)
3	$^{6}Li(p, \alpha)^{3}He$	$^{2}H(^{6}Li, \alpha\,^{3}He)n$	14,25	1.795	TANDEM 13 Mv LNS-INFN, Catania	(Tumino *et al.* PRC, 2003)
4	$^{9}Be(p, \alpha)^{6}Li$	$^{2}H(^{9}Be, \alpha\,^{6}Li)n$	22	-0.099	TANDEM CIAE, Beijing TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(Wen *et al.* PRC, 2008)
5	$^{11}B(p, \alpha)^{8}Be$	$^{2}H(^{11}B, \alpha\,^{8}Be)n$	27	6.36	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(Spitaleri *et al* . PRC, 2004, Lamia *et al.* JPG, 2011)
6	$^{15}N(p, \alpha)^{12}C$	$^{2}H(^{15}N, \alpha\,^{12}C)n$	60	2.74	CYCLOTRON, TAMU, College Station TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(La Cognata *et al.* PRC,, 2008,
7	$^{18}O(p, \alpha)^{15}N$	$^{2}H(^{18}O, \alpha\,^{15}N)n$	54	1.76	(CYCLOTRON, TAMU, College Station TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(La Cognata *et al.* PRL 2008,
8	$^{19}F(p, \alpha)^{16}O$	$^{2}H(^{19}F, \alpha\,^{16}O)n$	50	8.11	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	La Cognata *et al.* ApJ Lett., 2011)
9	$^{17}O(p, \alpha)^{14}N$	$^{2}H(^{17}O, \alpha^{14}N)n$	45	-1.032	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania TANDEM 11 MV Notre Dame	Sergi et al. PRC (R), 2010

	Binary reaction	Indirect reaction	E_{lab}	Q	Accelerator	Ref.
10	$^{18}F(p,\alpha)^{15}O$	$^{2}H(^{18}F, \alpha^{15}O)n$	48		CYCLOTRON CNS-RIKEN, Tokyo	Preliminary results
11	$^{10}B(p, \alpha)^{7}Be$	$^{2}H(^{10}B, \alpha^{7}Be)n$	27		TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	Preliminary results
12	$^{6}Li(d,\alpha)^{4}He$	$^{6}Li(^{6}Li,\alpha\alpha)^{4}He$	5 4.8	22.372	TANDEM Demoscritos,Atene TANDEM, IRB, Zagreb	(Cherubini *et al.* ApJ, 1996) (Spitaleri *et al* .PRC, 2001)
13	$^{6}Li(d,\alpha)^{4}He$	$^{6}Li(^{6}Li,\alpha\alpha)^{4}He$			CYCLOTRON Rez, Praha	(Pizzone et al. PRC, 2011)
14	$^{3}He(d,\alpha)^{1}H$	$^{6}Li(^{3}He,p^{4}He)^{4}He$	5,6	16.878	DINAMITRON, Bochum	(La Cognata *et al.* 2005)
15	$^{2}H(d,p)^{3}H$	$^{2}H(^{6}Li,p^{3}He)^{4}He$	14	2.59	DINAMITRON, Bochum	(Rinollo *et al. EPJ* 2005)
16	$^{2}H(d,p)^{3}H$	$^{2}H(^{3}He,p^{3}H)^{1}H$	18	-1.46	CYCLOTRON, Rez, Praha	(Tumino et al. PLB 2011)
17	$^{2}H(d,n)^{3}He$	$^{2}H(^{3}He,n^{3}He)^{1}H$	18	-2.224	CYCLOTRON Rez, Praha	(Tumino et al. PLB 2011)
18	$^{9}Be(p,d)^{8}Be$	$^{9}Be(d,d^{8}Be)n$			TANDEM 13 MV CIAE, Beijing	Preliminary results
19	$^{6}Li(n,a)^{3}H$	$^{2}H(^{6}Li, t\ \alpha)^{1}H$	14	2.224	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(Tumino *et al.* 2004)

	Binary reaction	Indirect reaction	E_{lab}	Q	Accelerator	Ref.
20	$^{17}O(n,a)^{14}C$	$^{17}O(n, a^{14}C)^{1}H$	43.5	-0.407	TANDEM 11 MV Notre Dame TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	Guardo et al-: LNS_INFN ACTIVY REPORT 2010,p.78 ISSN 1837-1561
21	$^{13}C(a,n)^{16}O$	$^{13}C(^{6}Li, a\ n)^{16}O$			TANDEM ? MV FSU, Taallaasseee	Phys. Rev. Lett. 2012
22	$^{12}C(^{12}C,a)^{20}Ne$	$^{16}O(^{16}O,a^{20}Ne)^{4}He$			TANDEM 13 MV BUCHAREST	ANALYSIS IN PROGRESS
23	$^{12}C(a,a)^{12}C$	$^{13}C(^{6}Li, a\ n)^{16}O$	20	0	TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania	(Spitaleri et al. EPJ 2000)
24	$^{1}H(p,p)^{1}H$	$^{2}H(p,pp)n$	5,6	2,224	CYCLOTRON ATOMKI,Debrecen TANDEM IRB, Zagreb TANDEM 13 MV LNS-INFN, Catania TANDEM 5 MV Napoli University	(Tumino et al. PRL 2007) Tumino et al. PRC 2009

"Trojan Horse -Nucleus"

"Trojan Horse Nucleus" candidates

	Nucleus Trojan Horse	clusters	Inter-cluster momentum *l-relative*	Bindind energy (MeV)
1	d	p-n	0	2.2
2	t	d-n	0	6.3
3	^{3}He	d-p	0	5.5
4	^{6}Li	d-α	0	1.5
5	^{7}Li	t-α	1	2.5
6	^{7}Be	^{3}He-α	1	1.6
7	^{9}Be	^{5}He-α	0	2.5
8	^{16}O	^{12}C-α	0	7.16
9	^{20}O	^{16}O-α	0	4.73

	Indirect Beam	"Trojan Horse nucleus"
1	**n**	d, ^{3}H
2	p	d, ^{3}He
3	d	^{3}He, ^{3}H, ^{6}Li
4	t	^{7}Li
5	^{3}He	^{7}Be
6	α	^{6}Li, ^{7}Li, ^{7}Be, ^{9}Be
7	**^{5}He**	^{9}B

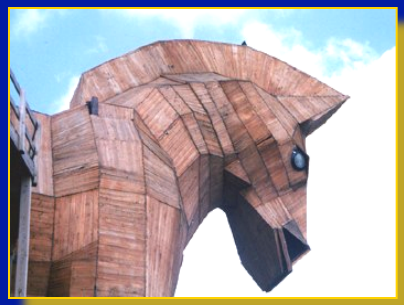
Attività di ricerca prevista:

Nel primo anno essendo l'acceleratore Tandem non disponibile per attività di ricerca il progetto prevede la continuazione dell'attività sperimentale presso altri laboratori.

Primo anno:

$^{16}O + {}^{12}C$

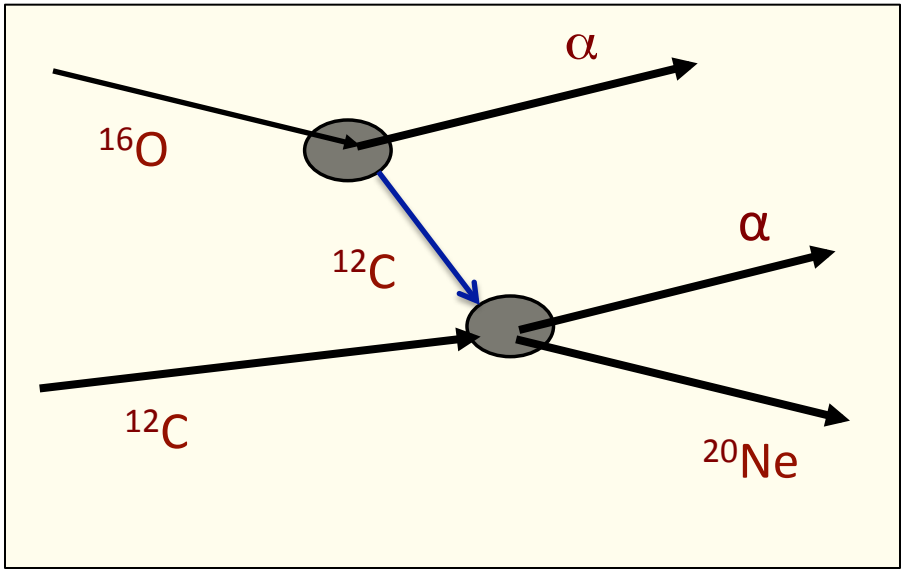
$^{12}C + {}^{12}C$

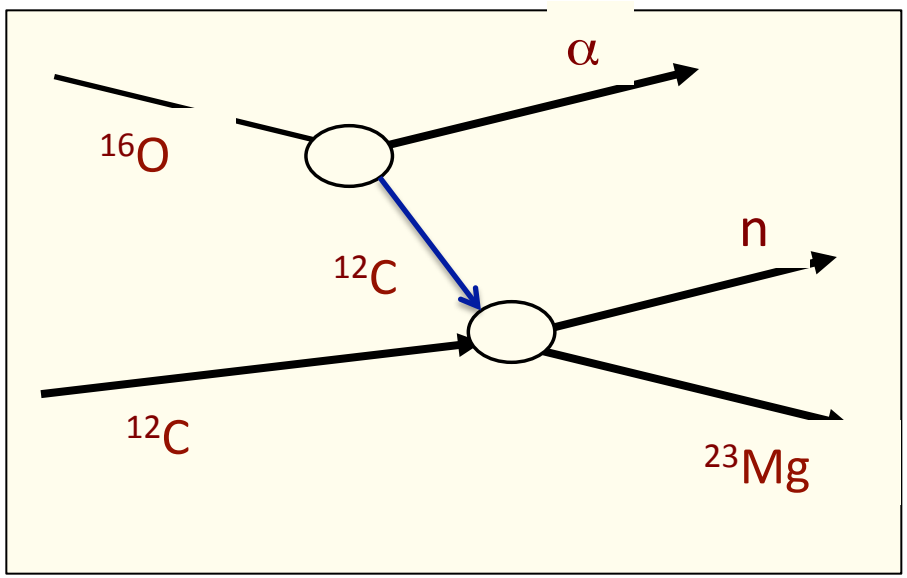


Study of $^{12}C + ^{12}C$ reactions

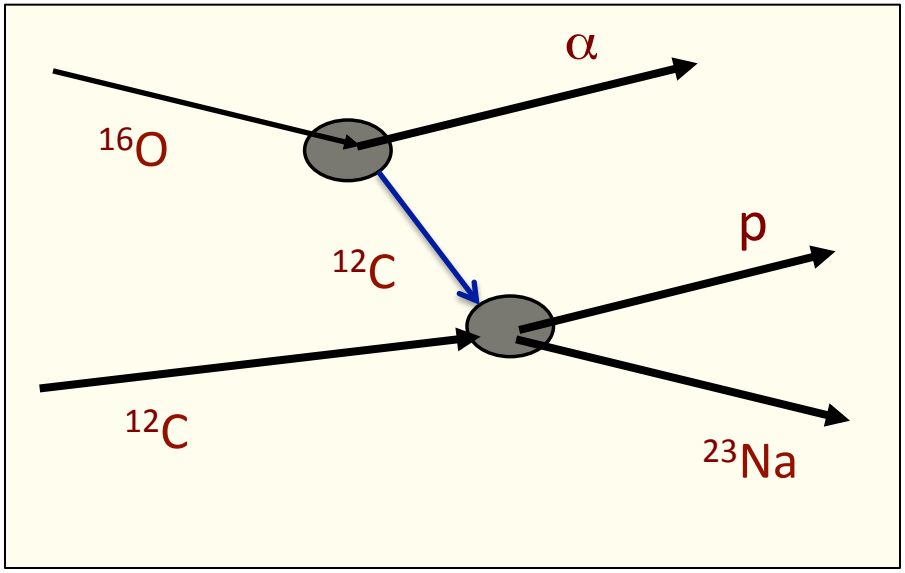
New application : $^{12}C + {}^{16}O \rightarrow \alpha + {}^{20}Ne + a$

$^{12}C + {}^{16}O \rightarrow p + {}^{23}Na + a$



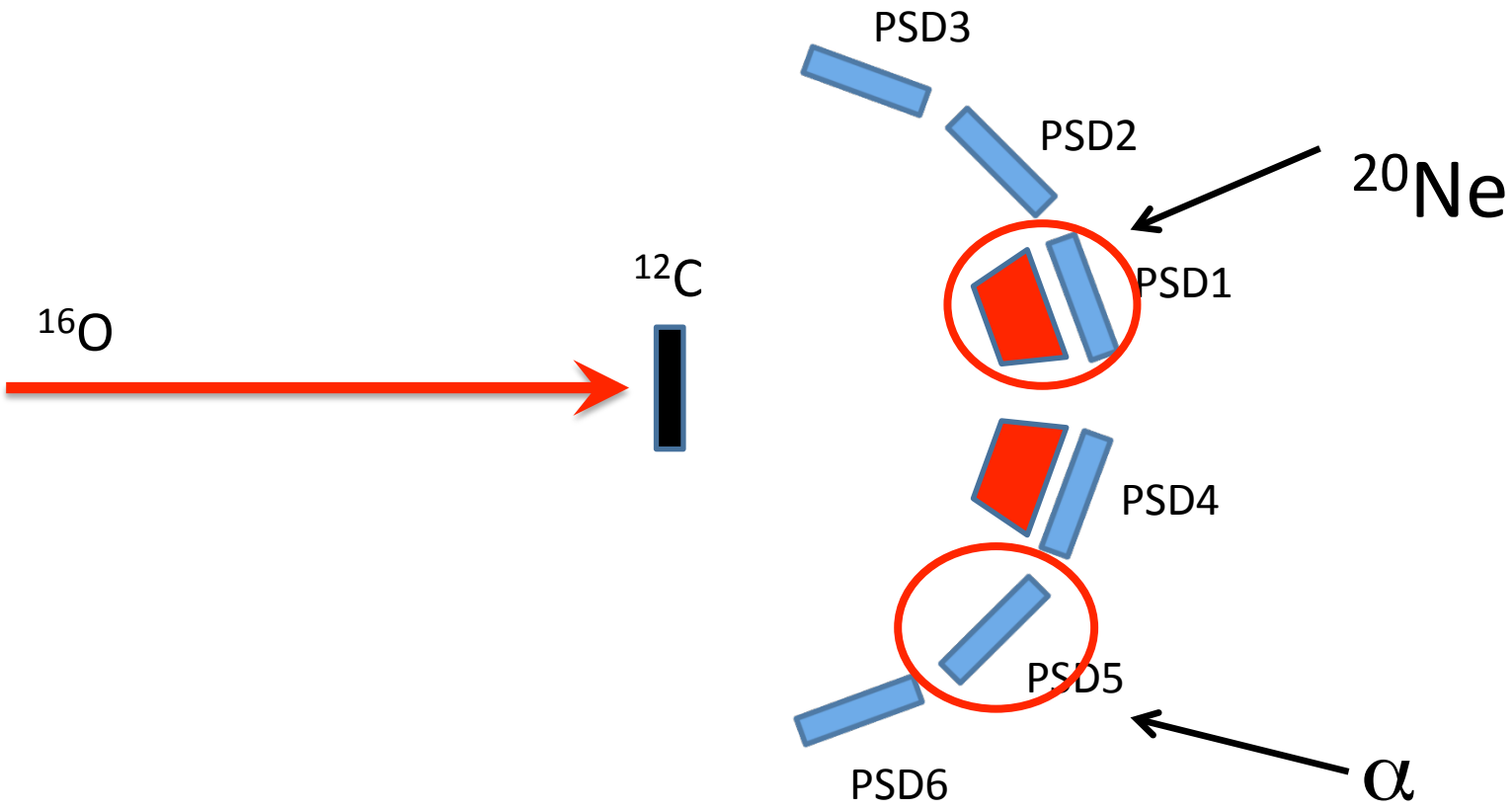


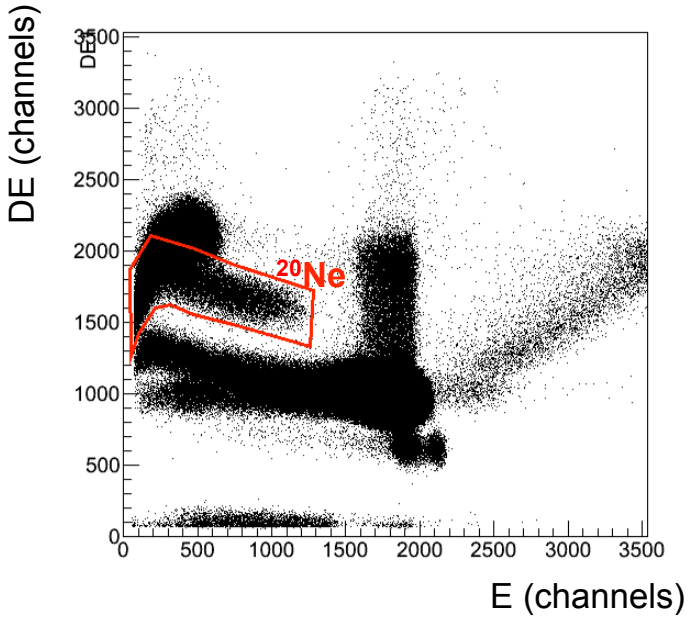
$$^{12}C + {}^{16}O \rightarrow \alpha + {}^{20}Ne + a$$
$$^{12}C + {}^{16}O \rightarrow p + {}^{23}Na + a$$

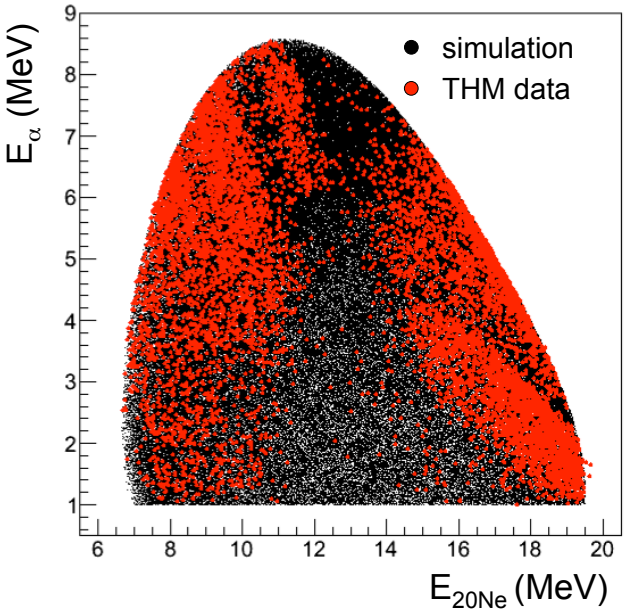


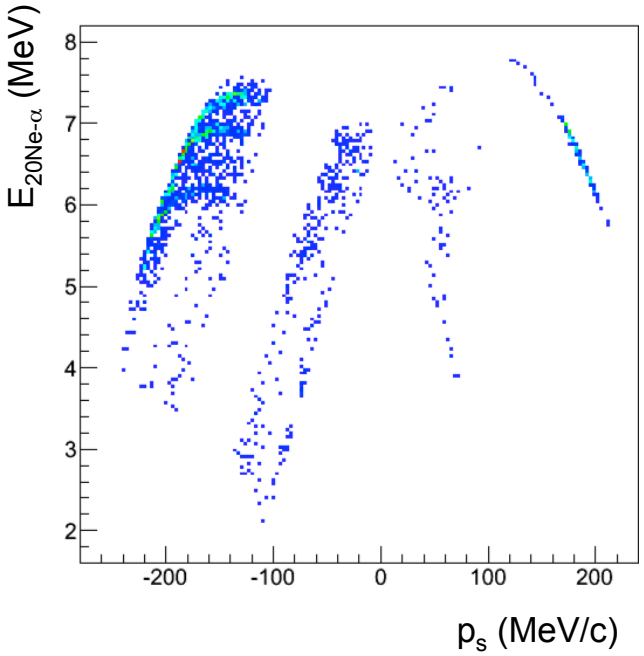
TANDEM –IPN
-BUCHAREST

$^{16}O + ^{12}C \rightarrow ^{20}Ne + \alpha + \alpha$




DE (channels)
E (channels)
DE
^{20}Ne

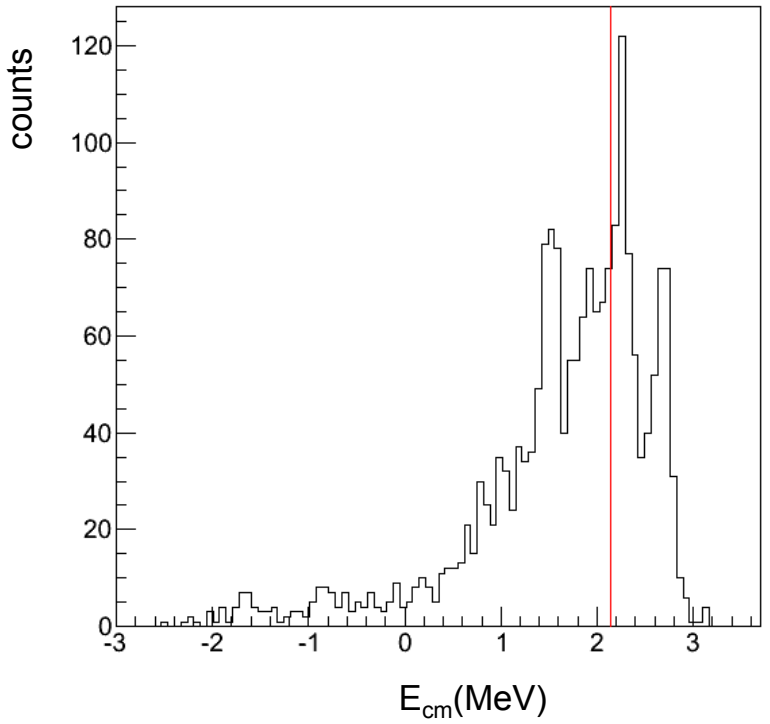

simulation
THM data
E_α (MeV)
E_{20Ne} (MeV)


$E_{20Ne-\alpha}$ (MeV)
p_s (MeV/c)

$^{16}O+^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + \alpha + \alpha$

DATA ANALYSIS IN PROGRESS

PRELIMINARY DATA



2013 – 2014:

1- $^{12}C\ (^{12}C, \alpha\ )^{20}Ne$ $(^{16}O + {}^{12}O \rightarrow \alpha + {}^{20}Ne + n)$

2- $^{12}C\ (^{12}C, p\ )^{23}Na$ $(^{16}O + {}^{12}O \rightarrow p + {}^{23}Na + n)$

3- $^{12}C\ (^{12}C, n\ )^{23}Mg$ $(^{16}O + {}^{12}O \rightarrow n + {}^{23}Mg + n)$

- Si prevede 2 turni per canale di circa 21 giorni di fascio INFH Bucharest

  20 + 14 =34 giorni

- 5 ricercatori x (20) giorni x 120€ 12.000 €

- 4 ricercatori x (14) giorni x 120€ 6.720 €

  9 voli aereo x 650 € 5.850 €

- totale 24.570 € (x 6 run) ≈ 147.3.710 €

Selection of kinematic of a two body reaction of astrophysical interest.

(GAMOW ENERGY)

PHYSICAL REVIEW C 83, 045801 (2011)

Trojan horse particle invariance studied with the ^{6}Li(d,α)^{4}He and ^{7}Li(p,α)^{4}He reactions

R. G. Pizzone,[1] C. Spitaleri,[1,2] L. Lamia,[1,2] C. Bertulani,[3] A. Mukhamedzhanov,[4] L. Blokhintsev,[5] V. Burjan,[6] S. Cherubini,[1,2] Z. Hons,[6] G. G. Kiss,[1,7] V. Kroha,[6] M. La Cognata,[1,2] C. Li,[8] J. Mrazek,[6] Š. Piskoř,[6] S. M. R. Puglia,[1,2] G. G. Rapisarda,[1,2] S. Romano,[1,2] M. L. Sergi,[1,2] and A. Tumino[1,9]

[1]*Laboratori Nazionali del Sud-INFN, Catania, Italy*

[2]*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Catania, Catania, Italy*

[3]*Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University-Commerce, Commerce, Texas 75025, USA*

[4]*Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, USA*

[5]*Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

[6]*Institute of Nuclear Physics of ASCR, Praha-Řež, Czech Republic*

[7]*Atomki, Debrecen, Hungary*

[8]*Beijing Radiation Center, Beijing, China*

[9]*Università degli Studi di Enna "Kore," Enna, Italy*

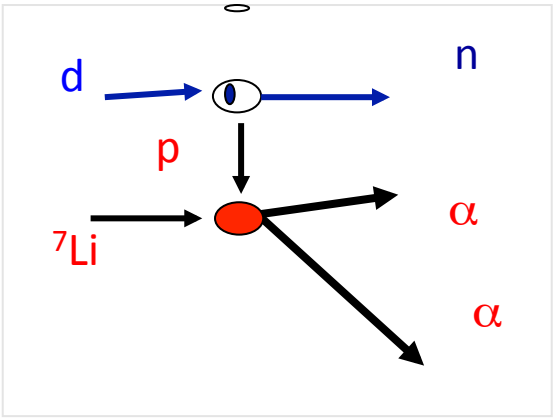
(Received 11 January 2011; revised manuscript received 4 March 2011; published 11 April 2011)

The Trojan horse nucleus invariance for the binary reaction cross section extracted from the Trojan horse reaction was tested using the quasifree ^{3}He(^{6}Li,$\alpha\alpha$)H and ^{3}He(^{7}Li,$\alpha\alpha$)^{2}H reactions. The cross sections for the ^{6}Li(d,α)^{4}He and ^{7}Li(p,α)^{4}He binary processes were extracted in the framework of the plane wave approximation. They are compared with direct behaviors as well as with cross sections extracted from previous indirect investigations of the same binary reactions using deuteron as the Trojan horse nucleus instead of ^{3}He. The very good agreement confirms the applicability of the plane wave approximation which suggests the independence of the binary indirect cross section on the chosen Trojan horse nucleus, at least for the investigated cases.

DOI: 10.1103/PhysRevC.83.045801 PACS number(s): 25.60.Pj, 21.10.Pc, 24.50.+g, 25.55.Hp

VIRTUAL REACTION

$^{7}Li + p \rightarrow \alpha + \alpha$



Trojan Horse Nucleus

^{2}H

CLUSTER CONFIGURATION (p-n)

THREE BODY REACTION

$^{7}Li + d \rightarrow \alpha + \alpha + n$

Zadro et al. PRC. 40,(1989)181

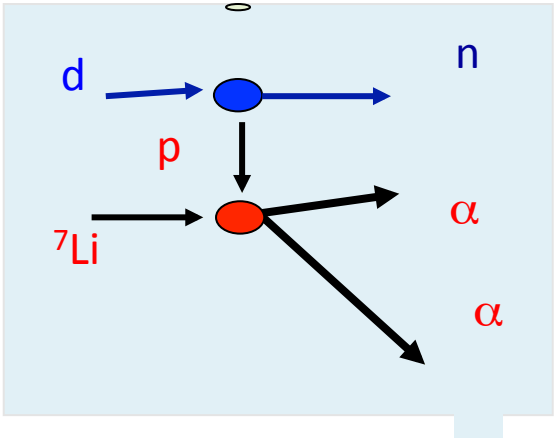
SEQUENTIAL DECAY

$d + {}^{7}Li \rightarrow \alpha + {}^{5}He$

$\hookrightarrow \alpha + n$

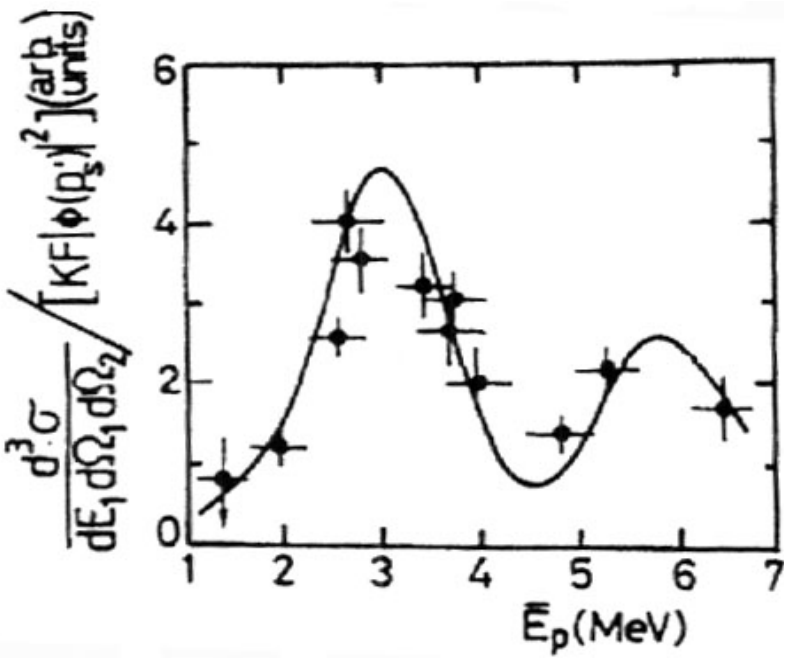
$d + {}^{7}Li \rightarrow n + {}^{8}Be$

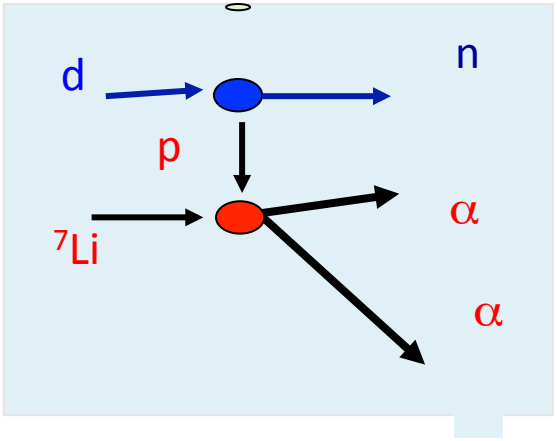
$\hookrightarrow \alpha + \alpha$



Zadro et al. PRC. 40,(1989)181

E_{7Li} =28-48 MeV (1979)

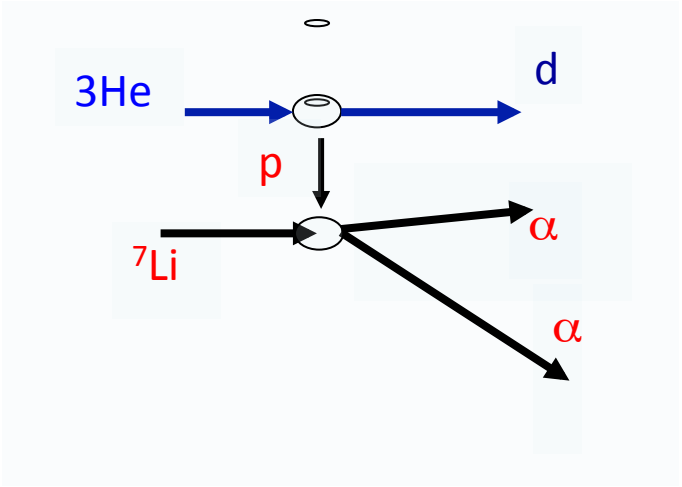




Zadro et al. PRC. 40,(1989)181

VIRTUAL REACTION

$^{7}Li + p \rightarrow \alpha + \alpha$



Trojan Horse Nucleus

^{3}He

CLUSTER CONFIGURATION (d-n)

THREE BODY REACTION

$^{7}Li + ^{3}He \rightarrow \alpha + \alpha + d$

Zadro et al. PRC. 40,(1989)181

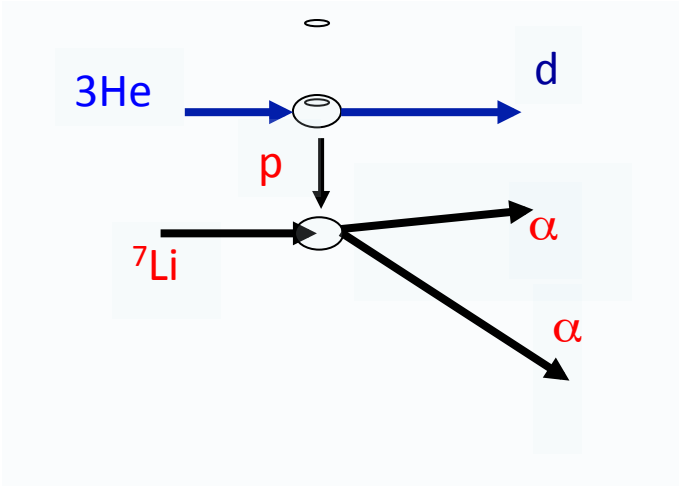
SEQUENTIAL DECAY

$^{3}He + {}^{7}Li \rightarrow \alpha + {}^{6}Li$

$\rightarrow \alpha + n$

$^{3}He + {}^{7}Li \rightarrow d + {}^{8}Be$

$\rightarrow \alpha + \alpha$



Zadro et al. PRC. 40,(1989)181

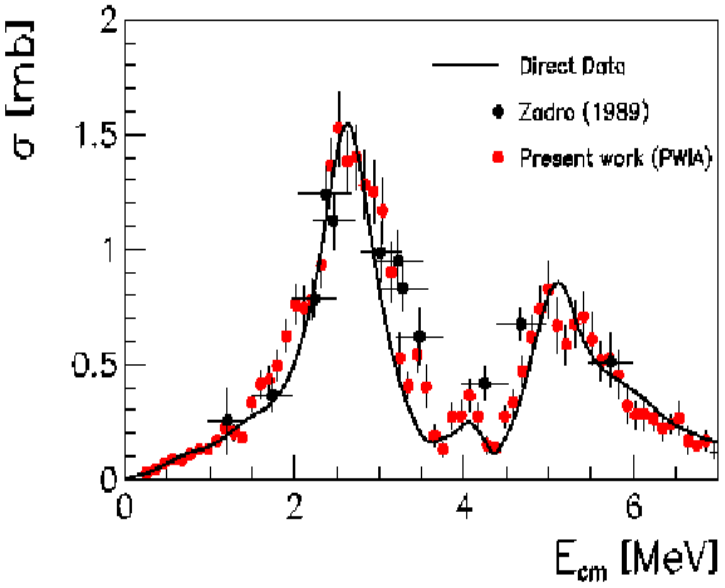
SEQUENTIAL DECAY

$^{3}He + {}^{7}Li \rightarrow \alpha + {}^{6}Li$

$\rightarrow \alpha + n$

$^{3}He + {}^{7}Li \rightarrow d + {}^{8}Be$

$\rightarrow \alpha + \alpha$



A.Tumino et al. : Epj (2005)

$^{14}N + {}^{12}C$

$^{12}C + {}^{12}C$

2013 – 2014:

1- $^{12}C\ (^{12}C, \alpha\ )^{20}Ne$ $(^{14}N + {}^{12}O \rightarrow \alpha + {}^{20}Ne + d)$

2- $^{12}C\ (^{12}C, p\ )^{23}Na$ $(^{14}N + {}^{12}O \rightarrow p + {}^{23}Na + d)$

3- $^{12}C\ (^{12}C, n\ )^{23}Mg$ $(^{14}N + {}^{12}O \rightarrow n + {}^{23}Mg + d)$

- Si prevede 2 turni per canale di circa 21 giorni di fascio INFH Bucharest

  20 + 14 = 34 giorni

- 5 ricercatori x (20) giorni x 120€ 12.000 €

- 4 ricercatori x (14) giorni x 120€ 6.720 €

  9 voli aereo x 650 € 5.850 €

- totale 24.570 € (x 6 run) = 147.3.710 €

$^{10}B + p$

Reacrion: $^{10}B + p \rightarrow a_o + {}^{7}Be$

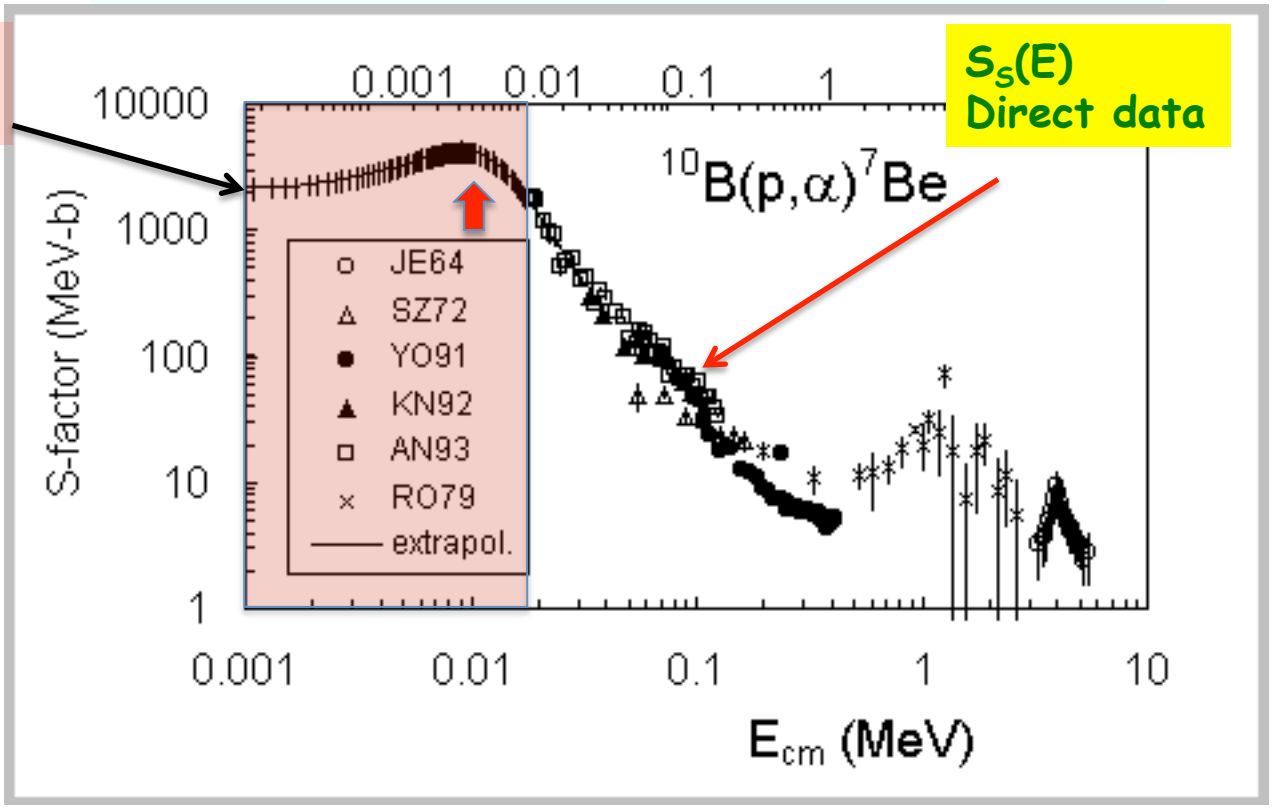
via the $^{10}B + d \rightarrow \alpha_o + {}^{7}Be + n$

Depletion lights nuclei:
Li, B, Be
ELECTRON SCREENING

RESONANCE AT GAMOW ENERGY

$S_b(E)$ Extrapolation

$S_s(E)$ Direct data

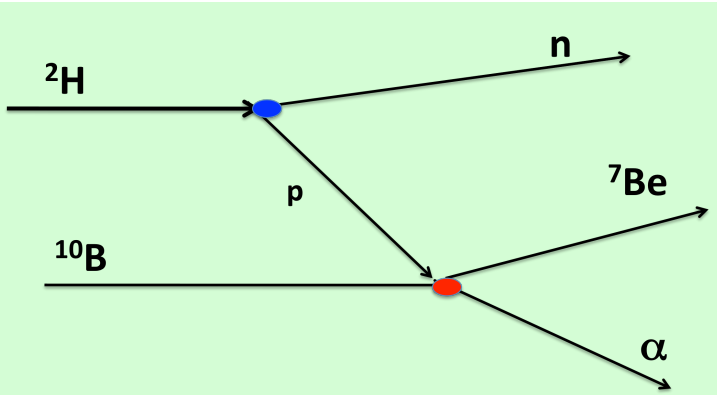


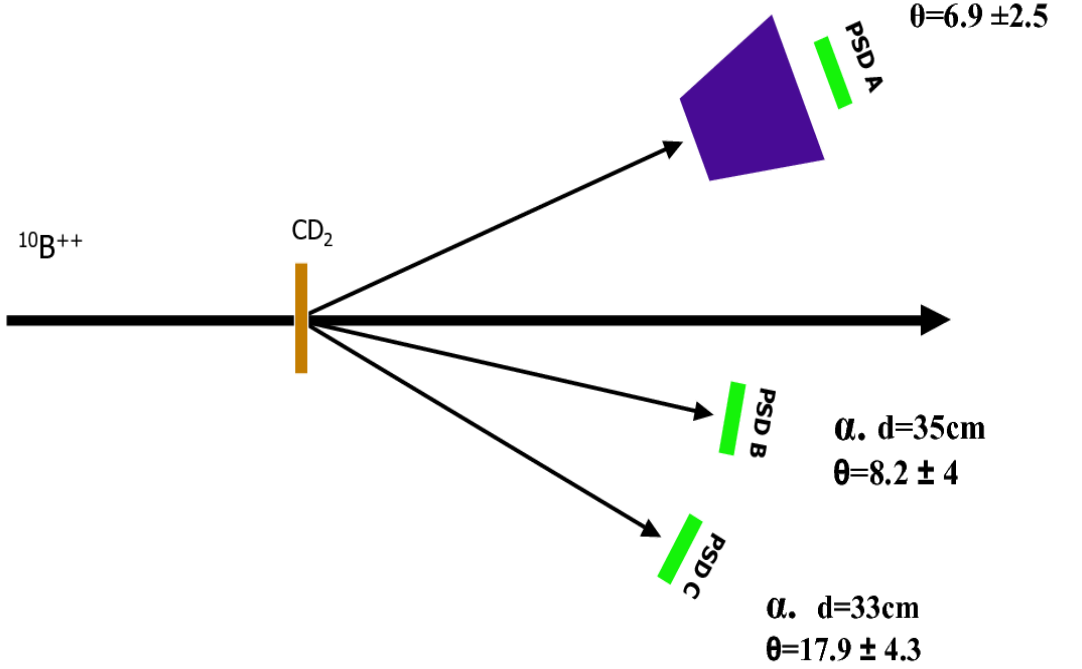
$^{10}B(d, \alpha_o\ {}^{7}Be)n$

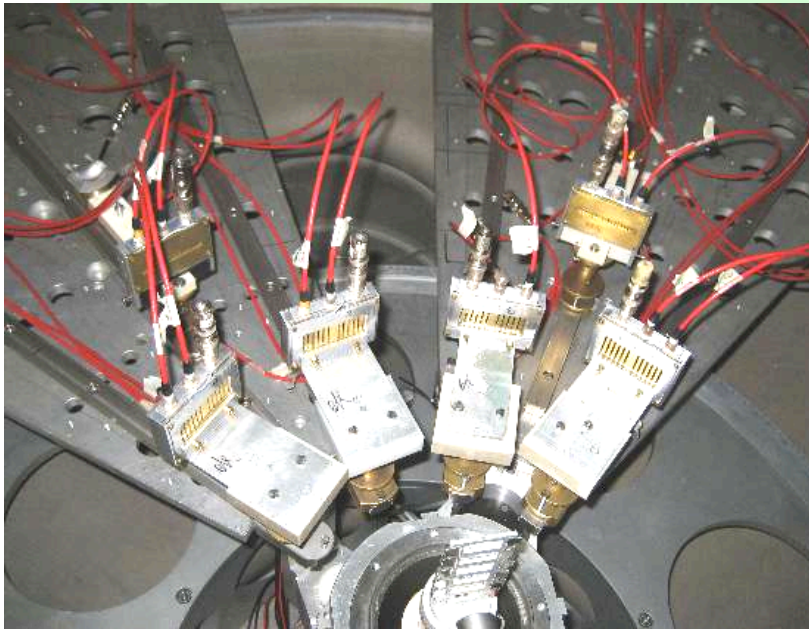
NACRE Compilation,
NPA 1999

E_{10B} = 27 MeV
TANDEM – DFN ,San Paolo, Brazil

E_{10B} = 27 MeV
TANDEM – LNS Catania,Italy



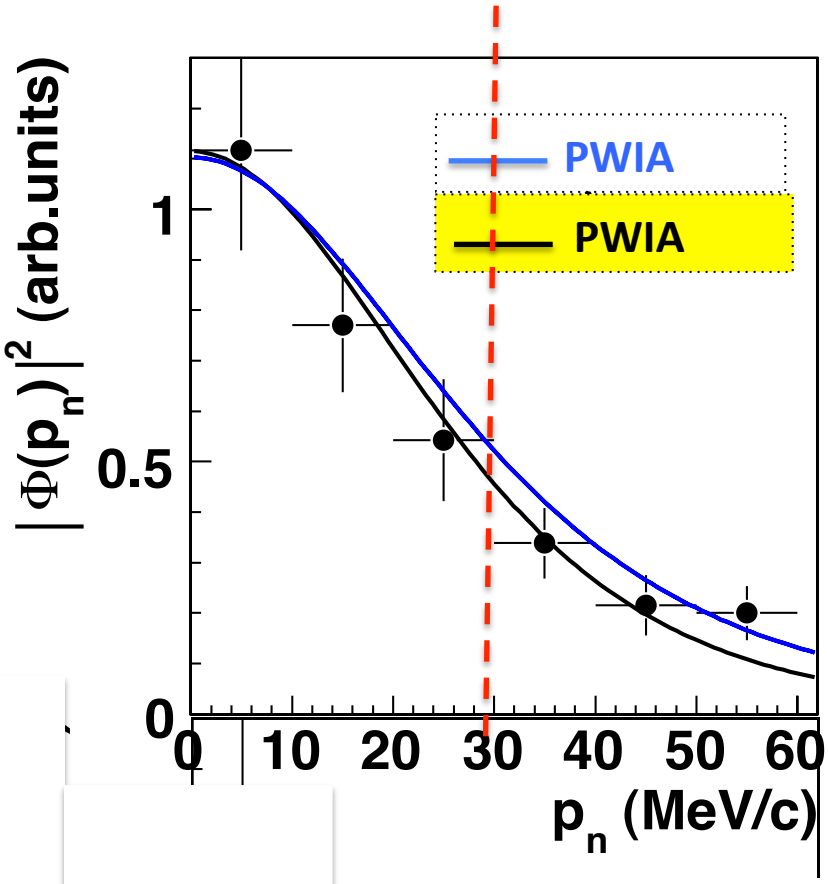




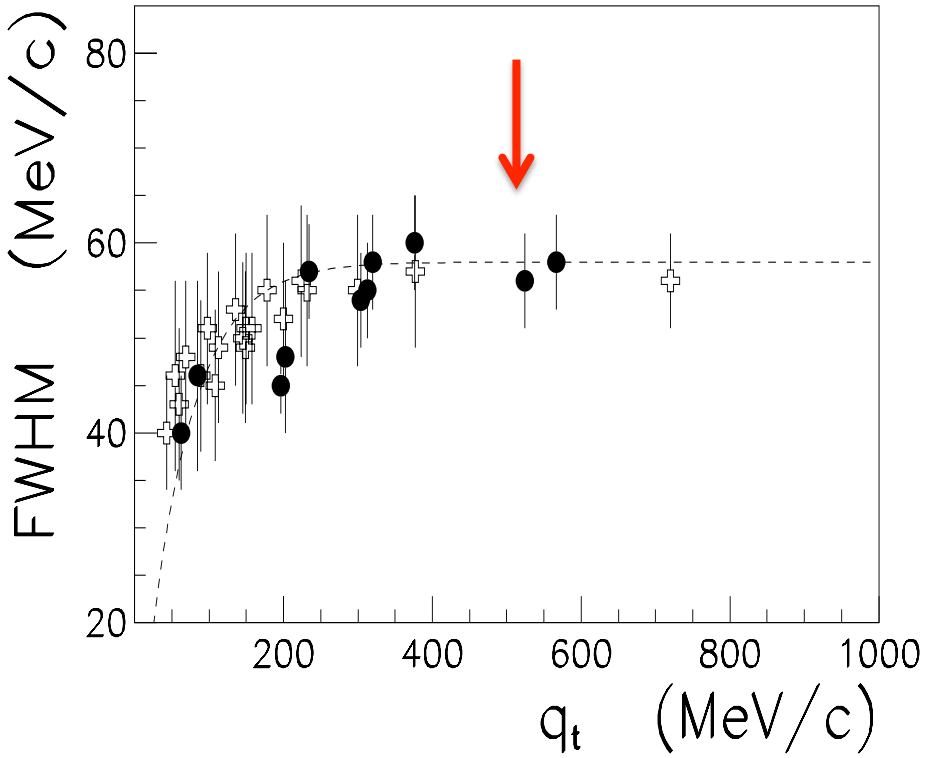
2000Chamber INFN-LNS

Experimental momentum distribution

EXPERIMENTAL MOMENTUM DISTRIBUTION



FWHM OF EXPERIMENTAL MOMENTUM DISTRIBUTION

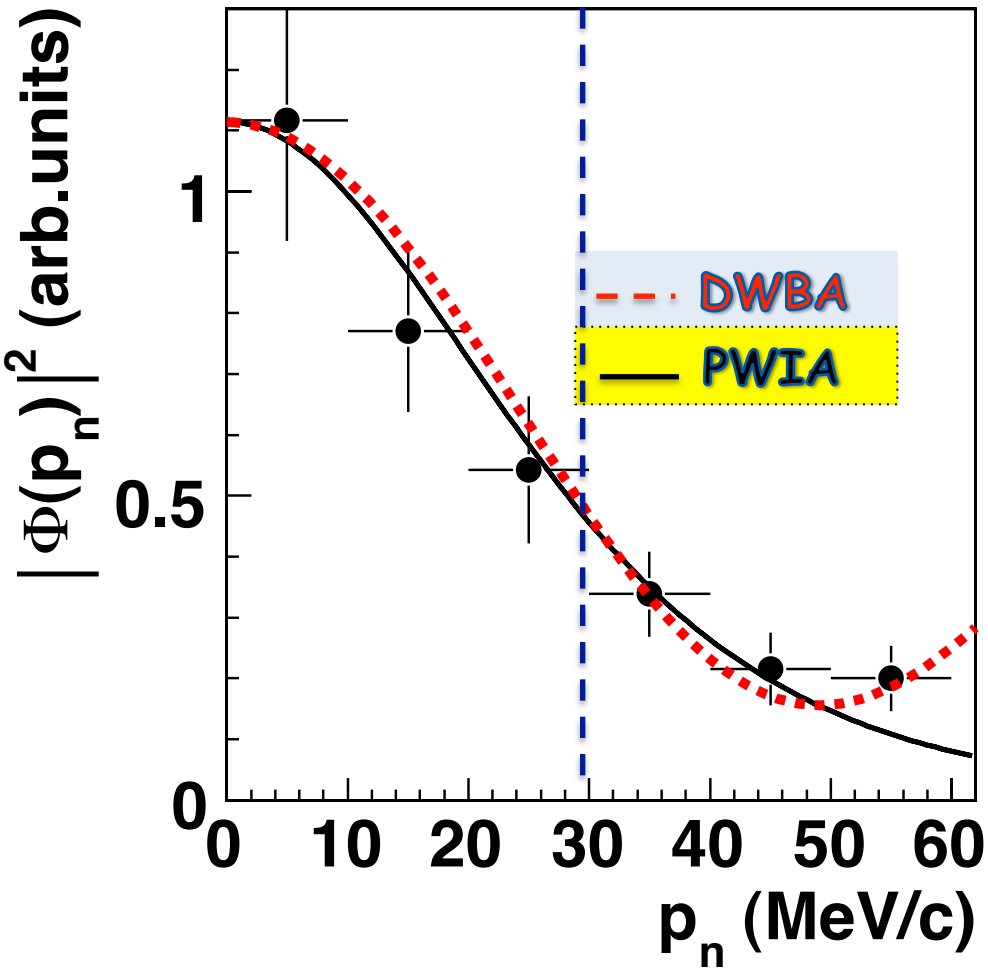


$^{10}B(d,\alpha^{7}Be)n$

S. Barbarino et al.; Phys. Rev. C 1982
R.G. Pizzone et al.: Phys. Rev. C 2011

Comparison PWIA Experimental momentum distribution with the DWBA Calculations.

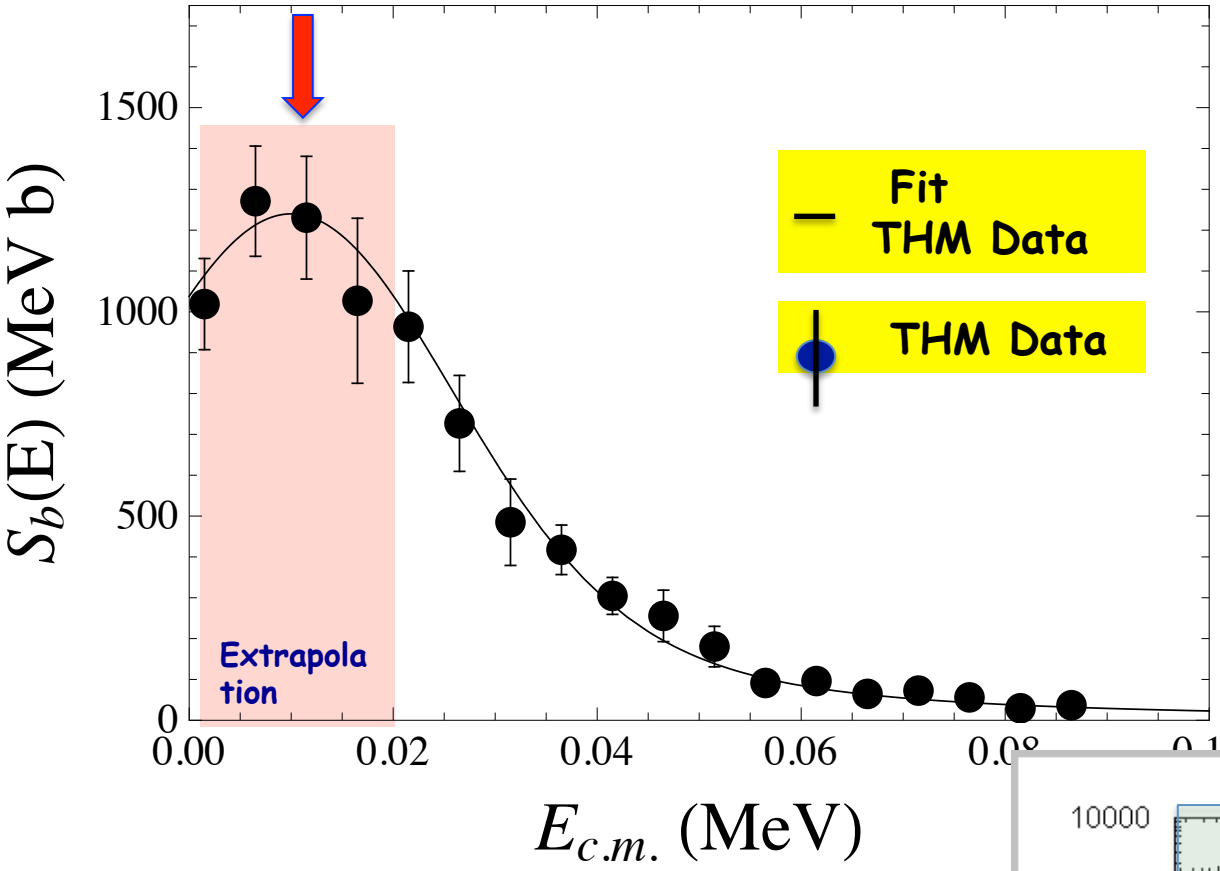
$^{10}B(d,\alpha^{7}Be)n$



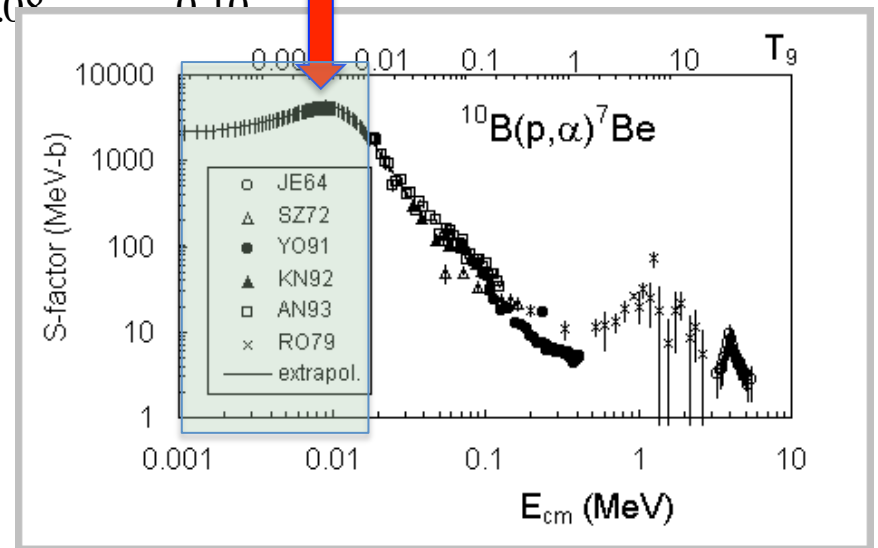
THE APPLICABILITY OF THE POLE APPROXIMATION IS LIMITED TO SMALL MOMENTUM p_{x-s}.

$$0 \le p_{x-S}^{\max} \le k_{x-S}$$

RESONANCE AT GAMOW ENERGY



GAMOW ENERGY



PRELIMINARY RESULTS

$^{10}B + p$

Misure dirette
O.1 – 0.5 MeV

Primo anno

MISURE DELLE SEZIONI D'URTO DI REAZIONI NUCLEARI "CANDIDATE" PER LA PRODUZIONE D'ENERGIA DA "FUSIONE PULITA"

1 - $^{10}B + p \rightarrow {}^{7}Be + \alpha$ (reazione binaria)

Napoli 0.4 - 1 MeV

LNL 0.2 - 0.5 MeV

2 - $^{10}B + p \rightarrow {}^{7}Be + \alpha$ $^{10}B + {}^{3}He \rightarrow {}^{7}Be + \alpha + {}^{2}H$

Rez

$^{10}B + p$

Misure dirette
O.4 – 1.5 MeV

2013 -2014

1 - $^{10}B + p \rightarrow {}^{7}Be + \alpha$ (reazione binaria)

- Si prevedono 2 run per circa 30 giorni di fascio Dip,Fisica Università di Napoli
- Federico II

20 + 14 =34 giorni

- 6 ricercatori x (25) giorni x 120€ 18.000 €

- 6 ricercatori x (22) giorni x 120€ 15.840 €

9 voli aereo x 350 € 3.150 €

- 36.990 € (x 2 run) 73.980 €

$^{10}B + p$

Misure dirette
0.1 – 0.5 MeV

2013 -2014

1 - $^{10}B + p \rightarrow {}^{7}Be + \alpha$ (reazione binaria)

- Si prevedono 2 run per circa 30 giorni di fascio INFN- LNL

- 6 ricercatori x (24) giorni x 100€ 12.960 €
- 6 ricercatori x (20) giorni x 100€ 9.720 €

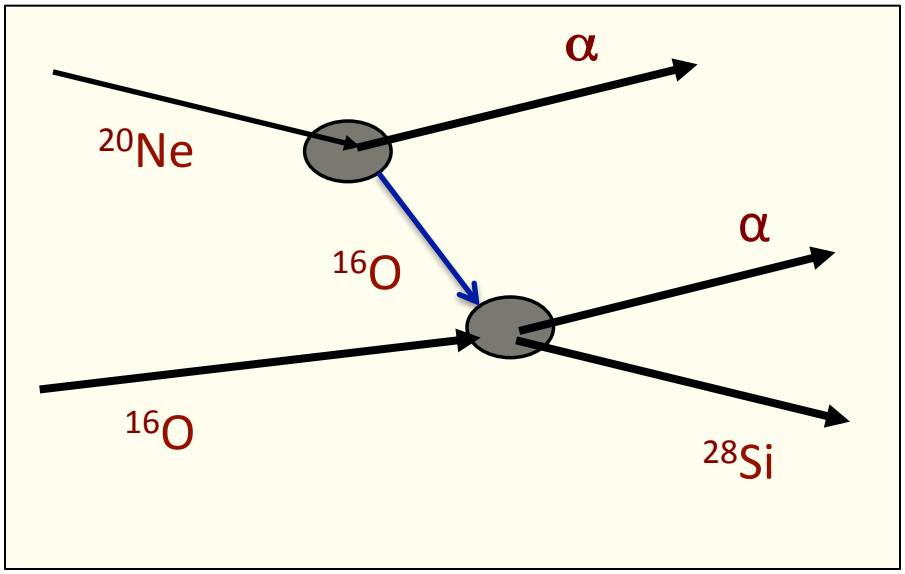
9 voli aereo x 350 € 3.150 €

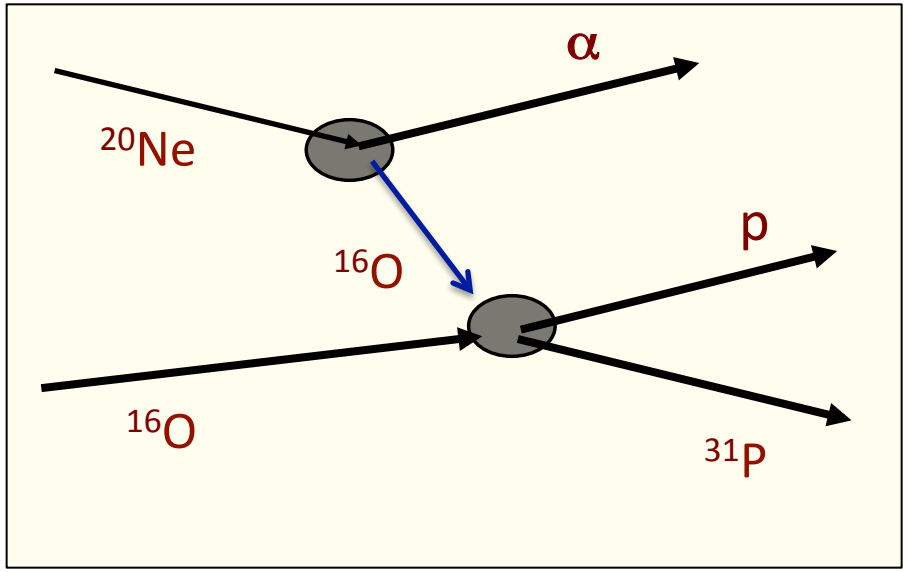
- 23.670 € (x 2 run) 47.340 €

$^{16}O + {}^{16}O$

New application : $^{16}O + {}^{20}Ne \rightarrow \alpha + {}^{28}Si + \alpha$

$^{16}O + {}^{20}Ne \rightarrow p + {}^{31}P + a$





$^{16}O(^{16}O,\alpha)^{28}Si$ (Q=9.56 MeV)

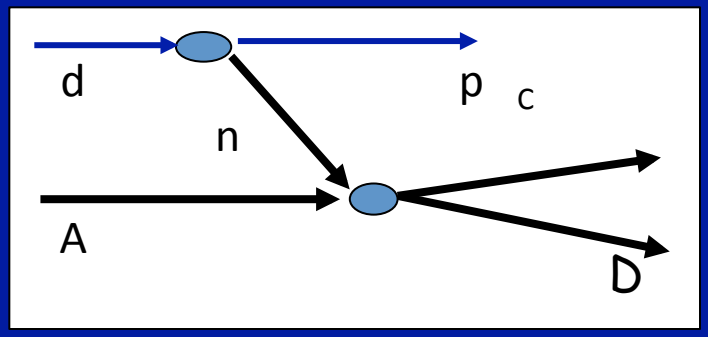
$^{16}O(^{20}Ne,\alpha\ ^{28}Si)\alpha$, (Q=4.86 MeV)

$^{16}O(^{16}O,p)^{31}P$, (Q= 7.68 keV)

$^{16}O(^{20}Ne,\alpha\ ^{31}P)\alpha$, (Q=2.94 MeV)

(½) 2013 - 2014 – (½) 2015

- $^{16}O(^{16}O,\alpha)^{28}Si$ (Q=9.56 MeV) $^{16}O(^{20}Ne,\alpha\ ^{28}Si)\alpha$, (Q=4.86 MeV)
- $^{16}O(^{16}O,p)^{31}P$, (Q= 7.68 keV) $^{16}O(^{20}Ne,\alpha\ ^{31}P)\alpha$, (Q=2.94 MeV)
- $^{16}O(^{16}O,n)^{31}S$, (Q= 1.5 MeV) $^{16}O(^{20}Ne,n\ ^{31}S)\alpha$, (Q=-3.23 MeV)

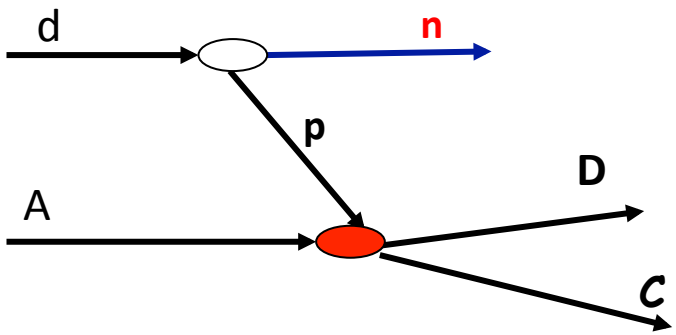


(n,x) reactions induced by deuterons

$A + d \rightarrow C + D + S$

$A + n \rightarrow C + D$

REACTION INDUCED BY DEUTERONS

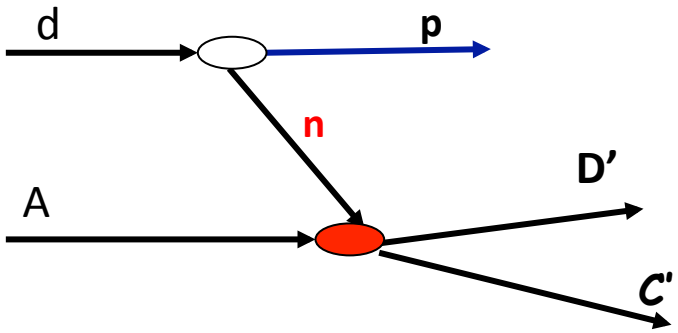


Reaction induced by deuteron:

Neutron spectator

Protpn partecipant

(p,α) reactions



Reaction induced by deuteron:

Protpn spectator

Neutron partecipant

(n,α) reactions

Deuton as a virtual Neutron-target or projectile

IOP PUBLISHING JOURNAL OF PHYSICS G: NUCLEAR AND PARTICLE PHYSICS

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **37** (2010) 125105 (16pp) doi:10.1088/0954-3899/37/12/125105

Study of the ^{6}Li$(n, \alpha)^{3}$H reaction via the ^{2}H quasi-free break-up

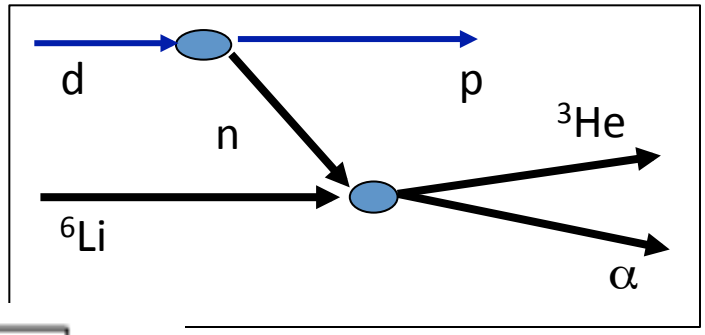
M Gulino[1,2], C Spitaleri[1,2], S Cherubini[1,2], V Crucillà[1,2], M La Cognata[1,2], L Lamia[1,2], R G Pizzone[1,2], S Romano[1,2], M L Sergi[1,2], A Tumino[1,3], Li Chengbo[4], Z Elekes[5], E Somorjai[5], V Burjan[6], V Kroha[6] and A Mukhamedzhanov[7]

[1] INFN Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy
[2] DMFCI, Università degli Studi di Catania, Catania, Italy
[3] Università degli Studi di Enna 'KORE', Enna, Italy
[4] China Institute of Atomic Energy, Beijing, People's Republic of China
[5] ATOMKI Institute of Nuclear Research, Debrecen, Hungary
[6] Nuclear Physics Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Rez, Czech Republic
[7] Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, TX, USA

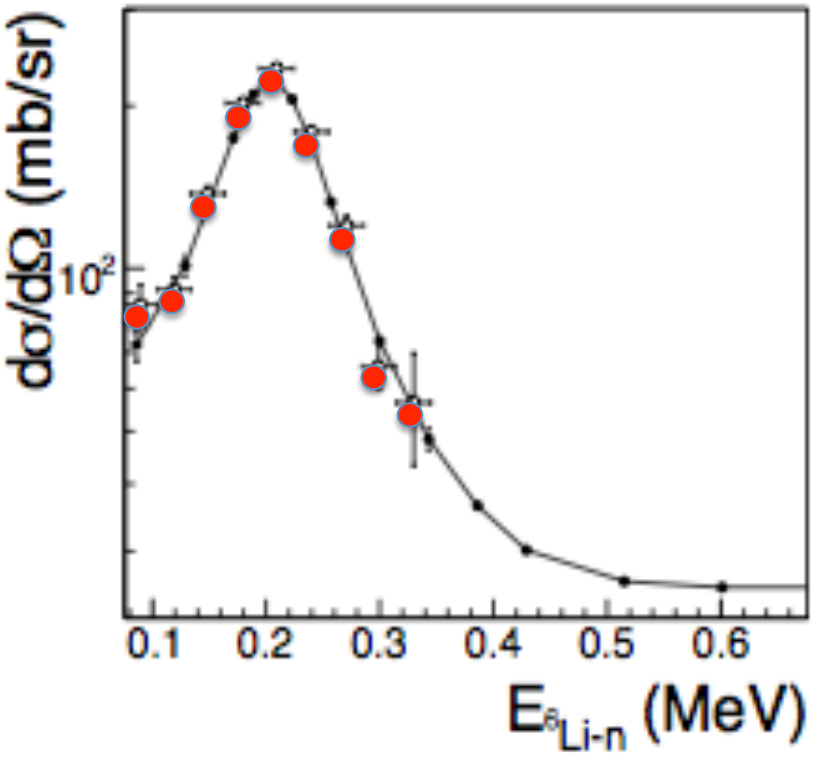
E-mail: spitaleri@lns.infn.it

Received 2 July 2010
Published 11 November 2010
Online at stacks.iop.org/JPhysG/37/125105

reaction
$^{6}Li + n \rightarrow \alpha_o + {}^{3}He$
via the
$^{6}Li + d \rightarrow \alpha_o + {}^{3}He + n$



Tandem-LNS, Catania



THM
direct data

$^{6}Li\ (n,\alpha)^{3}He$

M.Gulino.et al. JPG 37,125105(2010)

Phys. Rev. C Rapid Comunication 2012
in press

Suppression of the centrifugal barrier effects in the off-energy-shell neutron+^{17}O interaction.

M. Gulino[a,b], C. Spitaleri[a,c], X.D. Tang[d], G.L. Guardo[a,c], L. Lamia[a,c], S. Cherubini[a,c], B. Bucher[d], V. Burjan[e], M. Couder[d], P. Davies[d],R. deBoer[d], X. Fang[d], V.Z. Goldberg[f], Z. Hons[e], V. Kroha[e], L. Lamm[d,†], M. La Cognata[a], C. Li[g], C. Ma[d], J. Mrazek[e], A.M. Mukhamedzhanov[f], M. Notani[d], S. OBrien[d], R.G. Pizzone[a], G.G. Rapisarda[a,c], D. Roberson[d], M.L. Sergi[a,c], W. Tan[d], I.J. Thompson[h], M. Wiescher[d]

a) INFN Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

b) Università degli Studi di Enna "KORE", Enna, Italy

c) Dipartimento di Fisica ed Astronomia, Università degli Studi di Catania, Catania, Italy

d) Department of Physics and Joint Institute for Nuclear Astrophysics, University of Notre Dame, IN, USA

e) Nuclear Physics Institute of ASCR, Rez, Czech Republic

f) Cyclotron Institute,Texas A&M University,College Station TX, USA

g) China Institute of Atomic Energy, Beijing, China and

h) Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA

(Dated: November 5, 2012)

The reaction $^{17}O(n,\alpha)^{14}C$ was studied at energies from $E_{cm} = 0$ to $E_{cm} = 350$ keV using the quasi-free deuteron break-up in the three body reaction $^{17}O+d \rightarrow \alpha+^{14}C+p$, extending the Trojan Horse indirect method (THM) to neutron-induced reactions. It is found that the ^{18}O excited state at $E^* = 8.125 \pm 0.002$ MeV observed in THM experiments is absent in the direct measurement because of its high centrifugal barrier. The angular distributions of the populated resonances have been measured for the first time. The results unambiguously indicate the ability of the THM to overcome the centrifugal barrier suppression effect and to pick out the contribution of the bare nuclear interaction.

PACS numbers: 25.40.-h, 28.20.-v, 26.90.+n

ucl-ex] 2 Nov 2012

Reaction:

$^{17}O + n \rightarrow \alpha_o + {}^{14}C$

via the

$^{17}O + n \rightarrow \alpha_o + {}^{14}C + n$

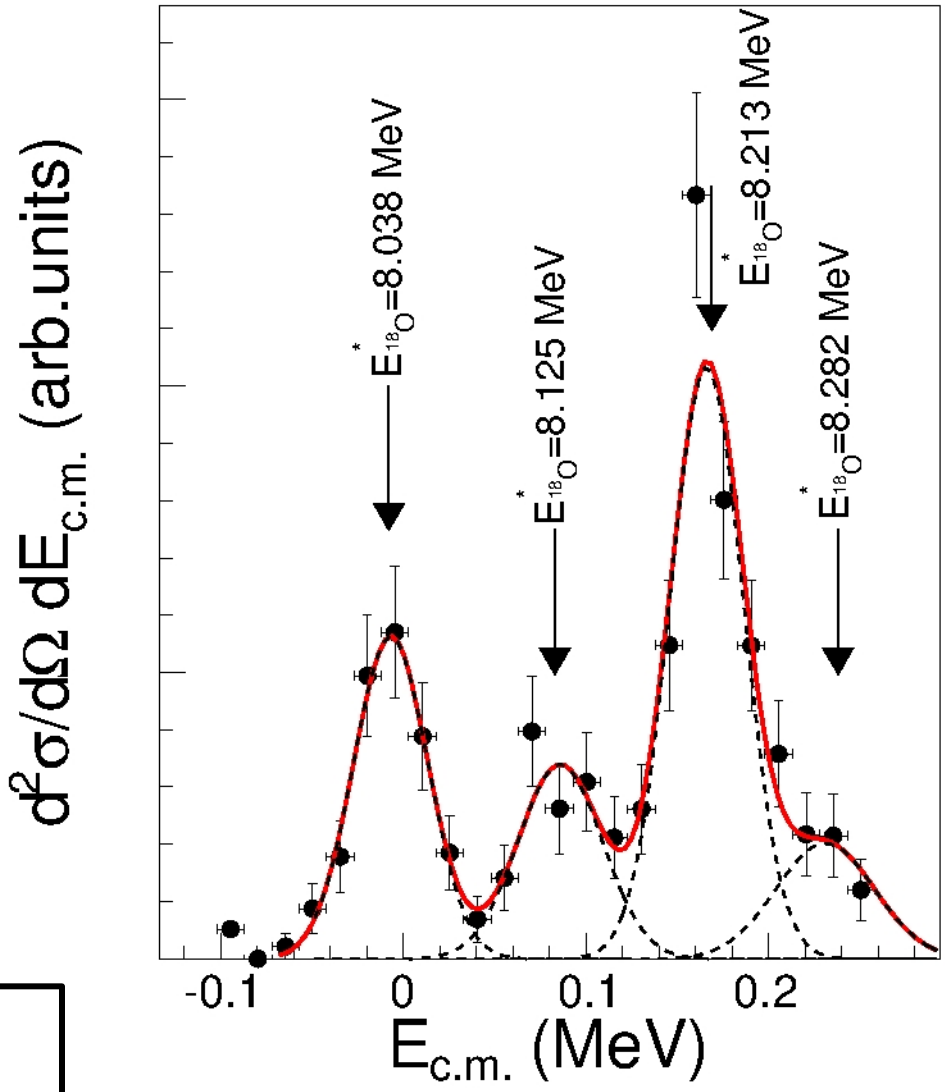
TANDEM – LNS

Catania, Italy

Tandem- Notre Dame, USA,

PRELIMINARY RESULTS

$^{17}O\ (n,\alpha)^{14}C$



$^{11}B + n$

2015

MISURE DI SEZIONI D'URTO DI REAZIONI NUCLEARI INDOTTE DA NEUTRONI CON IL TROJAN HORSE METHOD .

$$^{11}B + n \dashrightarrow {}^{8}Li + \alpha_0$$

- $[\,^{11}B + {}^{2}H \rightarrow {}^{8}Li + \alpha + p]$

Interventi sull'acceletore Tandem

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

	I° anno
Apparecchiature e altri beni durevoli	2,120
Materiale di consumo per la ricerca e servizi	0,930
Spese di personale (emolumenti)	1,300
Spese di personale (missioni)	0,140
Spese generali (overhead)	0,449
Totale	4,939

Le spese di missione all'estero sono calcolate prevedendo comunque di portare avanti questa attivita' nel contesto delle collaborazioni gia' esistenti con la comunita' scientifica internazionale che si occupa di Astrofisica Nucleare.

E' stato considerato anche un overhead soprattutto per il carico amministrativo che tale progetto comporta nell' amministrazione dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN.

Interventi sull'acceletore Tandem

POTENZIAMENTO DELL'ACCELERATORE TANDEM (referente Dr Danilo Rifuggiato)

Poichè le misure delle sezione d'urto, per mezzo del THM, delle reazioni d'interesse astrofisico o d'interesse nel campo della ricerca di combustibili non inquinanti, necessitano di dati con sempre minori incertezze, quindi con alta statistica, alta risoluzione angolare ed energetica, è indispensabile il potenziamento dell'acceleratore Tandem in termini di:

1- ottimizzazione dell'intensità della sorgente,

2- trasporto di carica ,

3- trasmissione del fascio,

4- sistemi di diagnostica.

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

La maggior parte delle risorse finanziarie é concentrata sul potenziamento dell'acceleratore Tandem e degli apparati di rivelazione (circa 60%) ed è concentrata al primo anno.

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

La maggior parte delle risorse finanziarie é concentrata sul potenziamento dell'acceleratore Tandem e degli apparati di rivelazione (circa 60%) ed è concentrata al primo anno.

ma considera la creazione di circa 5 posizioni Ricercatore a tempo determinato e
3 posizioni di tecnologo a tempo determinato da dedicare al progetto per la sua durata,

unitamente ad un ridotto numero di borse per dottorati di ricerca.

1- Sostituzione sistema trasporto di Carica

Pelletron

2- Sostituzione di minimo n.2 tubi del Tandem

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

	I° anno	II° anno	III° anno	Totale
Apparecchiature e altri beni durevoli	2,120	0,150	0,075	2,345
Materiale di consumo per la ricerca e servizi	0,930	0,070	0,050	1,050
Spese di personale (emolumenti)	1,300	0,90	0,90	1,480
Spese di personale (missioni)	0,140	0,100	0,060	0,300
Spese generali (overhead)	0,449	0,121	0,118	0,518
Totale	4,939	0,451	0,303	5,693

RISORSE DA ACQUISIRE

Finanziamento di 5,693 M€ in 3 anni,

di cui 4,939M€ nel primo anno.

9. COSTO COMPLESSIVO E RICHIESTA FINANZIARIA

	I° anno	II° anno	III° anno	Totale
Apparecchiature e altri beni durevoli	2,120	0,150	0,075	2,345
Materiale di consumo per la ricerca e servizi	0,930	0,070	0,050	1,050
Spese di personale (emolumenti)	1,300	0,90	0,90	1,480
Spese di personale (missioni)	0,140	0,100	0,060	0,300
Spese generali (overhead)	0,449	0,121	0,118	0,518
Totale	4,939	0,451	0,303	5,693

Realizzazione sistema di rivelazione SUPER-ASTRHO

Nelle prossime slides si introduce il setup ASTRHO

La seconda slide di questa presentazione riporta la lettera di motivazione di ASTRHO che inviai all'allora direttore

La terza e quarta slide rappresentano schematicamente e fotograficamente il setup usato nell'esperimento 18F+d. In questa applicazione si ha un primo esempio della modularità di ASTRHO perché oltre al piano dei detector PSD bidimensionali Hamamatsu
Si è montato un secondo piano con dei detector multistrip micron usati per rivelare le particelle ad angoli molto in avanti (4-10 gradi). La maggiore granularità di questi detector era necessaria pe ridurre il rate sul singolo detector (ogni strip è in effetti un detetctor a se stante). Inoltre la meccanica del supporto permetteva di cambiare le distanze tra un piano di rivelatori e l'altro ed anche tra essi e la targhetta.

Nella quinta slide si mostra l'uso dei detector Hamamatsu per realizzare un sistema capace di coprire una grande regione angolare nell'esperimento 3He+alpha (6Li) di Napoli. I detetcor sono collimati perché non interessava fuori piano e per limitare il rate. In quelli più in avanti.

PERCHÉ ASTRHO?

"I recenti sviluppi del metodo del Trojan Horse rendono necessario il passaggio a sistemi di rivelazione dei prodotti delle reazioni studiate che presentino caratteristiche più elevate in termini di copertura in angolo solido, precisione angolare, modularità ed espandibilità che mal si coniugano con l'utilizzo dei semplici rivelatori PSD monodimensionali sin qui quasi sempre utilizzati.

In particolare si pensa sia a misure impieganti fasci esotici (sia ai LNS che in altri laboratori) sia a studi di precisione che richiedono alte prestazioni in termini di risoluzione e di copertura angolare come quelli che già stiamo conducendo su varie reazioni con fasci stabili.

In questa ottica stiamo cominciando ad assemblare un apparato modulare di piccole dimensioni, facilmente espandibile e trasportabile, cui abbiamo dato il nome di **ASTRHO**, acronimo di **A**rray di **S**ilici per il **TR**ojan **HO**rse."

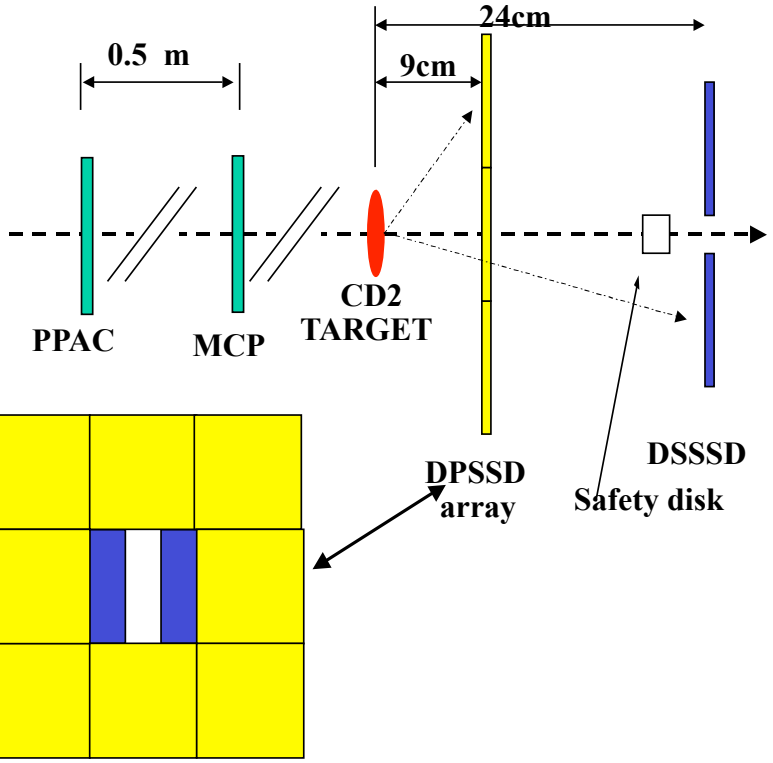
Nelle prossime slide si descrive l'idea di super ASTRHO come evoluzione di ASTRHO
e presento alcune offerte della Hamamatsu.

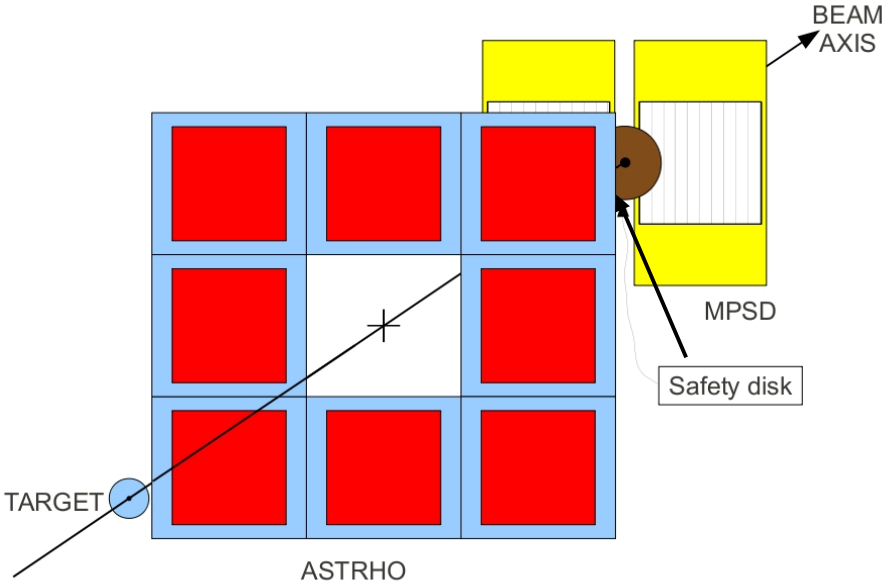
Si vogliono raggiungere migliori performance soprattutto nel senso di maggiore angolo solido (p.e. per esperimenti con fasci esotici) sia per poter montare i detector a maggior distanza (aumentand quindi la risoluzione angolare) in caso di esperimenti con fasci stabili. Questo si sposa bene con le misure previste nel premiale a Catania, dove la Camera 2000 consente di montare I detector loontani dal target anche 80-90 cm.
La grande area dei detector che si stanno considerando per Super_A e la loro conformazione geometrica consente di ottenere entrambi i risultati. Ad esempio si potrebbero montare 4, 5 o anche più detector su un supporto ad arco nella camera 2000 in modo da avere un “super PSD” praticamente continuo posto a 90 cm di distanza dal target. I detector micron da 20 micron possono essere montati davanti agli Hamamatsu costituendo così un sistema DE-E di grande accettanza e grande risoluzione angolare.

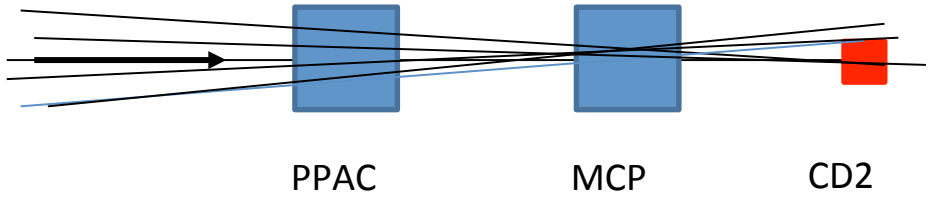
Al momento si stanno valutando vari tipi di detector: PSD bidim come quelli di ASTRHO, una loro versione con PCB modificata per ridurre le zone morte del setup, una ulteriore versione modificata che sia a strip (16 strip) in una direzione e PSD monodimensionale nell'altra (avremmo una risoluzione di circa tre mm in una direzione, la larghezza della strip, e 1 mm nell'altra). Inoltre stiamo considerando detector Micron, sempre di circa 50 mm x 50 mm, a 16 strip in

EXPERIMENTAL SETUP

(other than CRIB.....)

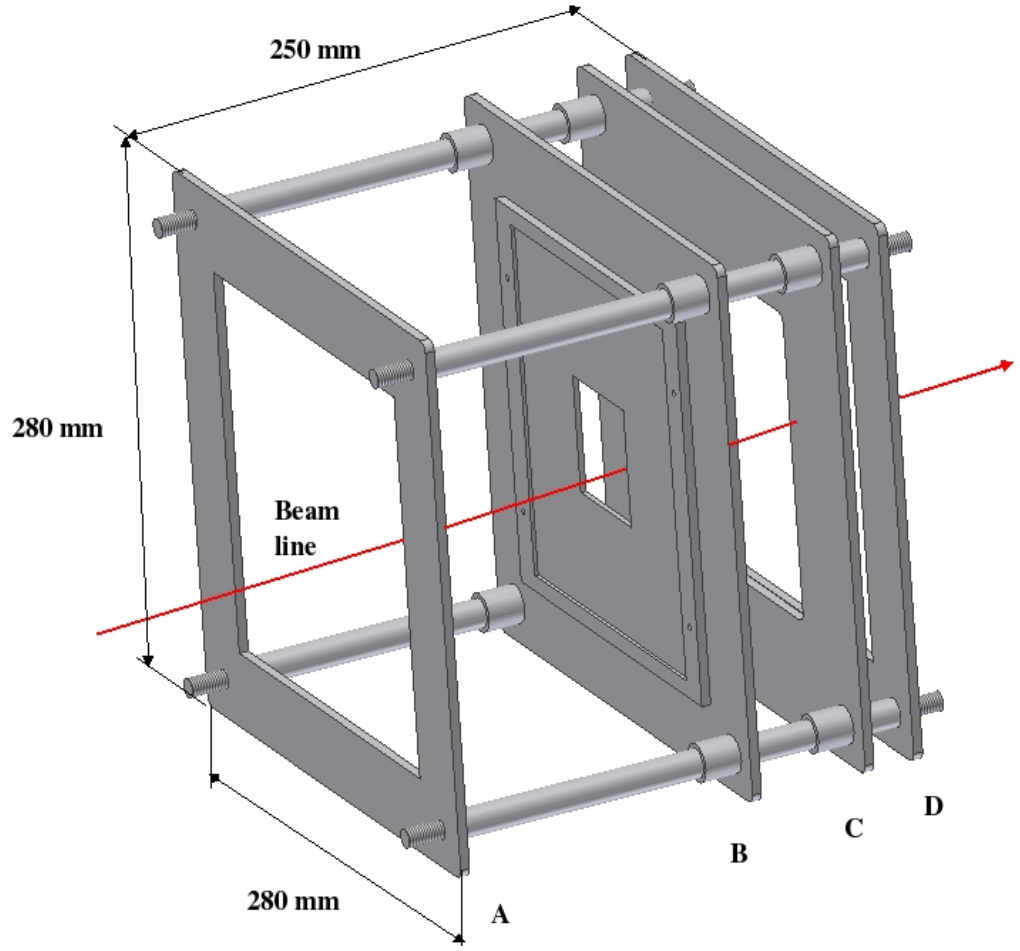


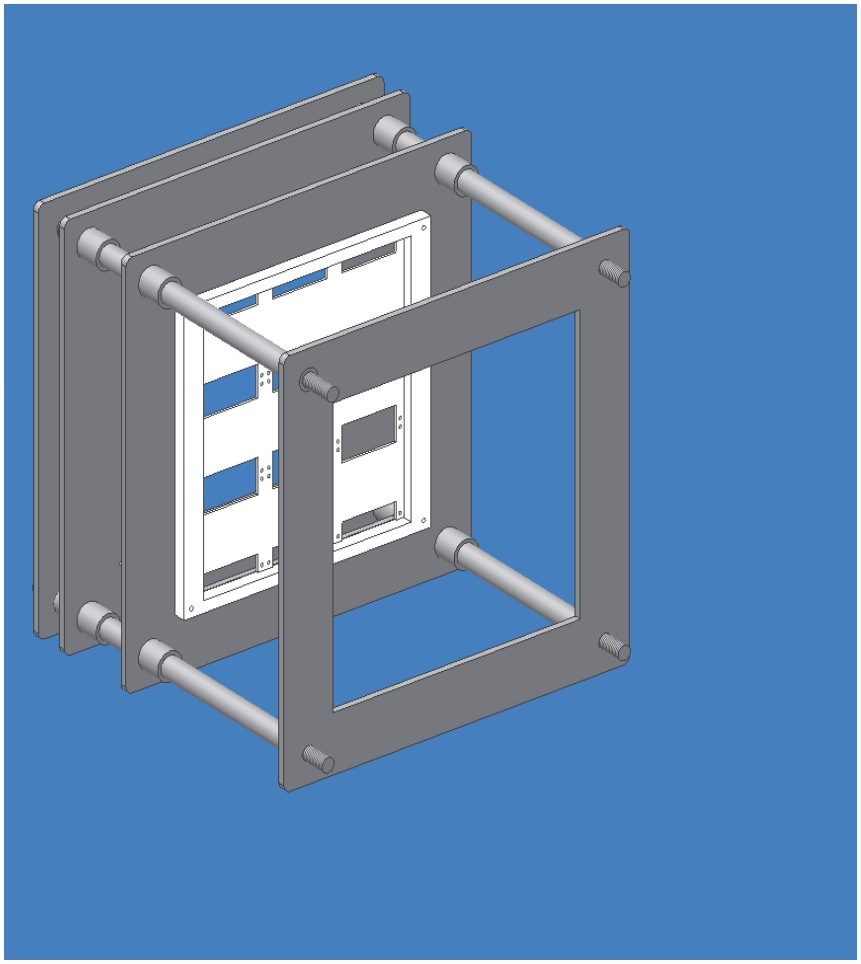




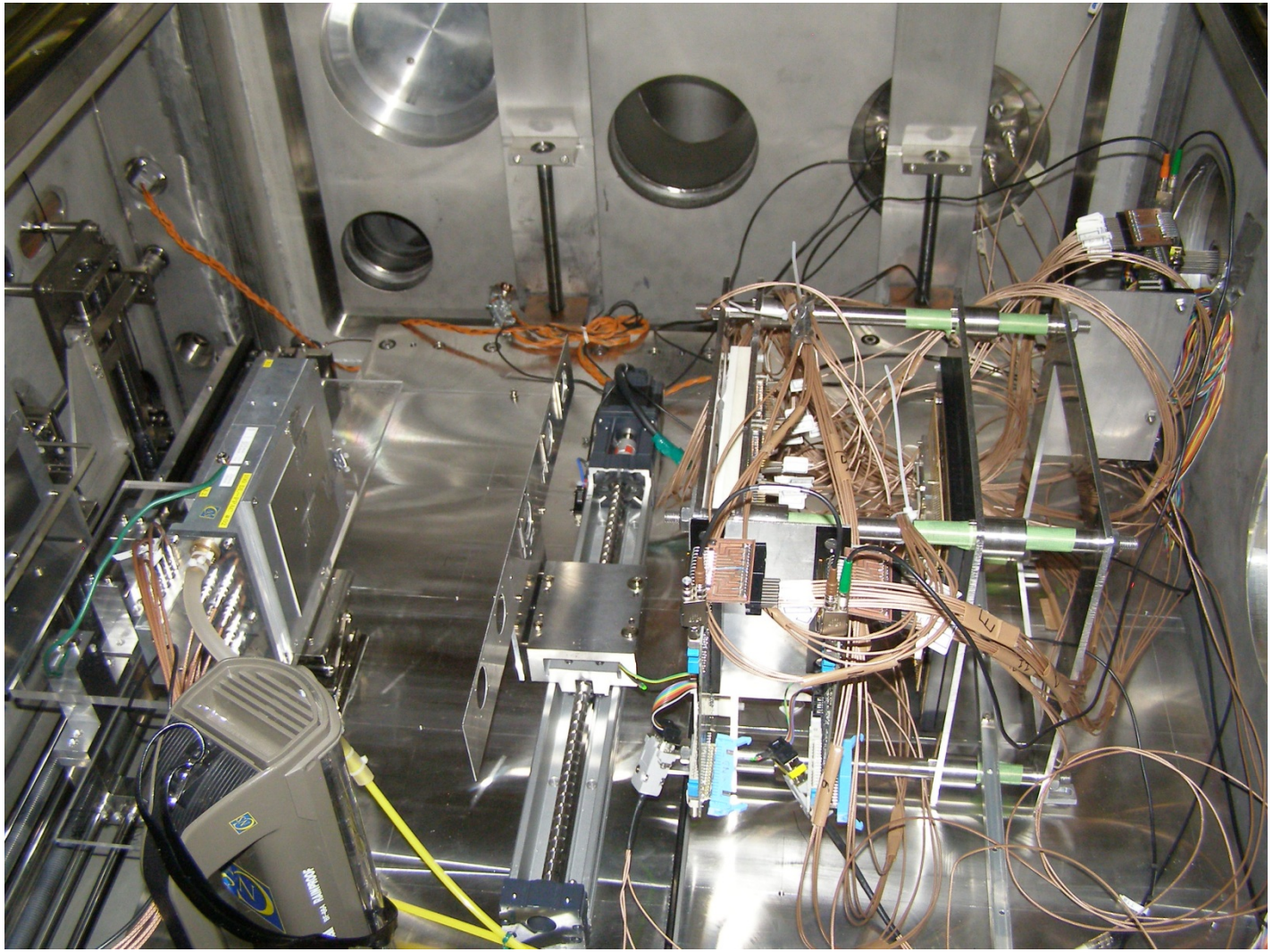
Beam track reconstruction

ASTRHO:
Array of Silicons for TRojan HOrse

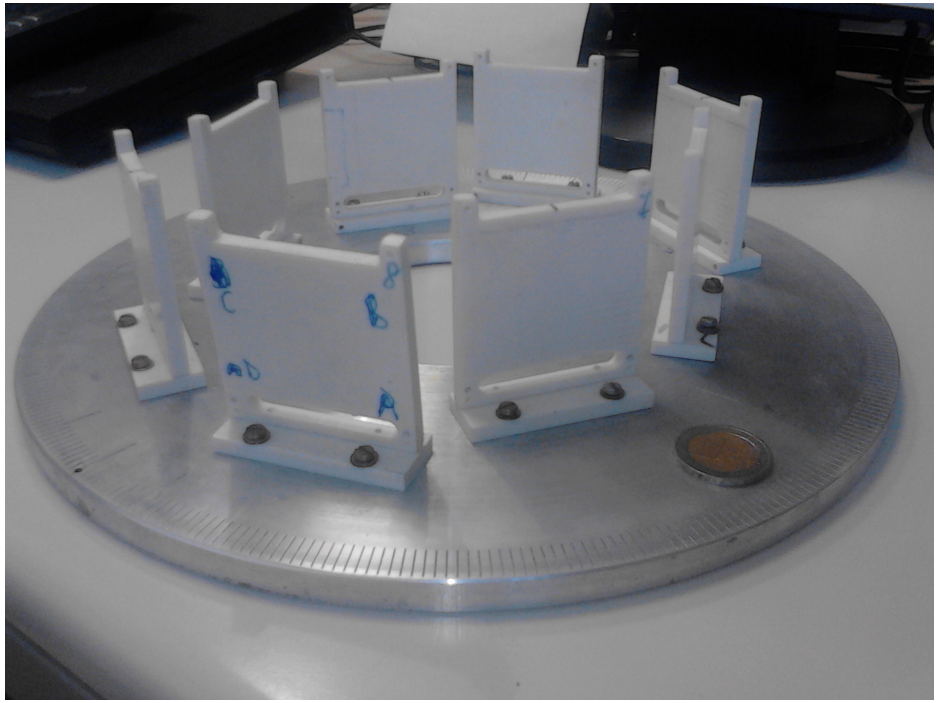


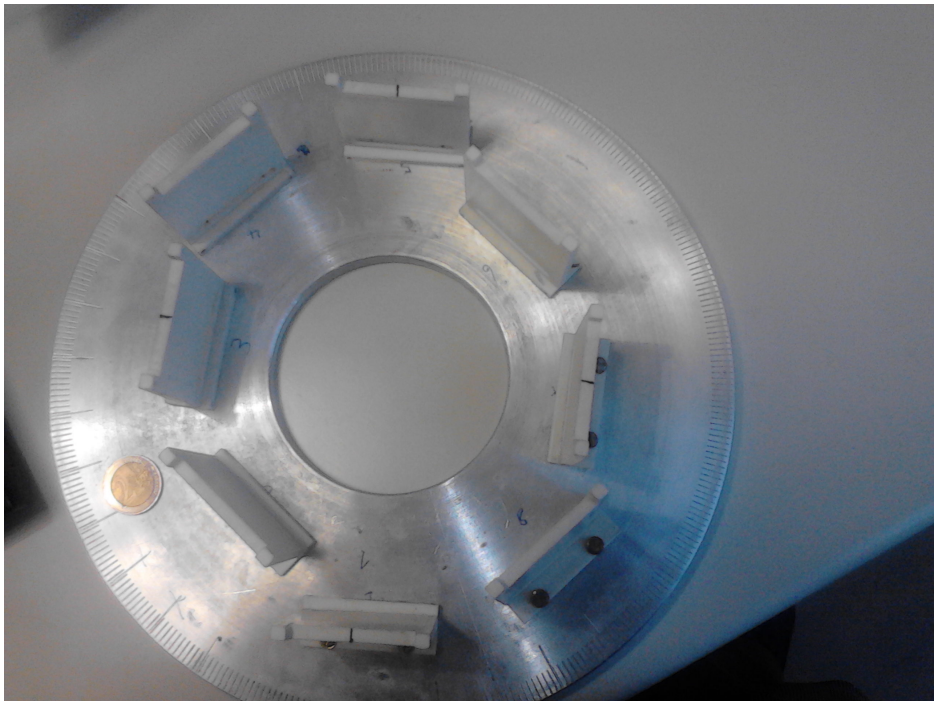


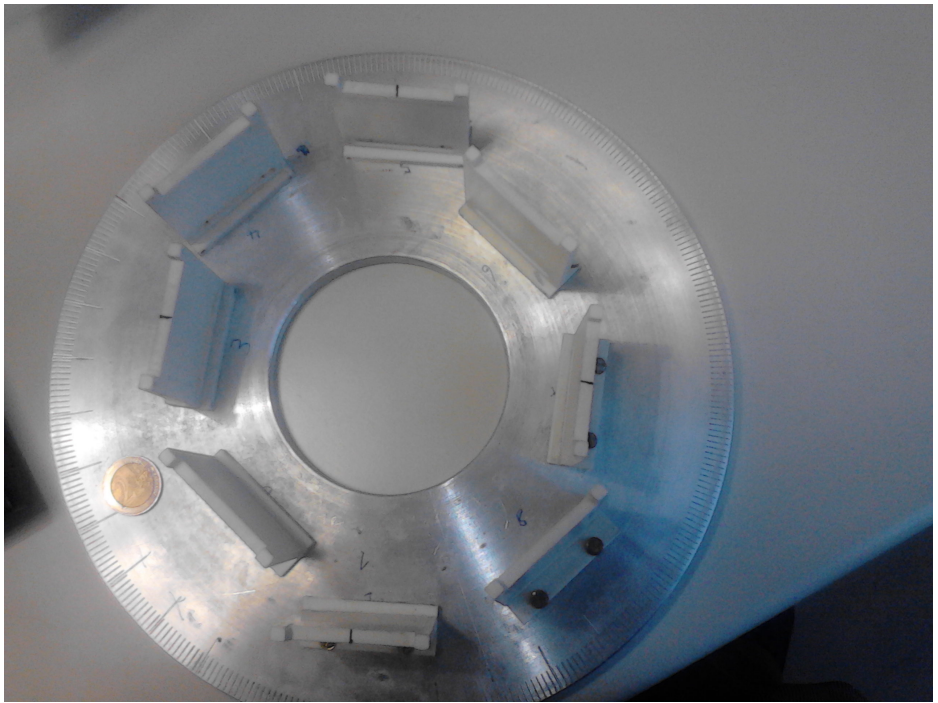
In order to allow for the optimization of the two experiments ASTRHO and the DSSSD were hosted in a mechanical system that allowed for easy movement of the detector holder plates (mechanical design, V. Crucillà)



How ASTRHO looks like in reality
(before PPAC explosion...)







ASTRHO versione Napoli

Disegno meccanico M. Piscopo, LNS.

super_ASTRHO

- Caratteristiche di Super_A
- 0) MODULARE, sia in senso di conformazione GEOMETRICA che di NUMERO DI STADI di rivelazione;
- 1) formato da rivelatori al Silicio di GRANDE AREA, circa 2000 mm^2. In caso di telescopi DE-E, primo stadio molto sottile, 20 micron o meno, a strip, secondo stadio di tipo bidimensional Position Sensitive Detector (come quelli usati in ASTRHO);
- 2) ESPANDIBILE, cioè si potranno aggiungere ulteriori moduli o modificare i singoli moduli in modo da ottenere ad esempio telescopi a tre stadi;
- 3) supportato da elettronica di front-end e DAQ che permettano anche di utilizzare tecniche di DSP.

Quotazioni Hamamatsu

Tecnologia 4", 320 um, venti pezzi max, con materiale residuo

S5378-02	1	5	10	20
	€ 3.600,00	€ 3.150,00	€ 2.850,00	€ 2.400,00

Tecnologia 6", 500 um,

S5378SPL (500umT)	NRE	5	10	20	50
Prezzo al Cliente	€ 22.000,00	€ 4.230,00	€ 2.610,00	€ 1.800,00	€ 1.320,00

Costo sviluppo maschera

NB: per 20 pezzi 2900 EUR/pc, per 50 pezzi 1760 EUR/pc !!!!

ELETTRONICA

Per l'elettronica si sta ancora discutendo come procedere. L'idea moderna sarebbe andare verso un trattamento digitale dei segnali (dal pre all'ADC direttamente).
Il problema è la fase di sviluppo.
La strada che a me, Stefano, Marcello e PP sembra più realistica è quella di rimanere su una elettronica standard che però costa cara. Il grosso del costo sono gli amplificatori (6000 Euro + iva per 16 canali, cioè oltre 400Euro/ canale). La CSN3 ha insistito con Alessia, nell'ambito dell'esperimento LNSTREAM, perché si indirizzassero verso gli amplificatori realizzati dlla sezione di Napoli e prodotti da una azienda non identificata, probabilmente lombarda. Il problema è che non sappiamo il vero prezzo di questi ampli. Secondo Alessia 4500 + Iva (e allora non mi pare che il gioco valga la candela rispetto a CAEN o MESITECH) secondo PP 2500 + iva (e allora varrebbe la pena). Ci ripromettiamo di provare gli ampli targati napoli in gennaio, dato che Cappuzzello ne ha due ai LNS.
Per I preampli il costo si aggira a 100 euro/canale e anche meno. Noi abbiamo 256 canali di pre, ma forse non è il caso di menzionarli nell'ambito di un progetto nuovo. Logica etc influiscono poco, soprattutto se gli ampli comprendono anche un circuito di discriminazione e una uscita di molteplicità. Gli ADC influiscono per un 200 Euro a canale (forse meno)

Potenziamento delle macchine acceleratrici:

- **Primo anno**

  Al fine di ripristinare il funzionamento del TANDEM alle massime tensioni è necessario sostituire il primo e l'ultimo tubo accelerante della macchina.

  Entrambi questi tubi mostrano perdite di vuoto. Ciò è grave sia perché limita le tensioni massime raggiungibili, sia perché le perdite di fascio dovute alle interazioni con il gas residuo diventano sempre più significative.

  Inoltre le perdite producono ulteriori danni ai tubi acceleranti. L'operazione di sostituzione dei due tubi potrà essere completata in circa 6 mesi.

  Inoltre si procederà all'acquisto di un nuovo sistema di trasporto delle cariche. Il Tandem dei LNS è l'unico acceleratore elettrostatico con tensione superiore agli 8 MV che funziona con il sistema a cinghia, tutti gli altri Tandem usano il sistema denominato Pelletron, che consiste in una catena di elementi isolanti e conduttori. Purtroppo la ditta HVEC, costruttrice del tandem, ha smesso di produrre la cinghia originale. Abbiamo cercato di utilizzare nuove cinghie disponibili sul mercato ma con risultati insoddisfacenti. Pertanto, è necessario sostituire la cinghia con il sistema Pelletron.

Potenziamento della sorgente SERSE

Primo anno

La sorgente SERSE, è una sorgente di ioni superconduttiva, che permette di raggiungere energie ed intensità di corrente più elevate rispetto alla sorgente convenzionale CAESAR. L'utilizzo di SERSE è necessario per produrre i fasci primari per la facility EXCYT. Come descritto nell'allegato (1) per l'efficiente utilizzo di SERSE è necessario renderla indipendente dal liquefattore del ciclotrone. Pertanto modificheremo il criostato della sorgente per installare 2 crio-refrigeratori ed una coppia di nuovi adduttori di corrente superconduttori ad alta temperatura critica, ciò al fine di minimizzare i consumi di elio liquido. I tempi richiesti per tale operazione sono di 12 mesi.

Potenziamento delle macchine acceleratrici: EXCYT

Primo anno

Il potenziamento della facility EXCYT richiede la costruzione di 5 nuovi dispositivi di diagnostica per i fasci di bassissima intensità (<10^5 pps), al fine di ottimizzare l'iniezione dei fasci radioattivi nel Tandem, massimizzando così la corrente del fascio sul bersaglio della reazione. I sistemi in questione sono basati sull'utilizzo di rivelatori microchannel plate, che consentono di visualizzare il profilo trasverso a bassissime intensità e di misurarne la corrente.

Potenziamento delle macchine acceleratrici: EXCYT

Primo anno

Al fine di migliorare le prestazioni della facility EXCYT, realizzeremo un sistema di test bench che riproduca parzialmente la facility EXCYT, vedi allegato (1). Ciò permetterà lo studio delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali del complesso bersaglio-sorgente ed i meccanismi di diffusione e raccolta delle specie radioattive, al fine di un loro ottimale utilizzo come bersagli per la sorgente radioattiva. Il sistema di simulazione di EXCYT consentirà anche di ottimizzare il processo di scambio carica delle specie prodotte, visto che il Tandem richiede ioni con carica negativa.

Durante il primo anno si effettueranno gli acquisti necessari per la realizzazione di detto sistema e si inizierà l'installazione del sistema.

Potenziamento delle macchine acceleratrici: EXCYT

Secondo anno:

In questo anno procederemo al completamento del test bench di EXCYT e alla installazione dei 5 nuovi sistemi di diagnostica per i fasci di bassa intensità nei primi sei mesi. Nei secondi sei mesi inizieremo l'ottimizzazione delle sorgenti per la produzione dei fasci di Ossigeno e Fluoro.

Terzo anno:

La consegna del sistema Pelletron è prevista dopo circa 18 mesi dall'ordine, pertanto i lavori previsti per la installazione del nuovo sistema di trasporto delle cariche verranno completati nel corso del primo semestre del terzo anno.

Realizzazione del sistema di rivelazione SUPER ASTRHO

Il sistema modulare di rivelazione ASTRHO (A Silicon Array for TRojan HOrse) realizzato dal gruppo di Astrofisica Nucleare dei LNS ha dimostrato come sia possibile effettuare misure di THM con fasci radiottivi.

Condizione fondamentale per poter effettuare misure di tipo THM è quella di avere un apparato di rivelazione con una risoluzione angolare dell'ordine di 0.1-0.3 gradi. Inoltre, date le intensità dei fasci radioattivi attualmente disponibili sia ai LNS che in altri laboratori, le misure THM richiedono la maggior efficienza di rivelazione possibile. Ciò implica l'utilizzo di apparati che coprano un grande angolo solido. Un rivelatore a grande angolo solido ed alta granularità come quello qui proposto permetterebbe anche lo studio ad elevata precisione, sempre con l'utilizzo del THM, di reazioni indotte da nuclei stabili di interesse per l'Astrofisica Nucleare, oltre che dei meccanismi di reazione che a tale metodo sottostanno.

Realizzazione del sistema di rivelazione SUPER ASTRHO

La modularità con cui tale sistema, "Super ASTRHO," è concepito ne consentirebbe, pur trattandosi di un sistema multi-porpouse, l'uso ottimizzato per una grande varietà di esperimenti .

Super ASTRHO si caratterizza per essere:

- modulare, sia in senso di conformazione geometrica che di numero di stadi di rivelazione;
- formato da telescopi a due stadi al Silicio di grande area ;
- espandibile, cioè si potranno aggiungere ulteriori moduli o modificare i singoli moduli in modo da ottenere ad esempio telescopi a tre stadi;
- supportato da elettronica di front-end e DAQ che permettano anche di utilizzare tecniche di DSP.

Realizzazione del sistema di rivelazione SUPER ASTRHO

Realizzazione del sistema di rivelazione SUPER ASTRHO:

Si prevede di progettare e realizzare gran parte o tutti gli elementi meccanici necessari per SuperASTRHO presso le strutture LNS.

Sviluppo del progetto

Primo anno:

dedicato alla realizzazione della struttura meccanica di supporto fisico dei detector, all'acquisizione dei detector stessi e dell'elettronica necessaria nonché alla loro installazione e messa in funzione.

Secondo anno

Test dell'apparato in condizioni di misura .

Terzo anno :

inizio campagna sperimentale.

Potenziamento dello spettrometro MAGNEX :

Primo anno:

Si prevede di potenziare lo spettrometro magnetico MAGNEX. Tale dispositivo rappresenta oggi uno strumento esemplare per studi di spettroscopia nucleare e meccanismi di reazione ad energie intorno alla barriera colombiana. La possibilità di misurare spettri di energia con alta risoluzione in energia, angolo e massa, coniugati ad una accettanza in angolo solido e momento di almeno un ordine di grandezza maggiore rispetto a dispositivi simili, ne fanno uno strumento di primo piano. Il recente accoppiamento del multi-rivelatore EDEN per la rivelazione di neutroni in esperimenti esclusivi ne ha ulteriormente potenziato le caratteristiche.

Il potenziamento riguarda due interventi fondamentali : la realizzazione di una nuova camera di scattering e la realizzazione di un catodo strippato.

Potenziamento dello spettrometro MAGNEX :

La realizzazione di una camera di scattering in alluminio dotata di sliding seal è necessaria per l'ottimale rivelazione dei neutroni. L'elemento più delicato del progetto è la sliding seal che, permette la rotazione dello spettrometro rispetto alla linea di fascio in presenza di vuoto all'interno della camera. Nel primo anno si elaborerà il disegno ,il progetto relativo e installazione della camera .

Modifica della geometria dell'elettrodo strippato del rivelatore di piano focale. L'attuale elettrodo presenta uno spessore di circa 10 cm, non ottimale per la misura del numero atomico maggiore di 30. Una modifica di soli 5 cm permetterebbe di rimuovere tale limitazione aprendo le porte ad una serie di ricerche, già proposte da collaboratori nazionali ed internazionali, attualmente non esplorabili. L'elettrodo è il cuore del rivelatore di piano focale, che a sua volta è l'elemento fondamentale dello spettrometro.

Potenziamento dello spettrometro MAGNEX :

.

Secondo anno:

Il progetto elettronico ed il controllo di qualità del prodotto sarà realizzato nel secondo anno.

Terzo anno:

TEST sotto fascio dei sistemi realizzati ed inizio della campagna sperimentale delle misure proposte.

Interventi sul rivelatore di piano focale “Magnex”

COSTI

-

- Spese per personale

- Spese materiali di consumo per attività di ricerca

AZIONI CONNESSE ALLA FORMAZIONE

Tesi di laurea

triennali e magistrali in Astrofisica Nucleare, Fisica Nucleare

Tesi di dottoratoi:

Dottorato internazionale in Astrofisica Nucleare e Astroparticellare e
(Tesi, Corsi, Borse di studio)

Dottorato in Fisica dell'Università di Catania.
(Tesi e Corsi)

" European Summer School of Experimental Nuclear Astrophysics" (Scuola di S.Tecla) VII e VIII edizione.

- Scuola Internazionale SINAIA di Fisica Nucleare e Astrofisica Nucleare

- Scuola Internazionale di RUSBACH