

A nehéz elemek nukleoszintézise

OTKA NN83261 zárójelentés

1. Az ESF EuroGENESIS hálózat

Az ESF (European Science Foundation) 2010-ben indította azt a komplex programját, melyben európai vezető kutatócsoportok fognak össze az elemek asztrofizikai eredetének vizsgálata céljából. A fenti EuroGENESIS program (<http://www.esf.org/index.php?id=5456>) négy tudományos pillére a csillagközi por, a kompakt objektumok, a korai csillagok, és a nagytömegű csillagok vizsgálata. Az egyes pillérekhez csatlakozó kutatócsoportok önálló feladattal rendelkeznek, mely csak nemzetközi együttműködésben vihető sikerre.

Az MTA Atomki nukleáris asztrofizikai csoportja a nagytömegű csillagok vizsgálatával foglalkozó MASCHE (Massive Stars as Agents of Chemical Evolution) alprogramba kapott meghívást, melyben a csoport tevékenységét az OTKA finanszírozta az NN8326 témából.

A MASCHE alprogram 5 fő partnere közül az egyik az Atomki, ezen felül az egyes részfeladatok megoldásához további 8 partnerintézet csatlakozott. A partnerek teljes listája a MASCHE honlapon megtalálható:

http://www2011.mpe.mpg.de/gamma/science/lines/eurogenesis/MASCHE_home.html

A magyar résztvevők feladata a nehéz elemek nukleoszintézisének modellezéséhez szükséges magfizikai paraméterek (hatáskeresztmetszetek, szögeloszlások, felezési idők) mérése volt, részben az Atomki gyorsítói infrastruktúrára, részben pedig külföldi infrastruktúrára támaszkodva. A külföldi partnerek biztosították a modellezéshez szükséges elméleti hátteret. Az EuroGENESIS lehetőséget biztosított fiatal kutatóink fokozatszerzésére, és nemzetközi munkába történő bekapcsolódásukra is.

Fő feladatunk volt a nehéz elemek keletkezésében fontos szerepet játszó, ám eddig még kísérletileg nem vizsgált $A > 100$ tömegtartományban töltött részecske-indukált reakciók tanulmányozása az asztrofizikailag releváns, vagy ahhoz közeli energiatartományban, részben az EuroGENESIS török partnereivel együttműködésben.

Az EuroGENESIS központi keretből sikeresen pályáztunk egy nemzetközi workshop megrendezésére is, melyet 2013-ban Debrecenben tartottunk „Open Problems and Future Directions in Heavy Element Nucleosynthesis” címmel: <http://www.atomki.hu/heavyws/>

Ezenkívül az OTKA-projekt egyik részvevője rendkívüli EuroGENESIS támogatással mutathatta be eredményeinket az OMEG (Origin of Matter and Evolution of Galaxies) konferencián Japánban 2013-ban.

2. Technikai fejlesztések

A nukleoszintézis területén vállalt új kísérleti vizsgálataink sikere érdekében jelentős technikai fejlesztéseket valósítottunk meg, melyeket az alábbiakban ismertetünk:

- Egy olyan kisméretű, és kis gázfogyasztású gázcéltárgyat fejlesztettünk ki, amely alkalmas befogási reakciók mérésére aktivációs technikával nemesgázok esetében is. A céltárgyat első lépésként a ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetének meghatározására használtuk.
- Egy új LEPS (Low Energy Photon Spectrometer) típusú detektort helyeztünk üzembe, és optimalizáltuk a háttérviszonyokat az új mérőhelyen. A detektor lehetővé tette, hogy atomi átmenetek röntgenhozamának meghatározásával eddig földfelszínen nem mérhető magfizikai befogási hatáskeresztmetszeteket mérjünk az aktivációs módszerrel.
- Az Atomki ciklotron gyorsítója mellé telepített szórókamrát automatizáltuk, részecskedetektorainak számát növeltük, új, saját fejlesztésű, vákuumban használható előerősítőket használva jelentősen feljavítottuk a rendszer feloldását. Ezzel lehetőséget teremtettünk arra, hogy jelentősen pontosabban vizsgáljunk rugalmas szórási szögeloszlásokat a p-folyamat tartományában.

3. Kutatási eredmények

Legfontosabb célunk, az eddig még nem elérhető nehéz magok tartományára kiterjeszteni az alfa-indukált, asztrofizikailag fontos magreakciók paramétereinek meghatározását. Ezen mérésekhez a besugárzásokat az Atomki ciklotronjára kiépített besugárzó állomásunkon végeztük, majd a felaktivált mintákat az alacsony háttérű gamma-detektorainkkal, a besugárzástól elkülönítve vizsgáltuk. Összegezve, a nehéz magok tartományában több fontos reakció hatás-keresztmetszetét, és a releváns asztrofizikai reakcióhozamokat sikerült meghatároznunk.

Méréseinket az alábbi reakciókon végeztük: ${}^{127}\text{I}(\alpha,\gamma)$, ${}^{127}\text{I}(\alpha,n)$, ${}^{130}\text{Ba}(\alpha,\gamma)$, ${}^{130}\text{Ba}(\alpha,n)$, ${}^{151}\text{Eu}(\alpha,\gamma)$, ${}^{151}\text{Eu}(\alpha,n)$, ${}^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)$, ${}^{169}\text{Tm}(\alpha,n)$. Az azonos izotópokon történő (α,γ) és (α,n) hatáskeresztmetszetek szimultán mérése lehetőséget ad arra, hogy a statisztikus modell ebben a tartományban legfontosabb bemenő paraméterét, az optikai alfa-potenciált vizsgáljuk. A statisztikus modellszámítások során az alfa-, gamma-, és neutronerősségekre való érzékenység becsülhető, ezért méréseink bizonyos tartományában az egyes erősségek szeparálhatók. Eredményeinket minden esetben összehasonlítottuk a statisztikus modell jóslatokkal, és javaslatokat adtunk az elméleti korrekciókra.

Az aktivációs módszer egyik korlátja a keletkezett végmag felezési idejének nagy hibája. Ezért több esetben saját méréseinkkel kellett meghatároznunk a végmag felezési idejét, hogy a mérni kívánt asztrofizikai hatáskeresztmetszetet illetve a hozzá tartozó reakcióhozamot meg tudjuk határozni a kívánt pontossággal.

Kísérleti eredményeink jelentősen megnövelték a p-folyamathoz tartozó hatáskeresztmetszet adatok mennyiségét, ezért a neutronbefogási reakciókra már kidolgozott KADoNiS (Karlsruhe Astrophysical Database of Nucleosynthesis in Stars) adatbázisnál egy, a p-folyamathoz tartozó, proton- és alfa-indukált magreakciókat kritikusan elemző p-adatbázist (KADoNiS-p) hoztunk létre: <http://www.kadonis.org/pprocess/>

Az optikai alfa-potenciálok meghatározására precíziós rugalmas szórás méréseket végeztünk az Atomkiban és a Notre Dame (USA) laboratóriumban. Szögeloszlás-méréseink lehetőséget adnak arra, hogy optikai potenciál-paramétereket határozzunk meg, és azokat a statisztikus modell bemenő paramétereként alkalmazva az elméleti globális potenciálokot teszteljük.

Rugalmas alfa szórás méréseink a ^{113}In , ^{110}Cd , ^{116}Cd izotópokon, valamint a Te izotópok széles tartományán történtek, több bombázóenergián a Coulomb-gát közelében, hogy a potenciál energiatartományáról is információt kapjunk. Méréseink szisztematikus analíziséből lokális optikai paraméterkészleteket határoztunk meg, amelyek viselkedése a globális paraméterkészletek kialakításához ad információt. Az adatok elemzéséből ATOMKI-V1 néven olyan egyszerű globális optikai paraméterkészletet javasoltunk, amely a rendelkezésre álló adathalmazt leírja.

A ^{64}Zn izotóp példáján bizonyítottuk be kísérletileg, hogy az alfa rugalmas szórás szögeloszlásból származtatható totális reakció-hatáskeresztmetszet hibahatáron belül megegyezik az izotópon lejátszódó alfa-indukált reakciók hatáskeresztmetszeteinek összegével. Ez az eredmény lehetőséget adott arra, hogy ^{141}Pr alfa-indukált reakcióról is információkhoz jussunk a rugalmas szórás szögeloszlása ismeretében.

A rendkívül alacsony háttérrel igénylő kis hatáskeresztmetszeteket célzó mérések a pp-lánc, és a CNO-ciklus reakcióira jellemzők. Itt az Atomki clover típusú szegmentált gamma-detektorát, és az azt körülvevő aktív BGO pajzsot telepítettük le két földalatti laboratóriumba (Gran Sasso/Olaszország, Felsenkeller/Németország). Összehasonlító méréseink azt bizonyítják, hogy a Gran Sasso-i mély laboratórium extrém alacsony gamma háttere megközelíthető a jelentősen sekélyebb Felsenkellerben levő kis passzív árnyékolású laboratóriumban is, ha az aktív pajzsot is használjuk. Eredményünk fontosságát mutatja, hogy a fenti összehasonlító mérésünk az „European Physical Journal A” folyóirat címlapjára került, és azóta a drezdai Felsenkeller laboratórium már meg is kezdte egy földalatti részecskegyorsító kiépítését.

Ugyanakkor az Atomki clover detektor szegmentált elrendezését kihasználva, a CNO-ciklus kulcsreakcióját, a $^{14}\text{N}(p,\gamma)$ reakciót tudtuk sikeresen vizsgálni nemzetközi együttműködésben, Drezdában ahol a clover detektor használata jelentősen csökkentette a nagy hatásfokú, ám

nem szegmentált detektorok használatánál fellépő „summing” effektust, mely jelentős szisztematikus hibákat okozhat. A LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) együttműködés (<http://luna.lngs.infn.it/>) keretein belül az Atomkiban kifejlesztett aktivációs módszer segítségével határoztuk meg a $^{17}\text{O}(p,\gamma)$ reakció sebességét, mely a klasszikus nívókban lejátszódó reakció.

A p-magok tömegtartományában, és keletkezési hőmérsékletükön a statisztikus modell alkalmazhatóságának feltételei általában jól teljesülnek. Ez alól kivételnek tűnik a ^{92}Mo izotóp, amelyre a $^{92}\text{Mo}(p,\gamma)$ reakció gerjesztési függvényében német kutatók nem várt fluktuációkat tapasztaltak. Az Atomkiban egy olyan vastag céltárgyhozam meghatározására alapuló módszert dolgoztunk ki, ahol a fluktuációkat integrálva, kísérleti reakcióhozamokat tudtunk meghatározni.

4. Kitekintés

Az NN38261 projekt futamideje alatt 26 publikációt jelentettünk meg az OTKA témaszámot feltüntetve, 88-as összimpakt-faktorral. Ennél fontosabb, hogy a publikációk felében az első szerző az Atomki csoportjából került ki, tehát ezekben a közleményekben a közreműködésünk egyértelműen meghatározó volt. Az Atomki gyorsító-infrastruktúrájának sikere, hogy a publikációk egy másik, csak részben átfedő felében viszont olyan kísérletek eredményeit ismertettük, melyek kizárólag az Atomki gyorsítóin történtek, magyar vagy külföldi kutatók vezetésével. A projekt utolsó évében két összefoglaló cikket jelentettünk meg: az egyik a rugalmas szórás méréseink szisztematikus elemzése az „Atomic Data and Nuclear Data Tables” folyóiratban, a másik pedig az újság szerkesztőinek meghívására készült, az asztrofizikai p-folyamatot áttekintő „review” cikk, a 13-as impakt faktorú „Reports on Progress in Physics” folyóiratban. A projekt időszaka alatt az OTKA résztvevői két Ph.D. és egy MTA doktora fokozatot szereztek, az egyik résztvevő pedig 2012-ben „Junior Prima” díjban részesült. Az ESF a projekt sikerére való tekintettel egy olyan kiadvány elkészítését is finanszírozza, mely a nukleáris asztrofizika témáját ismerteti. E kiadvány szerkesztő bizottságába az Atomki csoport egy tagja is bekerült. Az ESF projekt befejeztével, az Atomki nukleáris asztrofizikai csoportjának részvételével, EU-COST pályázat került beadásra, valamint meghívást kaptunk a „European Laboratory Astrophysics Network” (ELAN) H2020 projektbe. A projekt bemutatásra került az OTKA hónap kutatója sorozatban is: <http://www.otka.hu/otka-magazin/a-honap-kutatoja/2010-1/2010-oktober>

2014 július 7-11 között az Atomki nukleáris asztrofizika csoportja rendezi meg Debrecenben a téma legnagyobb nemzetközi konferenciáját „Nuclei in the Cosmos” címmel:

<http://www.nic2014.org/>