അധ്യായം പതിമൂന്ന്

ന്യൂക്ലിയസുകൾ (NUCLEI)

M3E3Y2

13.1 ആമുഖം

ഓരോ ആറ്റത്തിലുമുള്ള പോസിറ്റീവ് ചാർജും മാസ്സും ആറ്റത്തിന്റെ മധ്യത്തിൽ കേന്ദ്രീകരിക്കപ്പെട്ട് ന്യൂക്ലിയസ് (Nucleus) രൂപം കൊള്ളുന്നതായി നമ്മൾ കഴിഞ്ഞ അധ്യായത്തിൽ പഠിച്ചുകഴിഞ്ഞു. ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആകെ വ്യാപ്തി ആറ്റത്തിന്റേതിനേക്കാൾ വളരെ ചെറുതാണ്. ആറ്റത്തിന്റെ ആരത്തിന്റെ 10^{4} ൽ ഒരു ഭാഗമാണ് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആരമെന്നത് ആൽഫാ വിസരണ (Alpha Scattering) പരീക്ഷണത്തിലൂടെ തെളിയിക്കപ്പെട്ടതാണ്. ന്യൂക്ലിയസിന്റെ വ്യാപ്തം ആറ്റത്തിന്റേതിന്റെ 10^{-12} ഭാഗമാണെന്നാണ് ഇത് അർഥമാക്കുന്നത്. മറ്റൊരുതരത്തിൽ പറഞ്ഞാൽ ആറ്റം ഏറെക്കുറെ ശൂന്യമാണ്. ആറ്റത്തെ ഒരു ക്ലാസ് മുറിയുടെ വലുപ്പത്തിലേക്ക് വലുതാക്കിയാൽ ന്യൂക്ലിയസിന് ഒരു മൊട്ടുസൂചിമുനയുടെ വലുപ്പമേയുണ്ടാവൂ. എന്നിരുന്നാലും, ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ സിംഹഭാഗവും (99%ത്തിലധികം) ന്യൂക്ലിയസ്സിലാണ് എന്നത് വിസ്മയകരമായ കാര്യമാണ്.

ആറ്റത്തെപ്പോലെ, ന്യൂക്ലിയസിന് ഒരു ഘടനയുണ്ടോ? ഉണ്ടെങ്കിൽ, ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ഘടകവസ്തുക്കൾ എന്തെല്ലാമാണ്? ഇവയെ എങ്ങനെ ഒന്നിച്ചു നിർത്തുന്നു? ഈ അധ്യായത്തിൽ, നമുക്ക് ഇത്തരം ചോദ്യങ്ങൾക്കുള്ള ഉത്തരങ്ങൾ അന്വേഷിക്കാം. ന്യൂക്ലിയസിന്റെ വിവിധ ഗുണങ്ങളായ വലുപ്പം, സ്ഥിരത, ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിഭാസങ്ങളായ റേഡിയോആക്റ്റിവിറ്റി (Radioactivtiy), ഫിഷൻ (Fission), ഫ്യൂഷൻ (Fusion) തുടങ്ങിയവയെക്കുറിച്ചും നമുക്ക് ചർച്ച ചെയ്യാം.

13.2 ആറ്റോമിക മാസുകളും ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ഘടനയും (ATOMIC MASSES AND COMPOSITION OF NUCLEUS)

ഒരു കിലോഗ്രാമുമായി താരതമ്യപ്പെടുത്തുമ്പോൾ, ആറ്റത്തിന്റെ മാസ് വളരെ ചെറുതാണ്. ഉദാഹരണമായി, ഒരു കാർബൺ (^{12}C) ആറ്റത്തിന്റെ മാസ് 1.992647×10^{-26} kg ആണ്. ഇതുപോലുള്ള ചെറിയ അളവുകൾക്ക് ഉചിതമായ യൂണിറ്റല്ല കിലോഗ്രാം. അതിനാൽ, ആറ്റോമിക മാസിനെ ആവിഷ്കരിക്കാൻ വ്യത്യസ്തമായ ഒരു മാസ് യൂണിറ്റാണ് ഉപയോഗിക്കുന്നത്. ഇതാണ് ആറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റ് (atomic mass unit - u). കാർബൺ ആറ്റത്തിന്റെ (^{12}C) മാസിന്റെ 1/12 ഭാഗമെന്ന് ആറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റിനെ നിർവചിച്ചിരിക്കുന്നു. ഈ നിർവചനമനുസരിച്ച്,

$$1\,u = \frac{\text{ഒരു } ^{12}C \text{ ആറ്റത്തിന്റെ മാസ്}}{12}$$

$$= \frac{1.992647 \times 10^{-26}\ \text{kg}}{12}$$

$$= 1.660539 \times 10^{-27}\ \text{kg} \qquad (13.1)$$

ആറ്റോമിക മാസ് യൂണിറ്റിൽ (u) പ്രകടിപ്പിക്കപ്പെട്ട വിവിധ മൂലകങ്ങളുടെ ആറ്റോമിക മാസ്, ഒരു ഹൈഡ്രജൻ ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ പൂർണ ഗുണിതങ്ങളോട് അടുത്ത് നിൽക്കുന്നതാണ്. എങ്കിലും, ഈ നിയമത്തിന് ശ്രദ്ധേയമായ നിരവധി അപവാദങ്ങൾ ഉണ്ട്. ഉദാഹരണമായി, ക്ലോറിന്റെ ആറ്റോമിക മാസ് 35.46 u ആണ്.

ആറ്റോമിക മാസുകൾ കൃത്യമായി അളക്കുന്നത് മാസ് സ്പെക്ട്രോമീറ്റർ ഉപയോഗിച്ചാണ്. ആറ്റോമിക മാസുകളുടെ അളക്കൽ, സമാന രാസഗുണങ്ങൾ പ്രകടിപ്പിക്കുന്നതും എന്നാൽ വ്യത്യസ്ത മാസുകളുള്ളതുമായ, ഒരേ മൂലകത്തിന്റെ വ്യത്യസ്ത തരം ആറ്റങ്ങളുടെ അസ്തിത്വം വെളിപ്പെടുത്തുന്നു. മാസുകൾ വ്യത്യസ്തങ്ങളായ ഒരേ മൂലകത്തിന്റെ ഇത്തരം ആറ്റോമിക ഇനങ്ങളെ ഐസോടോപ്പുകൾ (isotopes) എന്നു വിളിക്കുന്നു. ഗ്രീക്ക് ഭാഷയിൽ, ഐസോട്ടോപ്പിന് ഒരേ സ്ഥലം എന്നാണർഥം. അതായത് മൂലകങ്ങളുടെ ആവർത്തന പട്ടികയിൽ അവ ഒരേ സ്ഥലത്ത് നിലകൊള്ളുന്നു. പ്രായോഗികമായി ഓരോ മൂലകവും പല ഐസോടോപ്പുകളുടെ മിശ്രിതങ്ങൾ ഉൾക്കൊള്ളുന്നതായി കണ്ടെത്തിയിട്ടുണ്ട്. വിവിധ ഐസോടോപ്പുകളുടെ ആപേക്ഷിക ലഭ്യത ഓരോ മൂലകത്തിനും വ്യത്യസ്തമാണ്. ഉദാഹരണത്തിന്, ഹൈഡ്രജൻ ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ ഏറെക്കുറെ സമഗ്ര ഗുണിതങ്ങളായ 34.98 u, 36.98 u മാസുകളുള്ള രണ്ട് ഐസോടോപ്പുകൾ ക്ലോറിനുണ്ട്. ഈ ഐസോടോപ്പുകളുടെ ആപേക്ഷികസമൃദ്ധി (relative abundance) യഥാക്രമം 75.4%, 24.6% എന്നിങ്ങനെയാണ്. ഇപ്രകാരം, ഈ രണ്ട് ഐസോടോപ്പുകളുടെ മാസുകളുടെ വെയ്റ്റഡ് ശരാശരി (weighted average) യായിട്ടാണ് ക്ലോറിന്റെ ശരാശരി മാസ് ലഭിക്കുന്നത്, താഴെ കൊടുത്തിരിക്കുന്ന രീതിയിൽ ചെയ്ത് നോക്കുമ്പോൾ,

$$= \frac{75.4 \times 34.98 + 24.6 \times 36.98}{100}$$

$$= 35.47\,u$$

ഇത് ക്ലോറിന്റെ ആറ്റോമിക മാസ് തന്നെയാണെന്ന് കാണാം.

ഏറ്റവും ഭാരം കുറഞ്ഞ മൂലകമായ ഹൈഡ്രജനു പോലും 1.0078 u, 2.0141 u,

3.0160 u എന്നിങ്ങനെ മാസുകളുള്ള മൂന്ന് ഐസോടോപ്പുകൾ ഉണ്ട്. ആപേക്ഷിക സമൃദ്ധി 99.985% ഉള്ള, ഏറ്റവും ഭാരം കുറഞ്ഞതായ ഹൈഡ്രജൻ ആറ്റത്തിന്റെ ന്യൂക്ലിയസിനെ പ്രോട്ടോൺ എന്ന് വിളിക്കുന്നു. പ്രോട്ടോണിന്റെ മാസ്

$$m_p = 1.00727\,\text{u} = 1.67262 \times 10^{27}\,\text{kg} \quad (13.2)$$

ഇത് ഹൈഡ്രജൻ ആറ്റത്തിന്റെ മാസിൽ (= 1.00783u) നിന്ന് ഒരു ഇലക്ട്രോണിന്റെ മാസ് (m_e = 0.00055u) കുറച്ചതിനു തുല്യമാണ്. ഹൈഡ്രജന്റെ മറ്റു രണ്ട് ഐസോടോപ്പുകളാണ് ഡ്യൂട്ടീരിയവും ട്രിഷിയവും (deuterium and tritium). അസ്ഥിരമായതിനാൽ, ട്രിഷിയം ന്യൂക്ലിയസുകൾ സ്വാഭാവികമായി ഉണ്ടാകുന്നില്ല, പരീക്ഷണശാലകളിൽ കൃത്രിമമായി നിർമിക്കപ്പെടുകയാണ് ചെയ്യുന്നത്.

ന്യൂക്ലിയസിലെ പോസിറ്റീവ് ചാർജ് പ്രോട്ടോണുകളുടേതാണ്. ഒരു പ്രോട്ടോൺ അടിസ്ഥാന ചാർജിന്റെ ഒരു യൂണിറ്റ് വഹിക്കുന്നതും, സ്ഥിരതയുള്ളതുമാണ്. ന്യൂക്ലിയസിൽ ഇലക്ട്രോണുകൾ അടങ്ങിയിരിക്കാമെന്ന് നേരത്തെ കരുതിയിരുന്നു, എന്നാൽ ക്വാണ്ടം സിദ്ധാന്തത്തെ അടിസ്ഥാനമാക്കിയുള്ള പിൽക്കാല വാദങ്ങൾ ഇതിനെ നിരാകരിച്ചു. ഒരു ആറ്റത്തിലെ എല്ലാ ഇലക്ട്രോണുകളും ന്യൂക്ലിയസിന് പുറത്താണ് കാണപ്പെടുന്നത്. ആറ്റത്തിലെ ന്യൂക്ലിയസിന് പുറത്തുള്ള ഈ ഇലക്ട്രോണുകളുടെ എണ്ണം ആറ്റോമിക നമ്പർ (Z), ആണെന്ന് നമുക്കറിയാം. ആറ്റോമിക ഇലക്ട്രോണുകളുടെ ആകെ ചാർജ് (-Ze) ആണ്, ആറ്റം ചാർജു രഹിതമായതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ചാർജ് +Ze യും ആയിരിക്കും. അതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയസിലെ പ്രോട്ടോണുകളുടെ എണ്ണം കൃത്യമായും ആറ്റോമിക നമ്പർ (Z) തന്നെയാണ്.

ന്യൂട്രോണിന്റെ കണ്ടുപിടിത്തം (Discovery of Neturon)

ഡ്യൂട്ടീരിയത്തിന്റെയും ട്രിഷിയത്തിന്റെയും ന്യൂക്ലിയസുകൾ ഹൈഡ്രജന്റെ ഐസോടോപ്പുകളായതിനാൽ, അവയിൽ ഒരു പ്രോട്ടോൺ മാത്രമേ ഉണ്ടാകാവൂ. എന്നാൽ ഹൈഡ്രജൻ, ഡ്യൂട്ടീരിയം, ട്രിഷിയം എന്നിവയുടെ ന്യൂക്ലിയസ്സുകളുടെ മാസുകൾ 1 : 2 : 3 എന്ന അനുപാതത്തിലാണ്. അതിനാൽ, ഡ്യൂട്ടീരിയത്തിന്റെയും ട്രിഷിയത്തിന്റെയും ന്യൂക്ലിയസ്സുകളിൽ, പ്രോട്ടോണിനെക്കൂടാതെ ചില ചാർജ് രഹിത ദ്രവ്യവും കൂടി അടങ്ങിയിരിക്കണം. ഒരു പ്രോട്ടോൺ മാസിന്റെ യൂണിറ്റുകളിൽ സൂചിപ്പിച്ചാൽ, ഈ ഐസോടോപ്പുകളുടെ ന്യൂക്ലിയസ്സുകളിൽ കാണപ്പെടുന്ന ചാർജ് രഹിത ദ്രവ്യത്തിന്റെ അളവ് യഥാക്രമം ഒരു പ്രോട്ടോൺമാസ്, രണ്ട് പ്രോട്ടോൺമാസ്എന്നിവയ്ക്ക് ഏറെക്കുറെ തുല്യമാണ്. ഈ വസ്തുത സൂചിപ്പിക്കുന്നത്, ഒരു ആറ്റത്തിന്റെ ന്യൂക്ലിയസിൽ പ്രോട്ടോണുകളുടെ കൂടെ ഒരു അടിസ്ഥാന യൂണിറ്റിന്റെ ഗുണിതങ്ങളായി ചാർജ് രഹിത ദ്രവ്യവും അടങ്ങിയിരിക്കുന്നുവെന്നാണ്. ആൽഫ കണങ്ങൾ കൊണ്ട് ബെറിലിയം ന്യൂക്ലിയസുകളെ കൂട്ടിയിടിപ്പിച്ചപ്പോൾ ഉണ്ടായ ന്യൂട്രൽ റേഡിയേഷന്റെ ഉൽസർജനം നിരീക്ഷിച്ച ജെയിംസ് ചാഡ്‌വിക് (James Chadwick) 1932ൽ ഈ പരികൽപന ശരിയാണെന്നു തെളിയിച്ചു. (α കണങ്ങൾ ഹീലിയം ന്യൂക്ലിയസുകളാണ്, പിന്നീടുള്ള ഭാഗത്ത് ഇത് ചർച്ച ചെയ്യപ്പെടുന്നതാണ്). ഹീലിയം, കാർബൺ, നൈട്രജൻ തുടങ്ങിയ ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകളിൽ നിന്ന് പ്രോട്ടോണുകളെ പുറന്തള്ളാൻ ഈ ന്യൂട്രൽ വികിരണങ്ങൾക്കാവുമെന്ന് പിന്നീട് കണ്ടെത്തി. അക്കാലത്ത് അറിയപ്പെട്ടിരുന്ന ഏക ന്യൂട്രൽ വികിരണം ഫോട്ടോണുകൾ (വൈദ്യുതകാന്തിക വികിരണം) മാത്രമായിരുന്നു. ഈ ന്യൂട്രൽ റേഡിയേഷൻ ഫോട്ടോണുകളാലുള്ളതായിരുന്നെങ്കിൽ, ബെറിലിയം ന്യൂക്ലിയസുകളിൽ നിന്നും α- കണങ്ങളുപയോഗിച്ച് ലഭ്യമാകുന്നതി

നേക്കാൾ വളരെ ഉയർന്നതാകണം ഫോട്ടോണുകളുടെ ഊർജമെന്നാണ് ഊർജ ത്തിന്റെയും ആക്കത്തിന്റെയും സംരക്ഷണ നിയമങ്ങളുടെ പ്രയോഗം തെളിയി ക്കുന്നത്. എന്നാൽ അങ്ങനെ കാണപ്പെടുന്നില്ല. ചാഡ്‌വിക് തൃപ്തികരമായ പരി ഹാരം കണ്ടെത്തിയ ഈ പ്രഹേളികയിലെ സൂചന, ഈ ന്യൂട്രൽ റേഡിയേഷൻ ന്യൂട്രോണുകൾ (neutrons) എന്ന പുതിയ തരം ചാർജുരഹിത (ന്യൂട്രൽ) കണികക ളാലാണെന്നുള്ള അനുമാനമാണ്. ഊർജ, ആക്ക സംരക്ഷണങ്ങളിൽ നിന്നും, പ്രോട്ടോണിന്റെ മാസിന് ഏതാണ്ട് സമാനമാണ് പുതിയ കണത്തിന്റെ മാസ് എന്നു നിർണ്ണയിക്കാനും അദ്ദേഹത്തിന് കഴിഞ്ഞു.

ന്യൂട്രോണുകളുടെ മാസ് വളരെ കൃത്യമായിത്തന്നെ ഇന്ന് നമുക്ക് അറിയാം.

$$m_n = 1.00866 \text{ u} = 1.6749\times10^{-27} \text{ kg} \qquad (13.3)$$

ന്യൂട്രോണിന്റെ കണ്ടെത്തലിന് 1935 ലെ ഭൗതികശാസ്ത്ര നോബെൽ പുരസ്കാ രം അദ്ദേഹത്തിനു ലഭിച്ചു. സ്വതന്ത്ര ന്യൂട്രോൺ, സ്വതന്ത്ര പ്രോട്ടോണിനെപ്പോ ലെയല്ല, അസ്ഥിരമാണ്. ഒരു പ്രോട്ടോൺ, ഒരു ഇലക്ട്രോൺ, ഒരു ആന്റിന്യൂട്രിനോ (മറ്റൊരു പ്രാഥമിക കണം) എന്നിവയായി അത് മാറുന്നു. അതിന്റെ ശരാശരി ആയുസ്സ് ഏകദേശം 1000s ആണ്. എന്നാൽ ന്യൂക്ലിയസിനുള്ളിൽ അത് സുസ്ഥിര വുമാണ്.

ഒരു ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ഘടന ഇനിപ്പറയുന്ന പദങ്ങളും പ്രതീകങ്ങളും ഉപയോഗിച്ച് വിവരിക്കാനാകും:

Z - *ആറ്റോമിക സംഖ്യ = പ്രോട്ടോണുകളുടെ എണ്ണം* [13.4(a)]

N - *ന്യൂട്രോൺ സംഖ്യ = ന്യൂട്രോണുകളുടെ എണ്ണം* [13.4(b)]

A - *മാസ്സ് സംഖ്യ* $= Z + N$

= പ്രോട്ടോണുകളുടെയും ന്യൂട്രോണുകളുടെയും ആകെ എണ്ണം [13.4(c)]

ഒരു പ്രോട്ടോണിനെയോ ന്യൂട്രോണിനെയോ സൂചിപ്പിക്കാൻ വേണ്ടി ന്യൂക്ലി യോൺ (nucleon) എന്ന പദം ഉപയോഗിക്കുന്നു. അതിനാൽ, ഒരു ആറ്റത്തിലെ ന്യൂക്ലിയോണുകളുടെ എണ്ണം അതിന്റെ മാസ് സംഖ്യ A ആണ്.

ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ഇനങ്ങളെ അഥവാ ന്യൂക്ലൈഡുകളെ $^{A}_{Z}X$ എന്നാണ് കാണിക്കു ന്നത്, ഇവിടെ X എന്നത് ഒരു ഇനത്തിന്റെ രാസപ്രതീകമാണ്. ഉദാഹരണമായി, സ്വർണത്തിന്റെ ന്യൂക്ലിയസിനെ $^{197}_{79}Au$ എന്നാണ് സൂചിപ്പിക്കുന്നത്. ഇതിൽ, 197 ന്യൂക്ലിയോണുകളുണ്ട്. അവയിൽ 79 എണ്ണം പ്രോട്ടോണുകളും ബാക്കി 118 എണ്ണം ന്യൂട്രോണുകളുമാണ്.

ഒരു മൂലകത്തിന്റെ ഐസോടോപ്പുകളുടെ ഘടന വ്യക്തമായി വിശദീകരിക്കാൻ നമുക്ക് കഴിയും. ഒരു നിശ്ചിത മൂലകത്തിന്റെ ഐസോട്ടോപ്പുകളുടെ ന്യൂക്ലിയസു കളിൽ ഒരേ എണ്ണം പ്രോട്ടോണുകളും, എന്നാൽ വ്യത്യസ്ത എണ്ണം ന്യൂട്രോണുക ളുമായിരിക്കും ഉണ്ടാവുക. ഹൈഡ്രജന്റെ ഒരു ഐസോടോപ്പായ ഡ്യൂട്ടീരിയ ത്തിൽ ($^{2}_{1}H$), ഒരു പ്രോട്ടോണും ഒരു ന്യൂട്രോണും അടങ്ങിയിരിക്കുന്നു. മറ്റൊരു ഐസോടോപ്പായ ട്രിഷിയത്തിൽ ($^{3}_{1}H$), ഒരു പ്രോട്ടോണും രണ്ട് ന്യൂട്രോണുക ളും അടങ്ങിയിരിക്കുന്നു. സ്വർണത്തിന് $A = 173$ മുതൽ $A = 204$ വരെയുള്ള 32 ഐസോടോപ്പുകളുണ്ട്. മൂലകങ്ങളുടെ രാസഗുണങ്ങൾ അവയുടെ ഇലക്ട്രോണിക ഘടനയെ ആശ്രയിച്ചിരിക്കുന്നു എന്ന് നമ്മൾ ഇതിനകം സൂചിപ്പിച്ചിട്ടുണ്ട്. ഐ സോടോപ്പുകളുടെ ആറ്റങ്ങൾ ഒരേ ഇലക്ട്രോൺ ഘടനയുള്ളതിനാൽ അവയ്ക്ക് സമാനമായ രാസ സ്വഭാവങ്ങളാണുള്ളത്, ആവർത്തന പട്ടികയിൽ അവ ഒരേ സ്ഥാനത്ത് സ്ഥിതിചെയ്യുകയും ചെയ്യുന്നു.

ഒരേ മാസ് നമ്പറുള്ള എല്ലാ ന്യൂക്ലൈഡുകളെയും ഐസോബാറുകൾ (isobars) എന്ന് വിളിക്കുന്നു. ഉദാഹരണമായി, $^{3}_{1}H$, $^{3}_{2}He$ എന്നീ ന്യൂക്ലൈഡുകൾ ഐസോബാറുകളാണ്. ഒരേ ന്യൂട്രോൺ എണ്ണവും എന്നാൽ വ്യത്യസ്ത ആറ്റോമിക നമ്പറുമുള്ള ന്യൂക്ലൈഡുകളാണ് ഐസോടോണുകൾ (isotones). ഉദാഹരണം: $^{198}_{80}Hg$, $^{197}_{79}Au$.

13.3 ന്യൂക്ലിയസിന്റെ വ്യാപ്തി (SIZE OF THE NUCLEUS)

12-ാം അധ്യായത്തിൽ നാം കണ്ടതുപോലെ, ആറ്റോമിക ന്യൂക്ലിയസിന്റെ അസ്തിത്വത്തെക്കുറിച്ച് പരികൽപന നടത്തുകയും അത് സ്ഥാപിക്കുകയും ചെയ്ത മാർഗദർശി ആയിരുന്നു റൂഥർഫോർഡ് (Rutherford). റൂഥർഫോർഡ് നിർദ്ദേശിച്ച രീതിയിൽ, ഗെയ്ഗറും, മാർസ്ഡെനും (Geiger and Marsden) ആറ്റോമിക ഘടന കണ്ടെത്തുവാനുള്ള പരീക്ഷണം നടത്തിയ കാര്യം നാം പഠിച്ചുവല്ലോ. കനം കുറഞ്ഞ സ്വർണത്തകിടിലൂടെയുള്ള α കണങ്ങളുടെ വിസരണത്തിൽ 5.5 MeV ഗതികോർജമുള്ള α കണത്തിന് സ്വർണ ന്യൂക്ലിയസിനോട് ഏറ്റവും അടുത്തെത്താവുന്ന ദൂരം, 4.0×10^{-14} മീറ്റർ ആണെന്ന് അവരുടെ പരീക്ഷണങ്ങൾ വ്യക്തമാക്കുന്നു. സ്വർണത്തകിടിൽ നിന്നുള്ള α കണത്തിന്റെ വിസരണം റൂഥർഫോർഡ് മനസ്സിലാക്കിയത് കൂളോം വികർഷണബലമാണ് വിസരണത്തിന്റെ ഏക കാരണമെന്ന് അനുമാനിച്ചുകൊണ്ടാണ്. പോസിറ്റീവ് ചാർജ് ന്യൂക്ലിയസിൽ മാത്രം ഒതുങ്ങുന്നതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയസിന്റെ യഥാർത്ഥ വലുപ്പം 4.0×10^{-14} മീറ്ററിൽ കുറവായിരിക്കണം.

5.5 MeV നേക്കാൾ ഉയർന്ന ഊർജമുള്ള α- കണങ്ങളാണ് ഉപയോഗിക്കുന്നതെങ്കിൽ, സ്വർണ ന്യൂക്ലിയസിനോട് ഏറ്റവും അടുത്തെത്താവുന്ന ദൂരം കുറയുകയും, ഇത്തരം സാഹചര്യങ്ങളിൽ ഹ്രസ്വ ദൂരപരിധിയുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന്റെ സ്വാധീനത്താൽ വിസരണം ആരംഭിക്കുകയും, റൂഥർഫോർഡ് കണക്കുകൂട്ടിയ പാത വ്യത്യാസപ്പെടുകയും ചെയ്യും. α- കണത്തിന്റെയും സ്വർണ ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും പോസിറ്റീവ് ചാർജുകൾക്കിടയിലുള്ള കൂളോം വികർഷണബലത്തിന്റെ മാത്രം അടിസ്ഥാനത്തിലാണ് റൂഥർഫോർഡിന്റെ കണക്കുകൂട്ടലുകൾ. പാത വ്യതിയാനങ്ങൾ അനുഭവപ്പെടുന്ന അകലത്തിൽ നിന്ന് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ വലുപ്പം അനുമാനിക്കാം.

വിസരണ പരീക്ഷണത്തിൽ α- കണങ്ങൾക്ക് പകരം വേഗമേറിയ ഇലക്ട്രോണുകൾ വിവിധ മൂലകങ്ങളുടെ ന്യൂക്ലിയസുകൾ ലക്ഷ്യങ്ങളാക്കി പായിച്ചു കൊണ്ട്, വ്യത്യസ്ത മൂലകങ്ങളുടെ ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ വ്യാപ്തി കൃത്യമായി കണക്കാക്കപ്പെട്ടിട്ടുണ്ട്.

ഇത്തരം പരീക്ഷണങ്ങൾ A മാസ് നമ്പറുള്ള ഒരു ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആരം,

$$R = R_0 A^{1/3} \tag{13.5}$$

എന്ന ബന്ധം നിലനിർത്തുന്നുവെന്ന് സ്ഥാപിച്ചു. ഇതിൽ $R_0 = 1.2\times10^{-15}$ m ആണ്. ഇത് സൂചിപ്പിക്കുന്നത് R^3ന് ആനുപാതികമായ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ വ്യാപ്തം, A യുമായി നേർഅനുപാതത്തിലായിരിക്കുമെന്നാണ്. അതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയസിന്റെ സാന്ദ്രത എല്ലാ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും A ൽ നിന്നും സ്വതന്ത്രമായ ഒരു സ്ഥിരസംഖ്യയായി നിലനിൽക്കുന്നു. വ്യത്യസ്ത ന്യൂക്ലിയസുകൾ സ്ഥിരമായ സാന്ദ്രതയുള്ള ദ്രാവകതുള്ളികൾ പോലെയാണ്. ന്യൂക്ലിയാർ ദ്രവ്യത്തിന്റെ സാന്ദ്രത ഏകദേശം 2.3×10^{17} kg m^{-3} ആണ്. സാധാരണ പദാർഥങ്ങളുടെ സാന്ദ്രതയെക്കാൾ വളരെ

വളരെ കൂടുതലാണിത്. (വെള്ളത്തിന്റേത് 10^3 kg m^{-3}). ആറ്റത്തിന്റെ അധികഭാഗവും ശൂന്യമാണെന്ന് നാം കണ്ടുകഴിഞ്ഞതിനാൽ, ഇത് എളുപ്പത്തിൽ മനസ്സിലാക്കാവുന്നതേയുള്ളൂ. ആറ്റങ്ങൾ കൊണ്ട് നിർമിക്കപ്പെട്ട എല്ലാ വസ്തുക്കളിലും വലിയ തോതിൽ ശൂന്യതയാണുള്ളത്.

ഉദാഹരണം 13.1: ഇരുമ്പ് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് 55.85u വും A=56 ഉം ആയാൽ അതിന്റെ ന്യൂക്ലിയാർ സാന്ദ്രത കാണുക

ഉത്തരം: $m_{Fe} = 55.85\,u = 9.27\times10^{-26}$ kg

$$\text{ന്യൂക്ലിയാർ സാന്ദ്രത} = \frac{\text{മാസ്}}{\text{ഉള്ളളവ്}} = \frac{9.27\times10^{-26}}{(4\pi/3)(1.2\times10^{-15})^3}\times\frac{1}{56} = 2.29\times10^{17}\ \text{kg m}^{-3}$$

ഈ സാന്ദ്രതയോട് താരതമ്യം ചെയ്യാവുന്നത് ന്യൂട്രോൺ നക്ഷത്രങ്ങളുടെ ദ്രവ്യത്തിന്റെ സാന്ദ്രതയാണ്.

ഒരു വലിയ ന്യൂക്ലിയസിനോട് താരതമ്യപ്പെടുത്താവുന്ന തരത്തിലാണ് ഇത്തരം വസ്തുക്കളിൽ ദ്രവ്യം ഞെരുങ്ങിയിരിക്കുന്നത്.

ഉദാഹരണം 13.1

13.4 മാസ്സ് – ഊർജവും ന്യൂക്ലിയാർ ബന്ധന ഊർജവും (Mass-Energy and Nuclear Binding Energy)

13.4.1 മാസ് - ഊർജം (Mass – Energy)

ഊർജത്തിന്റെ മറ്റൊരു രൂപമായി മാസിനെ പരിഗണിക്കേണ്ടതുണ്ടെന്ന് വിശിഷ്ട ആപേക്ഷിക സിദ്ധാന്തത്തിലൂടെ ഐൻസ്റ്റൈൻ വിശദീകരിക്കുകയുണ്ടായി. വിശിഷ്ട ആപേക്ഷികതാ സിദ്ധാന്തം ഉണ്ടാകുന്നതിനുമുമ്പ്, വിവിധ പ്രക്രിയകളിൽ മാസും ഊർജവും പ്രത്യേകമായി സംരക്ഷിക്കപ്പെടുന്നു എന്ന് അനുമാനിക്കപ്പെട്ടു. എന്നാൽ, ഊർജത്തിന്റെ മറ്റൊരു രൂപമാണ് മാസെന്നും, മാസ് ഊർജത്തെ മറ്റ് ഊർജരൂപങ്ങളിലേക്കും തിരിച്ചും (ഉദാ: ഗതികോർജത്തിലേക്കും തിരികെയും) മാറ്റാവുന്നതാണെന്നും ഐൻസ്റ്റൈൻ തെളിയിച്ചു. അദ്ദേഹം പ്രസിദ്ധമായ മാസ് ഊർജ തുല്യതയ്ക്ക് താഴെ കൊടുത്ത തരത്തിലുള്ള ബന്ധം നൽകി.

$$E = mc^2 \qquad (13.6)$$

ഇവിടെ m മാസിനെ തത്തുല്യമായ ഊർജ *(E)* വുമായി ബന്ധിപ്പിച്ചിരിക്കുന്നു. c എന്നത് ശൂന്യതയിലെ പ്രകാശത്തിന്റെ പ്രവേഗം (ഏകദേശം 3×10^8 ms^{-1}) ആണ്.

ഉദാഹരണം 13.2: 1 g പദാർഥത്തിന് സമാനമായ ഊർജം കണക്കാക്കുക.

ഉത്തരം:

ഊർജം, $E = 10^{-3}\times(3\times10^8)^2$ J

$E = 10^{-3}\times9\times10^{16} = 9\times10^{13}$ J

അതായത്, ഒരു ഗ്രാം പദാർഥം ഊർജമായി മാറുമ്പോൾ, വളരെ വലിയ അളവിലുള്ള ഊർജമാണ് സൃഷ്ടിക്കപ്പെടുന്നത്.

ഉദാഹരണം 13.2

ന്യൂക്ലിയോണുകൾ, ന്യൂക്ലിയസുകൾ, ഇലക്ട്രോണുകൾ, അടുത്തകാലത്ത് കണ്ടെത്തിയ കണികകൾ എന്നിവയിലെ ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനങ്ങളെക്കുറിച്ചുള്ള

പഠനത്തിലാണ് ഐൻസ്റ്റൈന്റെ മാസ് ഊർജ ബന്ധം പരീക്ഷിച്ചറിഞ്ഞത്. മാസുമായി ബന്ധപ്പെട്ട ഊർജവും കൂടി ഉൾപ്പെടുത്തുമ്പോൾ, ഒരു പ്രവർത്തനത്തിലെ ആദ്യ ഊർജവും അവസാന ഊർജവും തുല്യമാണെന്ന് ഊർജസംരക്ഷണ നിയമം പ്രസ്താവിക്കുന്നു. ന്യൂക്ലിയാർ മാസുകളെയും ന്യൂക്ലിയസ്സുകളുടെ പരസ്പര പ്രവർത്തനങ്ങളെയും കുറിച്ച് മനസ്സിലാക്കുന്നതിന് ഈ ആശയം വളരെ പ്രധാനമാണ്. അടുത്ത ഏതാനും ഭാഗങ്ങളിൽ ഇതിനെക്കുറിച്ചാണ് പ്രതിപാദിക്കുന്നത്.

13.4.2 ന്യൂക്ലിയാർ ബന്ധന ഊർജം (Nuclear binding energy)

ന്യൂക്ലിയസ് നിർമിക്കപ്പെട്ടിട്ടുള്ളത് ന്യൂട്രോണുകളും പ്രോട്ടോണുകളും ചേർന്നാണെന്ന് സെക്ഷൻ 13.2 ൽ നമ്മൾ കണ്ടതാണ്. അതുകൊണ്ട് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് അത് നിർമിക്കപ്പെട്ടിട്ടുള്ള പ്രോട്ടോണുകളുടെയും ന്യൂട്രോണുകളുടെയും ആകെ മാസിന് തുല്യമാണെന്നു കരുതാവുന്നതാണ്. എന്നിരുന്നാലും, ന്യൂക്ലിയാർ മാസ് M ഇതിനെക്കാൾ കുറവായി കാണപ്പെടുന്നു. ഉദാഹരണത്തിന്, 8 പ്രോട്ടോണുകളും 8 ന്യൂട്രോണുകളുമുള്ള $^{16}_{8}O$ പരിഗണിക്കുകയാണെങ്കിൽ,

നമുക്കറിയാം,

8 ന്യൂട്രോണുകളുടെ മാസ് = 8×1.00866 u

8 പ്രോട്ടോണുകളുടെ മാസ് = 8×1.00727 u

8 ഇലക്ട്രോണുകളുടെ മാസ് = 8×0.00055 u

അതിനാൽ, $^{16}_{8}O$ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ പ്രതീക്ഷിത മാസ് = 8×2.01593 u = 16.12744 u.

മാസ് സ്പെക്ട്രോസ്കോപ്പി പരീക്ഷണം വഴി കണ്ടുപിടിച്ച $^{16}_{8}O$ ന്റെ ആറ്റോമിക മാസ് 15.99493 u ആണ്. മാസ് 8 ഇലക്ട്രോണുകളുടെ മാസ് (8×0.00055 u) ഇതിൽ നിന്ന് കുറച്ചാൽ, ന്യൂക്ലിയസിന്റെ പരീക്ഷണാത്മക മാസ് നമുക്ക് ലഭിക്കുക 15.99053 u ആണ്.

അതായത്, $^{16}_{8}O$ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെ ആകെ മാസിൽ നിന്ന് 0.13691u കുറവാണെന്ന് നമുക്കു കാണാനാകും. ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെയും മാസുകൾ തമ്മിലുള്ള ഈ വ്യത്യാസത്തെ ΔM, മാസ് ന്യൂനത (Mass defect) എന്ന് വിളിക്കുന്നു. അത് ഇപ്രകാരമായിരിക്കും,

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M \tag{13.7}$$

മാസ് ന്യൂനതയെന്നതുകൊണ്ട് എന്താണ് അർഥമാക്കുന്നത്? ഇത് മനസ്സിലാക്കുന്നതിന് ഐൻസ്റ്റൈന്റെ മാസ് ഊർജ തുല്യതയാണ് പ്രധാന പങ്കു വഹിക്കുന്നത്. ഓക്സിജൻ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെ മാസുകളുടെ തുക (8 പ്രോട്ടോണുകളും 8 ന്യൂട്രോണുകളും, ബന്ധിതമല്ലാത്ത അവസ്ഥയിൽ) യേക്കാൾ കുറവാണെങ്കിൽ, ഓക്സിജൻ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ സമാന ഊർജം അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെ സമാനമായ ഊർജങ്ങളുടെ തുകയേക്കാൾ കുറവായിരിക്കും. ഓക്സിജൻ ന്യൂക്ലിയസ് 8 പ്രോട്ടോണുകളും 8 ന്യൂട്രോണുകളുമായി വിഭജിക്കണമെങ്കിൽ ഈ അധിക ഊർജം $\Delta M c^2$ നൽകേണ്ടിവരും. ആവശ്യമായി വരുന്ന ഈ ഊർജം E_b മാസ് ന്യൂനതയുമായി ബന്ധിപ്പിച്ചാൽ,

$$E_b = \Delta M c^2 \tag{13.8}$$

ഉദാഹരണം 13.3: ഒരു ആറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റിന് സമാനമായ ഊർജം ജൂളിലും MeV യിലും കണക്കാക്കുക. ഇത് ഉപയോഗിച്ച് $^{16}_{8}O$ ന്റെ മാസ് ന്യൂനത MeV/c^2 ൽ പ്രസ്താവിക്കുക.

ഉത്തരം:

$$1u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

ഇതിനെ ഊർജത്തിന്റെ യൂണിറ്റിലേക്ക് മാറ്റാൻ, അതിനെ c^2 കൊണ്ട് ഗുണിക്കുന്നു.

തത്തുല്യ ഊർജം $= 1.6605 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$

$$= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$= \frac{1.4924 \times 10^{-10}}{1.602 \times 10^{-19}} \text{eV}$$

$$= 0.9315 \times 10^9 \text{ eV}$$

$$= 931.5 \text{ MeV}$$

$$1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

അഥവാ, $1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$

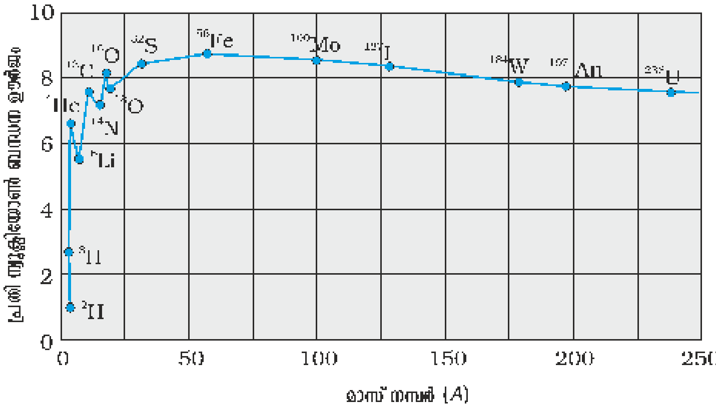
$^{16}_{8}O$ ന്, $\Delta M = 0.13691 \text{ u} = 0.13691 \times 931.5 \text{ MeV}/c^2$

$$= 127.5 \text{ MeV}/c^2$$

$^{16}_{8}O$ നെ അതിന്റെ ഘടകങ്ങളാക്കി വേർതിരിക്കാൻ ആവശ്യമായ ഊർജം $127.5 \text{ MeV}/c^2$.

നിശ്ചിത ചാർജും മാസുമുള്ള ഒരു ന്യൂക്ലിയസ്സായി രൂപപ്പെടുന്നതിന് നിശ്ചിത എണ്ണം ന്യൂട്രോണുകളെയും പ്രോട്ടോണുകളെയും ഒരുമിച്ചു ചേർത്തിട്ടുണ്ടെങ്കിൽ, നിശ്ചിത ഊർജം E_b ഈ പ്രക്രിയയിൽ നഷ്ടപ്പെട്ടിട്ടുണ്ടാകും. ഈ ഊർജം ന്യൂക്ലിയാർ കണങ്ങളെ ഒരുമിച്ചു നിർത്തുവാൻ ഉപയോഗിക്കുന്നതിനാൽ E_bയെ ആ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ബന്ധന ഊർജം (Binding Energy) എന്ന് പറയുന്നു. ഒരു ന്യൂക്ലിയസിനെ അതിന്റെ ന്യൂക്ലിയോണുകളായി വേർതിരിക്കാൻ, ആ കണികകൾക്ക് E_bയ്ക്ക് തുല്യമായ ഊർജം നൽകണം. ഈ രീതിയിൽ ഒരു ന്യൂക്ലിയസിനെ അതിന്റെ ഘടകങ്ങളായി വേർപെടുത്താൻ കഴിയില്ലെങ്കിലും, എത്രമാത്രം ഒരു ന്യൂക്ലിയസിന് ദൃഢതയുണ്ട് എന്നതിന്റെ യുക്തമായ അളവാണ് ന്യൂക്ലിയാർ ബന്ധന ഊർജം. ന്യൂക്ലിയസിലെ ഘടകങ്ങൾ തമ്മിലുള്ള ബന്ധനത്തിന്റെ കൂടുതൽ ഫലപ്രദമായ അളവുകോലാണ് പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം (binding energy per nucleon, E_{bn}). അത് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ബന്ധന ഊർജവും ന്യൂക്ലിയോണുകളുടെ എണ്ണം A യും തമ്മിലുള്ള അനുപാതമാണ്.

$$E_{bn} = E_b / A \tag{13.9}$$



ചിത്രം 13.1

ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്ന് ന്യൂക്ലിയോണുകളെ വേർതിരിക്കുന്നതിനാവശ്യമായ ശരാശരി ഊർജം എന്ന നിലയിലാണ് പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം പ്രസക്തമാകുന്നത്.

പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജവും (E_{bn}) വിവിധ ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ മാസ് നമ്പറും (A) തമ്മിലുള്ള ഗ്രാഫാണ് ചിത്രം 13.1. ഈ ഗ്രാഫിന്റെ പ്രധാന സവിശേഷതകളായി നമുക്കു കാണാനാവുന്നത് ഇവയാണ്.

(i) ഇടത്തരം മാസ് നമ്പറുള്ള ($30 < A < 170$) ന്യൂക്ലിയസ്സുകൾക്ക് പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം (E_{bn}) പ്രായോഗികമായി സ്ഥിരമായ ഒന്നാണ്, അതായത് E_{bn} ആറ്റോമിക സംഖ്യയെ ആശ്രയിക്കുന്നില്ല.

$A = 56$ നാണ് ഗ്രാഫിന്റെ പരമാവധി മൂല്യം (ഏകദേശം 8.75 MeV) ലഭിക്കുന്നത്. $A = 238$ നുള്ള മൂല്യം 7.6 MeV യാണ്.

(ii) ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും ($A<30$) ഭാരം കൂടിയ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും ($A>170$) E_{bn} കുറവാണ്.

ഈ രണ്ട് നിരീക്ഷണങ്ങളിൽ നിന്നും നമുക്ക് ചില നിഗമനങ്ങളിലെത്തിച്ചേരാൻ കഴിയും:

(i) പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം ഏതാനും MeV ലഭിക്കത്തക്കവിധം ബലം ആകർഷണസ്വഭാവമുള്ളതും ശക്തവുമാണ്.

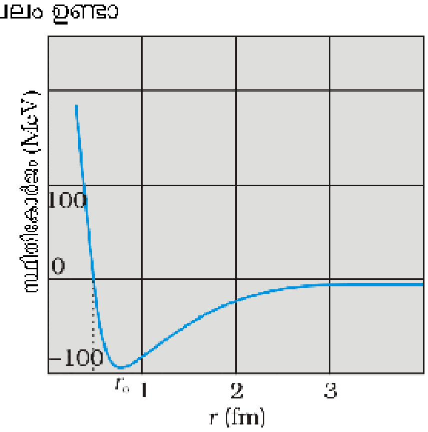
(ii) $30<A<170$ എന്ന പരിധിയിൽ ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ സ്ഥിരത ന്യൂക്ലിയാർ ബലം ഹ്രസ്വദൂര സ്വഭാവമുള്ളതാണെന്നതിന്റെ അനന്തരഫലമാണ്. സാമാന്യം വലുപ്പമുള്ള ഒരു ന്യൂക്ലിയസിലെ ഒരു പ്രത്യേക ന്യൂക്ലിയോണിനെ പരിഗണിക്കുക. അത് ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന്റെ പരിധിയിൽ അതിനു ചുറ്റുമുള്ള ചില ന്യൂക്ലിയോണുകളുടെ സ്വാധീനത്തിലായിരിക്കും. ഈ ദൂരപരിധിക്കപ്പുറത്തുള്ള ഏതെങ്കിലും ന്യൂക്ലിയോണിന് നമ്മൾ പരിഗണിക്കുന്ന ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിന്മേൽ യാതൊരുവിധ സ്വാധീനവും ഉണ്ടാവുകയുമില്ല. ഒരു ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന്റെ പരിധിയിൽ പരമാവധി p ന്യൂക്ലിയോണുകൾ ഉണ്ടെങ്കിൽ, അതിന്റെ ബന്ധന ഊർജം p യ്ക്ക് ആനുപാതികമായിരിക്കും. ഈ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ബന്ധന ഊർജം pk ആണെന്നിരിക്കട്ടെ, ഇതിൽ k എന്നത് ഊർജത്തിന്റെ ഡയമെൻഷൻ ഉള്ള സ്ഥിരസംഖ്യ ആണ്. ന്യൂക്ലിയോണുകളെ കൂട്ടിച്ചേർത്ത് നമ്മൾ A വർധിപ്പിക്കുകയാണെങ്കിൽ, അവ ഉള്ളിലുള്ള പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിന് മാറ്റം വരുത്തുന്നില്ല. ഒരു വലിയ ന്യൂക്ലിയസിലെ ഏതാണ്ട് എല്ലാ ന്യൂക്ലിയോണുകളും അതിന്റെ ഉൾഭാഗത്തായതിനാൽ, പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിലെ മാറ്റം കുറവായിരിക്കും. പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം ഒരു സ്ഥിരസംഖ്യയായിരിക്കും, ഏകദേശം pk യ്ക്ക് തുല്യവും. നമ്മൾ പരിഗണിക്കുന്ന ന്യൂക്ലിയോൺ അതിന്റെ സമീപമുള്ള ന്യൂക്ലിയോണുകളാൽ മാത്രം സ്വാധീനിക്കപ്പെടുന്നു, ഇതിനെ ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന്റെ സാച്ചുറേഷൻ സ്വഭാവം (saturation propetry of the nuclear force) എന്നറിയപ്പെടുന്നു.

(iii) വളരെ ഭാരമുള്ള ഒരു ന്യൂക്ലിയസിന്റെ, ഉദാഹരണമായി A = 240, പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം A = 120 ഉള്ള ന്യൂക്ലിയസുമായി താരതമ്യപ്പെടുത്തിയാൽ വളരെ കുറവാണ്. അതായത് A = 240 ആയ ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് A = 120 ആയ രണ്ട് ന്യൂക്ലിയസുകളായി മാറുന്നുണ്ടെങ്കിൽ, അതിലെ ന്യൂക്ലിയോണുകൾ കൂടുതൽ ദൃഢമായി ബന്ധിക്കപ്പെടുന്നുവെന്നിത് സൂചിപ്പിക്കുന്നു. ഈ പ്രക്രിയയിൽ ഊർജം പുറത്തുവിടുന്നുവെന്നാണ് ഇത് കാണിക്കുന്നത്. ഭാഗം 13.7.1 ൽ നാം ചർച്ച ചെയ്യാനിരിക്കുന്ന ന്യൂക്ലിയാർ ഫിഷനിലെ ഊർജ ഉൽപാദന പ്രക്രിയയിൽ ഇതിന് വലിയ സ്വാധീനമാണുള്ളത്.

(iv) രണ്ടു ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾ (A < 10) കൂടിച്ചേർന്ന് കൂടുതൽ ഭാരമുള്ള ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് രൂപം കൊള്ളുന്നത് പരിഗണിക്കുക. അങ്ങനെ ലഭിക്കുന്ന ഭാരമേറിയ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ പ്രതി ന്യൂക്ലിയോൺ ബന്ധന ഊർജം ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകളുടേതിനേക്കാൾ കൂടുതലായിരിക്കും. അവസാനത്തെ ഘടന ആദ്യത്തേതിനേക്കാൾ കൂടുതൽ ദൃഢമായ ബന്ധനത്തിലാണെന്നാണിതർഥമാക്കുന്നത്. ഇത്തരം ഫ്യൂഷൻ (Fusion) പ്രവർത്തനങ്ങളിലും ഊർജം പുറത്തുവിടുന്നു. 13.7.3 ൽ നാം ചർച്ച ചെയ്യാനിരിക്കുന്ന സൂര്യന്റെ ഊർജ ഉറവിടമിതാണ്.

13.5 ന്യൂക്ലിയാർ ബലം (Nuclear Force)

നമുക്ക് സുപരിചിതമായ കൂളോം ബലമാണ് (Coulomb Force) ആറ്റോമിക ഇലക്ട്രോണുകളുടെ ചലനത്തെ നിർണയിക്കുന്നത്. ശരാശരി മാസുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകൾക്ക് പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം ഏകദേശം 8 MeV ആണെന്ന് സെക്ഷൻ 13.4 ൽ നമ്മൾ കണ്ടിട്ടുണ്ട്, അത് ആറ്റങ്ങളിലെ ബന്ധന ഊർജത്തെക്കാൾ വളരെ കൂടുതലുമാണ്. അതിനാൽ, ഒരു ന്യൂക്ലിയസിനെ ബന്ധിപ്പിക്കുന്നതിന് തികച്ചും വ്യത്യസ്തമായ തരത്തിലുള്ള ശക്തമായ ആകർഷണബലം ഉണ്ടായിരിക്കണം. പ്രോട്ടോണുകൾ (പോസിറ്റീവ് ചാർജുള്ള) തമ്മിലുള്ള വികർഷണബലത്തെ മറികടക്കുന്ന തരത്തിലും, പ്രോട്ടോണുകളെയും ന്യൂട്രോണുകളെയും വളരെ ചെറിയ ന്യൂക്ലിയാർ ഉള്ളളവിൽ കൂട്ടിച്ചേർത്തു നിർത്താൻ തക്കവിധവും ശക്തമായിരിക്കണമിത്. പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ സ്ഥിരത അതിന്റെ ഹ്രസ്വദൂര പരിധി ഉപയോഗിച്ച് മനസ്സിലാക്കാനാകുമെന്ന് ഇതിനകം നാം കണ്ടു കഴിഞ്ഞു. ന്യൂക്ലിയാർ ബന്ധന ബലത്തിന്റെ നിരവധി സവിശേഷതകൾ ചുവടെ സംഗ്രഹിച്ചിരിക്കുന്നു. 1930 മുതൽ 1950 വരെ നടത്തപ്പെട്ട വ്യത്യസ്തങ്ങളായ പരീക്ഷണങ്ങളിലൂടെ ലഭിച്ചവയാണിവ.



ചിത്രം 13.2: ഒരു ജോഡി ന്യൂക്ലിയോണുകളുടെ സ്ഥിതികോർജം ന്യൂക്ലിയോണുകൾ തമ്മിലുള്ള അകൽച്ചയുടെ ഫലനമായി കാണിച്ചിരിക്കുന്നു. അകൽച്ച r_0 നേക്കാൾ കൂടുമ്പോൾ ന്യൂക്ലിയോണുകൾക്കിടയിൽ ആകർഷണബലവും, 'r_0' നേക്കാൾ കുറയുമ്പോൾ ശക്തമായ വികർഷണ ബലവും ആയിരിക്കും.

(i) ചാർജുകൾ തമ്മിലുള്ള കൂളോം ബലം, മാസുകൾ തമ്മിലുള്ള ഗുരുത്വബലം എന്നിവയേക്കാൾ വളരെയേറെ ശക്തമാണ് ന്യൂക്ലിയാർ ബലം. ന്യൂക്ലിയസിലെ പ്രോട്ടോണുകൾ തമ്മിലുള്ള കൂളോം വികർഷണ ബലത്തിൻമേൽ ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന് ആധിപത്യം ഉണ്ടാവേണ്ടതുണ്ട്. ന്യൂക്ലിയാർ ബലം കൂളോം ബലത്തേക്കാൾ വളരെ ശക്തമാണെങ്കിൽ മാത്രമേ ഇതു സംഭവിക്കുകയുള്ളു. ഗുരുത്വബലം കൂളോം ബലത്തെക്കാൾ വളരെ ശക്തി കുറഞ്ഞതാണ്.

(ii) രണ്ട് ന്യൂക്ലിയോണുകൾ തമ്മിലുള്ള അകലം ഏതാനും ഫെംറ്റോമീറ്ററുകളേക്കാൾ (femtometres) അധികമാകുമ്പോൾ അവ തമ്മിലുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ബലം

പെട്ടെന്ന് പൂജ്യമായി കുറയുന്നു. ഇത് ഒരു ഇടത്തരമോ നല്ല വലുപ്പത്തിലുള്ളതോ ആയ ന്യൂക്ലിയസിൽ ബലത്തിന്റെ പൂരിതാവസ്ഥയിലേക്ക് നയിക്കുന്നു. ഇത് പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ സ്ഥിരതയ്ക്ക് കാരണമാകുന്നു.

രണ്ട് ന്യൂക്ലിയോണുകളുടെ സ്ഥിതികോർജത്തിന്റെ ഏകദേശ ഗ്രാഫ് അവയുടെ അകലത്തിന്റെ ഒരു ഫലനമായി ചിത്രം 13.2 ൽ കാണിച്ചിരിക്കുന്നു. അകലം r_0 ഏതാണ്ട് 0.8 fm യിൽ സ്ഥിതികോർജം ഏറ്റവും കുറവാണ്. 0.8 fm ൽ കൂടുതലാണ് അകലമെങ്കിൽ ന്യൂക്ലിയാർ ബലം ആകർഷണസ്വഭാവമുള്ളതും 0.8 fm ൽ കുറവാണകലമെങ്കിൽ വികർഷണവുമാണ് എന്നാണ് ഇതിനർത്ഥം.

(iii) ന്യൂട്രോൺ-ന്യൂട്രോൺ, പ്രോട്ടോൺ-ന്യൂട്രോൺ, പ്രോട്ടോൺ-പ്രോട്ടോൺ എന്നിവ തമ്മിലുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ബലം ഏതാണ്ട് ഒരുപോലെയാണ്. ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന് ഇലക്ട്രിക് ചാർജുമായി ബന്ധമില്ല.

കൂളോം നിയമം പോലെയോ ന്യൂട്ടന്റെ ഗുരുത്വാകർഷണനിയമം പോലെയോ ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിന് ലളിതമായ ഗണിതരൂപമില്ല.

13.6 റേഡിയോആക്റ്റിവിറ്റി (RADIOACTIVITY)

എ.എച്ച്. ബെക്വറൽ 1896 ൽ ആകസ്മികമായി റേഡിയോആക്റ്റിവിറ്റി കണ്ടുപിടിച്ചു. ദൃശ്യപ്രകാശം പതിപ്പിക്കുമ്പോഴുള്ള സംയുക്തങ്ങളുടെ ഫ്ളൂറസെൻസും ഫോസ്ഫോറസെൻസും (fluorescence and phosphorescence) പഠിക്കുമ്പോൾ, ബെക്വറൽ രസകരമായ ഒരു പ്രതിഭാസം നിരീക്ഷിച്ചു. ഏതാനും യുറേനിയം-പൊട്ടാസ്യം സൾഫേറ്റ് കഷണങ്ങളിൽ ദൃശ്യപ്രകാശം പതിപ്പിച്ചതിനു ശേഷം, അവയെ കറുത്ത കടലാസിൽ പൊതിയുകയും ഒരു സിൽവർ പ്ലേറ്റു കൊണ്ട് ഈ പൊതിയെ ഫോട്ടോഗ്രാഫി പ്ലേറ്റിൽ നിന്ന് വേർതിരിക്കുകയും ചെയ്തു. ഏതാനും മണിക്കൂറുകൾക്കു ശേഷമുള്ള പരിശോധനയിൽ, ഫോട്ടോഗ്രാഫി പ്ലേറ്റിൽ പ്രതിബിംബം രൂപം കൊണ്ടതായി കാണപ്പെട്ടു. കറുത്ത കടലാസിലും സിൽവർ പ്ലേറ്റിലും തുളച്ചുകയറാൻ സാധിക്കുന്ന എന്തോ ഒന്ന് ആ സംയുക്തം പുറപ്പെടുവിച്ചതായിരിക്കണം അതിനു കാരണമെന്ന് അദ്ദേഹം അനുമാനിച്ചു. ഒരു അസ്ഥിര ന്യൂക്ലിയസ് ശോഷണത്തിനു (decay) വിധേയമാകുന്ന ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിഭാസമാണ് റേഡിയോആക്റ്റിവിറ്റി എന്ന് തുടർന്ന് നടത്തിയ പരീക്ഷണങ്ങൾ തെളിയിച്ചു. റേഡിയോആക്റ്റീവ് ശോഷണം സ്വാഭാവികമായി സംഭവിക്കുന്നത് മൂന്ന് തരത്തിലാണ്.

(i) α– ശോഷണം (Alpha Decay): ഇതിൽ ഹീലിയം (^4_2He) ന്യൂക്ലിയസ് ഉത്സർജിക്കപ്പെടുന്നു.

(ii) β- ശോഷണം (Beta Decay): ഇതിൽ ഇലക്ട്രോണിനെയോ പോസിട്രോണിനെയോ (ഇലക്ട്രോണിന്റെ അതേ മാസും, എന്നാൽ അതിനു നേരെ വിപരീതമായ ചാർജുമുള്ളത്) പുറത്തുവിടുന്നു.

(iii) γ- ശോഷണം (Gamma Decay): ഇതിൽ ഉന്നത ഊർജമുള്ള (നൂറുകണക്കിന് keV ഓ അതിൽ കൂടുതലോ) ഫോട്ടോണുകളെ പുറപ്പെടുവിക്കുന്നു.

തുടർന്നുള്ള ഭാഗങ്ങളിൽ മേൽ പറഞ്ഞ ഓരോ ശോഷണവും പരിഗണിക്കാം.

13.6.1 റേഡിയോ ആക്റ്റിവ് ശോഷണ നിയമം (Law of radioactive decay)

α, β അല്ലെങ്കിൽ γ ശോഷണത്തിന് വിധേയമായ ഏതെങ്കിലും റേഡിയോ ആക്ടീവ് സാമ്പിളിൽ, യൂണിറ്റ് സമയത്തിൽ ശോഷണം സംഭവിക്കുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ

എണ്ണം സാമ്പിളിലുള്ള ആകെ ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണത്തിന് ആനുപാതികമാണെന്ന് കണ്ടെത്തിയിട്ടുണ്ട്. N എന്നത് സാമ്പിളിലുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണവും ΔN എന്നത് Δt സമയത്ത് ശോഷണത്തിന് വിധേയമായവയുടെ എണ്ണവുമാണെങ്കിൽ,

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

അഥവാ, $\Delta N/\Delta t = \lambda N$, (13.10)

ഇതിൽ, λ യെ റേഡിയോആക്റ്റീവ് ശോഷണ സ്ഥിരാങ്കം (radioactive decay constant or disintegration constant) എന്നു പറയുന്നു. Δt സമയത്തുള്ള സാമ്പിളിലെ * ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണത്തിലെ വ്യത്യാസം $dN = -\Delta N$. അതുകൊണ്ട് N ന്റെ മാറ്റത്തിന്റെ നിരക്ക് ($\Delta t \to 0$ എന്ന പരിധിയിൽ)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

അഥവാ, $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$

സമവാക്യത്തിന്റെ ഇരുവശവും സമാകലനം (integrate) ചെയ്താൽ, നമുക്കു ലഭിക്കുക

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^{t} dt \tag{13.11}$$

അഥവാ, $\ln N - \ln N_0 = -\lambda (t - t_0)$ (13.12)

ഇവിടെ, N_0 എന്നത് t_0 സമയത്ത് സാമ്പിളിൽ ഉണ്ടായ റേഡിയോആക്റ്റീവ് ന്യൂക്ലിയസുകളും, N എന്നത് കുറച്ച് കഴിഞ്ഞ് t സമയത്ത് ഉള്ള റേഡിയോആക്റ്റീവ് ന്യൂക്ലിയസുകളുമാണ്. സമവാക്യം (13.2)ൽ $t_0 = 0$ കൊടുത്ത് പുനഃക്രമീകരിച്ചാൽ ലഭിക്കുന്നത്,

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \tag{13.13}$$

ഈ സമവാക്യത്തെ

$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ എന്നെഴുതാം. (13.14)

ഇങ്ങനെയുള്ള ശോഷണത്തിനുദാഹരണമായി പരിഗണിക്കുന്നത് പ്രകാശ സ്രോതസുകളായി ഉപയോഗിക്കുന്ന ബൾബുകളാണെങ്കിൽ അവ ഇത്തരത്തിലുള്ള എക്സ്പൊണൻഷ്യൽ ശോഷണ നിയമങ്ങളൊന്നും അനുസരിക്കുന്നില്ലായെന്നു കാണുവാൻ കഴിയും. 1000 ബൾബുകൾ അവയുടെ ആയുസ് കണ്ടെത്താൻ പരിശോധിക്കുമ്പോൾ (അവയ്ക്ക് കത്തിത്തീരുവാനോ അല്ലെങ്കിൽ ഫ്യൂസാകുവാനോ ഉള്ള സമയം), അവ ഏതാണ്ട് ഒരേ സമയം കൊണ്ട് ശോഷണം ചെയ്യപ്പെടുന്നു (അതായത്, കത്തിത്തീരുന്നു) എന്ന് നമുക്ക് അറിയാം. അതേസമയം റേഡിയോആക്റ്റീവ് ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ ശോഷണം തികച്ചും വ്യത്യസ്തമായ ഒരു നിയമത്തിനനുസൃതമായാണ്. സമവാക്യം (13.14) പ്രതിനിധാനം ചെയ്യുന്ന റേഡിയോആക്ടീവ് ശോഷണ നിയമമാണിത്.

N നു പകരം ശോഷണ നിരക്കായ R പരിഗണിക്കാവുന്നതാണ്. R (= –dN/dt) എന്നത് യൂണിറ്റ് സമയത്തിൽ ശോഷണം ചെയ്യപ്പെടുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ

* ΔN എന്നത് ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളാണ്, അതുകൊണ്ട് എല്ലായ്പ്പോഴും പോസിറ്റീവാണ്. dN എന്നത് N ലെ മാറ്റമാണ്. അത് ഏത് ചിഹ്നവുമുള്ളതാവാം. ഇവിടെ അത് നെഗറ്റീവാണ്, കാരണം യഥാർത്ഥ ന്യൂക്ലിയസുകളിൽ നിന്ന് ΔN ശോഷണം സംഭവിച്ചാൽ, (N−ΔN) ന്യൂക്ലിയസുകൾ അവശേഷിക്കുന്നു.

എണ്ണം നൽകുന്നു. λN ന്യൂക്ലിയോണുകൾ dt സമയം ഇടവേളയിൽ ശോഷണത്തിനു വിധേയമായെന്നു കരുതുക. അപ്പോൾ dN = - λN. അതുകൊണ്ട് ഇവിടെ ശോഷണ നിരക്ക് R എന്നത്

$$R = -\frac{dN}{dt}$$

സമവാക്യം (13.14) നെ അവകലനം (differentiation) ചെയ്താൽ

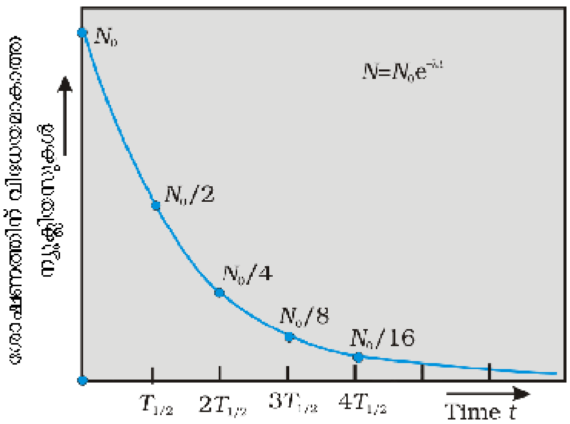
$$R = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

അഥവാ, $R = R_0 e^{-\lambda t}$ (13.15)

ഇത് റേഡിയോആക്റ്റീവ് ശോഷണ നിയമത്തിന്റെ [സമവാക്യം (13.14)] മറ്റൊരു രൂപമാണ്. R_0 എന്നത് $t = 0$ സമയത്തുള്ള റേഡിയോആക്റ്റീവ് ശോഷണ നിരക്കാണ്, R എന്നത് t സമയത്തിനു ശേഷമുള്ളതും. സമവാക്യം (13.10), ശോഷണനിരക്ക് R ന്റെ പദങ്ങളിൽ എഴുതാം

$$R = \lambda N \qquad (13.16)$$

ഒരു സാമ്പിളിലെ റേഡിയോആക്ടീവ് ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണത്തേക്കാൾ അതിന്റെ റേഡിയോആക്ടീവ് ശോഷണ നിരക്കാണ് കണക്കാക്കുവാനെളുപ്പം. ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ ശോഷണ നിരക്ക് Rനെ ആക്റ്റിവിറ്റി (Activtiy) എന്നു വിളിക്കുന്നു. ആക്റ്റിവിറ്റിയുടെ SI യൂണിറ്റ് ബെക്വറൽ ആണ് (റേഡിയോ ആക്റ്റിവിറ്റി കണ്ടെത്തിയ ഹെൻറി ബെക്വറലിന്റെ ബഹുമാനാർഥമാണ് യൂണിറ്റിന് ഈ പേര് നൽകിയത്).



ചിത്രം 13.3: ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് പദാർഥത്തിന്റെ എക്സ്പോണൽഷ്യൽ ശോഷണം $T_{1/2}$ സമയത്തിനു ശേഷം പദാർഥ കണികകളുടെ എണ്ണം പകുതിയായി കുറയുന്നു.

അതിനെ നിർവചിച്ചിരിക്കുന്നത്,

1 ബെക്വറൽ = 1Bq = 1 ശോഷണം പ്രതി സെക്കന്റ്

സാധാരണയായി ഉപയോഗിച്ചുകൊണ്ടിരിക്കുന്നതും പഴയതുമായ ഒരു യൂണിറ്റാണ് ക്യൂറി:

1 ക്യൂറി = 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq (ശോഷണം പ്രതി സെക്കന്റ്)

റേഡിയോ ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ ശോഷണ നിരക്ക് വ്യത്യസ്തങ്ങളായിരിക്കും. റേഡിയോ ന്യൂക്ലൈഡിന്റെ അർധായുസ്സ് (Half life - $T_{1/2}$) എന്ന സവിശേഷതയാണ്, ഈ വ്യത്യസ്തതയെ സൂചിപ്പിക്കുന്നതിനായി പൊതുവേ ഉപയോഗിക്കുന്നത്. അർധായുസ്സെന്നത് ഒരു റേഡിയോ ആക്റ്റീവ് പദാർഥത്തിലെ ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ എണ്ണം തുടക്കത്തിലുള്ള ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ എണ്ണത്തിന്റെ പകുതിയായി ശോഷണം വഴി കുറയാനുള്ള സമയമാണ്. തുടക്കത്തിൽ റേഡിയോ ആക്ടീവ് സാമ്പിളിന്റെ N_0 ന്യൂക്ലിയസ്സുകളുണ്ടായിരുന്നുവെന്നിരിക്കട്ടെ. $T_{1/2}$ സമയം കഴിയുമ്പോഴേക്കും ഇത് $N_0/2$ ആയി കുറഞ്ഞിട്ടുണ്ടാവും. $N = N_0/2$ എന്നും $t = T_{1/2}$ എന്നും സമവാക്യം (13.14) ൽ ആരോപിക്കുമ്പോൾ

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \text{ എന്നു ലഭിക്കും} \qquad (13.17)$$

$T_{1/2}$ സമയം കൊണ്ട് N_0, $N_0/2$ ആയി കുറഞ്ഞാൽ സമവാക്യം (13.16) പ്രകാരം ഇതേ സമയം കൊണ്ട് R_0 യുടെ വില അതിന്റെ പകുതിയായി കുറഞ്ഞിരിക്കും. ഈ പ്രതിഭാസവുമായി ബന്ധപ്പെട്ടു വരുന്ന മറ്റൊരു പ്രധാനപ്പെട്ട അളവാണ് ശരാശരി ആയുസ്സ് (*average* or *mean life* τ). ശരാശരി ആയുസ്സ് τ, സമവാക്യം

(13.14) ൽ നിന്നും ലഭിക്കും. t മുതൽ $t + \Delta t$ വരെയുള്ള ഇടവേളകളിൽ ശോഷണത്തിനു വിധേയമാകുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണം $R(t)\Delta t$ $(= \lambda N_0 e^{-\lambda t}\Delta t)$ ആണ്. ഈ ന്യൂക്ലിയസുകളിൽ ഓരോന്നും t സമയം നിലനിന്നിട്ടുണ്ട്. അതിനാൽ, എല്ലാ ന്യൂക്ലിയസുകളുടെയും ആകെ ആയുസ് $t\, \lambda N_0 e^{-\lambda t}\, \Delta t$ ആയിരിക്കും. ഇവയിൽ ചില ന്യൂക്ലിയസുകൾക്ക് ചുരുങ്ങിയ ആയുർദൈർഘ്യവും മറ്റുള്ളവയ്ക്ക് കൂടുതൽ ആയുർദൈർഘ്യവുമുണ്ടായിരിക്കുമെന്നത് വ്യക്തമാണ്. അതുകൊണ്ടു തന്നെ ശരാശരി ആയുസ് ലഭിക്കുന്നതിന്, സമയം 0 മുതൽ ∞ വരെ ഈ സമവാക്യത്തെ സമാകലനം ചെയ്യുകയും, ഒപ്പം $t = 0$ യിലെ മൊത്തം ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണം കൊണ്ട് ഹരിക്കുകയും ചെയ്യേണ്ടതുണ്ട്. അങ്ങനെ,

$$\tau = \frac{\lambda N_0 \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt}{N_0} = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt$$

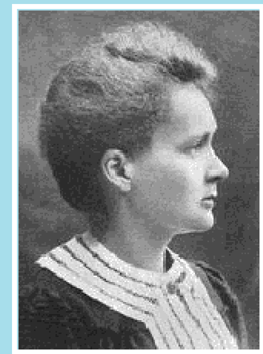
ഈ സമാകലനത്തിലൂടെ $\tau = 1/\lambda$ എന്നു ലഭിക്കും

ഈ ഫലങ്ങൾ ഇങ്ങനെ ചുരുക്കാം

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \qquad (13.18)$$

അല്പായുസ്സുള്ള റേഡിയോആക്ടീവ് മൂലകങ്ങളുടെ (പ്ലൂട്ടോണിയം. ട്രീഷിയം മുതലായവ) അർധായുസ്സ് പ്രപഞ്ചത്തിന്റെ പ്രായവുമായി (~15 ബില്ല്യൺ വർഷങ്ങൾ) താരതമ്യം ചെയ്യുമ്പോൾ വളരെ ചെറുതായതിനാൽ കുറച്ചു കാലം കൊണ്ടു തന്നെ അവയ്ക്ക് ശോഷണം സംഭവിച്ചിട്ടുണ്ടാവും. അതിനാൽ അവയെ പ്രപഞ്ചത്തിൽ നിരീക്ഷണ യോഗ്യമായ അളവിൽ കണ്ടെത്തുവാൻ കഴിയില്ല. എന്നാൽ, ലബോറട്ടറികളിൽ നടത്തിയ ന്യൂക്ലിയാർ പരീക്ഷണങ്ങളിൽ അവയെ കണ്ടെത്തുവാൻ കഴിഞ്ഞിട്ടുണ്ട്. ട്രിഷിയവും പ്ലൂട്ടോണിയവും ഈ വിഭാഗത്തിൽപ്പെടുന്നവയാണ്.

മേരി സ്ക്ലൊഡോവ്സ്ക ക്യൂറി (1867-1934)



മേരി സ്ക്ലൊഡോവ്സ്ക ക്യൂറി
[Marie Sklodowska Curie (1867-1934)]

പോളണ്ടിൽ ജനനം. ഫിസിക്സിലും കെമിസ്ട്രിയിലും ഒരുപോലെ വ്യക്തിമുദ്ര പതിപ്പിച്ചയാൾ. 1896ൽ ഹെൻറി ബെക്വറൽ റേഡിയോആക്റ്റിവിറ്റി കണ്ടെത്തിയത് മേരിയുടെയും ഭർത്താവ് പിയറി ക്യൂറിയുടെയും ഗവേഷണപ്രവർത്തനങ്ങൾക്ക് വലിയ പ്രചോദനമായിത്തീരുകയും ഇത് റേഡിയം, പൊളോണിയം എന്നീ മൂലകങ്ങൾ വേർതിരിക്കുന്നതിലേക്ക് നയിക്കുകയും ചെയ്തു. രണ്ട് നൊബേൽ സമ്മാനങ്ങൾ നല്കി ആദരിക്കപ്പെട്ട ആദ്യ വ്യക്തിയും ഇവർ തന്നെയാണ് 1903 ൽ ഫിസിക്സിനും 1911 ൽ കെമിസ്ട്രിയ്ക്കും.

ഉദാഹരണം 13.4

ഉദാഹരണം 13. 4: α-ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകുന്ന $^{238}_{92}U$ ന്റെ അർധായുസ്സ് 4.5×10^9 വർഷങ്ങളാണ്. 1g $^{238}_{92}U$ ന്റെ ആക്റ്റിവിറ്റി എന്ത്?

ഉത്തരം:

$$T_{1/2} = 4.5 \times 10^9 \text{ y}$$
$$= 4.5 \times 10^9 \text{ y} \times 3.16 \times 10^7 \text{ s/y}$$
$$= 1.42 \times 10^{17} \text{ s}$$

ഏത് ഐസോടോപ്പിന്റെയും 1 ഗ്രാം മോളിൽ അവോഗാഡ്രോ സംഖ്യയുടെ അത്രയും എണ്ണം ആറ്റങ്ങളുണ്ടായിരിക്കും.

അതിനാൽ, 1g $^{238}_{92}U$ ൽ ഉണ്ടാവുക,

$$\frac{1}{238 \times 10^{-3}} \text{ kmol} \times 6.025 \times 10^{26} \text{ ആറ്റങ്ങൾ/kmol}$$

$= 25.3 \times 10^{20}$ ആറ്റങ്ങൾ.

ശോഷണ നിരക്ക് R എന്നത് ചുവടെ കൊടുത്തിരിക്കുന്ന രീതിയിൽ എഴുതാം.

ഉദാഹരണം 13.4

$R = \lambda N$

$$= \frac{0.693}{T_{1/2}} N = \frac{0.693 \times 25.3 \times 10^{20}}{1.42 \times 10^{17}} s^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^4 \, s^{-1}$$

$$= 1.23 \times 10^4 \, Bq$$

ഉദാഹരണം 13.5

ഉദാഹരണം 13.5: 12.5 വർഷം അർധായുസുള്ള ട്രിഷിയം ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകുന്നുവെന്ന് കരുതുക. 25 വർഷത്തിനുശേഷം ട്രിഷിയത്തിന്റെ എത്ര ഭാഗം ശോഷണം സംഭവിക്കാതെ അവശേഷിക്കും?

ഉത്തരം: അർധായുസ്സിന്റെ നിർവചനമനുസരിച്ച്, 12.5 വർഷത്തിന് ശേഷം തുടക്കത്തിലുള്ളതിന്റെ പകുതി ശോഷണം സംഭവിക്കാതെ അവശേഷിക്കും. അടുത്ത 12.5 വർഷത്തിൽ അതിന്റെ പകുതി ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകും. അതിനാൽ, 25 വർഷത്തിനുശേഷം തുടക്കത്തിലുള്ളതിന്റെ നാലിലൊന്ന് ട്രിഷിയം ശോഷണം സംഭവിക്കാതെ അവശേഷിക്കും.

13.6.2 ആൽഫാ ശോഷണം (Alpha decay)

ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് ആൽഫാശോഷണത്തിനു വിധേയമാകുമ്പോൾ, അത് ആൽഫാ കണങ്ങളെ (ഹീലിയം ന്യൂക്ലിയസ്, ${}^4_2He$) ഉൽസർജിച്ചുകൊണ്ട് മറ്റൊരു ന്യൂക്ലിയസായി മാറുന്നു. ഉദാഹരണമായി, ഒരു ${}^{238}_{92}U$ ന്യൂക്ലിയസ് ആൽഫാശോഷണത്തിനു വിധേയമാകുമ്പോൾ, അത് ${}^{234}_{90}Th$ ന്യൂക്ലിയസായി മാറുന്നു.

$${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He \qquad (\alpha\text{-decay}) \qquad (13.19)$$

${}^4_2He$ രണ്ട് പ്രോട്ടോണുകളും രണ്ട് ന്യൂട്രോണുകളും ഉൾക്കൊള്ളുന്നതിനാൽ, ഈ പ്രക്രിയയിൽ, വ്യുൽപന്ന ന്യൂക്ലിയസിന്റെ (daughter nucleus) മാസ് നമ്പറും ആറ്റോമിക നമ്പറും യഥാക്രമം നാലും രണ്ടും കുറയുന്നു. അതിനാൽ ${}^A_ZX$ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ ആയുള്ള പരിവർത്തനം ഇങ്ങനെ ആവിഷ്കരിക്കാം.

$${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He \qquad (13.20)$$

ഇതിൽ ${}^A_ZX$ മാതൃ ന്യൂക്ലിയസും (parent nucleus) ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ വ്യുൽപന്ന ന്യൂക്ലിയസും (daughter nucleus) ആണ്.

${}^{238}_{92}U$ ന്റെ ആൽഫാ ശോഷണം നൈസർഗികമായി (ഒരു ബാഹ്യഊർജസ്രോതസ്സിന്റെ സഹായം ഇല്ലാതെ) സംഭവിക്കുന്നതാണ്, കാരണം ശോഷണ ഉല്പന്നങ്ങളായ ${}^{234}_{90}Th$, ${}^4_2He$ എന്നിവയുടെ മാസ് ${}^{238}_{92}U$ ന്റേതിനേക്കാൾ കുറവാണ്. അതിനാൽ ശോഷണ ഉൽപന്നങ്ങളുടെ ആകെ മാസ്ഊർജം ആദ്യ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് ഊർജത്തെക്കാൾ കുറവാണ്. ആദ്യ മാസ്ഊർജവും ശോഷണ വസ്തുക്കളുടെ അന്തിമ മാസ്ഊർജവും തമ്മിലുള്ള വ്യത്യാസത്തെ പ്രക്രിയയുടെ Q മൂല്യം (Q value) അല്ലെങ്കിൽ ശിഥിലീകരണ ഊർജം (disintegration energy) എന്ന് വിളിക്കുന്നു. ഇങ്ങനെ, ഒരു ആൽഫാ കണത്തിന്റെ Q മൂല്യം കണ്ടെത്തുന്നത് താഴെപറയും പ്രകാരമാണ്,

$$Q = (m_X - m_Y - m_{He}) c^2 \qquad (13.21)$$

ഈ ഊർജം വ്യുൽപന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളും ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ ആൽഫാകണവും ${}^A_ZX$ അവയുടെ ഗതികോർജത്തിന്റെ രൂപത്തിൽ പങ്കുവെയ്ക്കുന്നു. ആൽഫാ ശോഷണം സമവാക്യങ്ങൾ (13.14), (13.15) എന്നിവ നൽകുന്ന റേഡിയോ ആക്റ്റീവ് നിയമങ്ങൾ അനുസരിക്കുന്നു.

ഉദാഹരണം 13.6: താഴെ കൊടുത്ത ആറ്റോമിക മാസുകൾ ശ്രദ്ധിക്കുക.

$^{238}_{92}U = 238.05079\,u \qquad ^{4}_{2}He = 4.00260\,u$

$^{234}_{90}Th = 234.04363\,u \qquad ^{1}_{1}H = 1.00783\,u$

$^{237}_{91}Pa = 237.05121\,u$

Pa എന്ന പ്രതീകം പ്രൊട്ടക്റ്റിനിയം $(Z = 91)$ എന്ന മൂലകത്തെ പ്രതിനിധീകരിക്കുന്നു.

(a) $^{238}_{92}U$ യുടെ ന്യൂക്ലിയസ് ആൽഫാ ശോഷണത്തിനിടയിൽ പുറത്തുവിടുന്ന ഊർജം എത്ര?

(b) $^{238}_{92}U$ ന് ആകസ്മികമായി പ്രോട്ടോൺ ഉൽസർജനം സാധ്യമല്ലെന്ന് തെളിയിക്കുക.

ഉത്തരം:

(a) സമവാക്യം (13.20) $^{238}_{92}U$ ന്റെ ആൽഫാ ശോഷണത്തെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു. ഈ പ്രവർത്തനത്തിൽ പുറത്തുവിടുന്ന ഊർജം

$Q = (M_U \quad M_{Th} \quad M_{He})\,c^2$

മുകളിൽ തന്നിട്ടുള്ള ആറ്റോമിക മാസ് ഉപയോഗിച്ചാൽ, നമുക്ക് ലഭിക്കുക

$Q = (238.05079 - 234.04363 - 4.00260)\,u \times c^2$

$= (0.00456\,u)\,c^2$

$= (0.00456\,u)\,(931.5\,MeV/u)$

$= 4.25\,MeV.$

(b) $^{238}_{92}U$ സ്വമേധയാ പ്രോട്ടോൺ പുറത്തുവിടുകയാണെങ്കിൽ, ആ ശോഷണ പ്രവർത്തനം ഇപ്രകാരമായിരിക്കും

$^{238}_{92}U \rightarrow \, ^{237}_{91}Pa + \, ^{1}_{1}H$

ഈ പ്രവർത്തനം നടക്കാൻ ആവശ്യമായ Q മൂല്യം

$= (M_U \quad M_{Pa} \quad M_H)\,c^2$

$= (238.05079 - 237.05121 - 1.00783)\,u \times c^2$

$= (\quad 0.00825\,u)\,c^2$

$= -(0.00825\,u)(931.5\,MeV/u)$

$= \quad 7.68\,MeV$

ഇതിൽ, Q മൂല്യം നെഗറ്റീവ് ആയതിനാൽ ഈ പ്രവർത്തനം നൈസർഗികമായി നടക്കുന്നില്ല. $^{238}_{92}U$ ന്യൂക്ലിയസിന് 7.68 MeV ഊർജം കൊടുത്തെങ്കിലേ അതിന് പ്രോട്ടോണിനെ പുറപ്പെടുവിക്കാനാകൂ.

ഉദാഹരണം 13.6

13.6.3 ബീറ്റാ ശോഷണം (Beta decay)

ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് ഇലക്ട്രോണോ പോസിട്രോണോ ഉൽസർജിച്ചുകൊണ്ട് നൈസർഗികമായി ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകുന്ന പ്രക്രിയയാണ് ബീറ്റാ ശോഷണം. ആൽഫാശോഷണം പോലെ ഇതും നിയതമായ ശിഥിലീകരണ ഊർജവും അർധായുസ്സുമുള്ള ഒരു നൈസർഗിക പ്രക്രിയ തന്നെയാണ്. ആൽഫാ ശോഷണത്തെപ്പോലെ, സമവാക്യങ്ങൾ (13.14) ഉം (13.15) ഉം നിയന്ത്രിക്കുന്ന ഒരു സ്റ്റാറ്റിസ്റ്റിക്കൽ പ്രക്രിയയാണ് ബീറ്റാ ശോഷണം. ബീറ്റാ $(\beta^{\ 1})$ മൈനസ് ശോഷണത്തിൽ, (beta minus decay) താഴെ കൊടുത്ത $^{32}_{15}P$ ലേതുപോലെ ന്യൂക്ലിയസ് ഒരു ഇലക്ട്രോണിനെ ഉൽസർജിക്കുന്നു.

$$^{32}_{15}P \rightarrow \, ^{32}_{16}S + e^- + \bar{\nu} \quad (T_{1/2} = \ 14.3\,d) \qquad (13.22)$$

ബീറ്റാപ്ലസ് (β^+) ശോഷണത്തിൽ (beta plus decay), താഴെ കൊടുത്ത $^{22}_{11}$Naലേതു പോലെ ന്യൂക്ലിയസ് ഒരു പോസിട്രോണിനെ ഉൽസർജിക്കുന്നു.

$$^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + e^+ + \nu \quad (T_{1/2} = 2.6 \text{ y}) \tag{13.23}$$

സമവാക്യങ്ങൾക്ക് (13.14), (13.15) നിയതമായി β ശോഷണം നടക്കുന്നതിനാൽ ഏതെങ്കിലും ഒരു പ്രത്യേക ന്യൂക്ലിയസ്സ് ഏതെങ്കിലും ഒരു പ്രത്യേക സമയത്ത് β ശോഷണത്തിനു വിധേയമാകുമോ ഇല്ലയോ എന്നു കൃത്യമായി തിട്ടപ്പെടുത്തുവാനാകില്ല. പക്ഷേ അതിന്റെ അർധായുസ് $T_{1/2}$ കൊണ്ട് β ശോഷണത്തിന്റെ പ്രത്യേകതകൾ മനസ്സിലാക്കാനാകും. ഉദാഹരണത്തിന് മുകളിൽ സൂചിപ്പിച്ചിരിക്കുന്ന ശോഷണങ്ങളുടെ അർധായുസുകൾ യഥാക്രമം 14.3 ദിവസങ്ങളും 2.6 വർഷങ്ങളുമാണ്. ഒരു β^- ശോഷണത്തോടൊപ്പം ഒരു ν കണം പുറത്തു വരും. അതേ സമയം ഒരു β^- ശോഷണത്തിൽ ഒരു $\bar{\nu}$ കണം ഉണ്ടാകും. ഇവിടെ പ്രതീകങ്ങൾ യഥാക്രമം ന്യൂട്രിനോ, ആന്റിന്യൂട്രിനോ എന്നിവയെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു. ഇവ രണ്ടും വളരെ കുറഞ്ഞ മാസുള്ളതോ ഒരു പക്ഷെ തീരെ മാസില്ലാത്തതോ ആയ ചാർജുരഹിത കണങ്ങളാണ്.

ന്യൂട്രിനോകൾ ദ്രവ്യവുമായി വളരെ ദുർബലമായി മാത്രമേ പ്രതിപ്രവർത്തിക്കുന്നുള്ളൂ; ആഗിരണം ചെയ്യപ്പെടാതെ അവയ്ക്ക് ഭൂമിയ്ക്കുള്ളിലേക്കു തുളച്ചുകടക്കാൻ പോലും കഴിയുന്നു. ഈ കാരണത്താൽ അവയുടെ കണ്ടെത്തൽ വളരെ ബുദ്ധിമുട്ടുള്ളതാവുകയും അവയുടെ സാന്നിദ്ധ്യം ദീർഘകാലം ശ്രദ്ധിക്കപ്പെടാതെ പോവുകയും ചെയ്തു. ഒരു β^- ശോഷണത്തിൽ, ഒരു ന്യൂട്രോൺ ന്യൂക്ലിയസിനുള്ളിൽ ഇനി പറയുന്നത് പോലെ ഒരു പ്രോട്ടോൺ ആയി രൂപാന്തരപ്പെടുന്നു

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \tag{13.24}$$

എന്നാൽ, β^+ ശോഷണത്തിൽ, ഒരു പ്രോട്ടോൺ ഒരു ന്യൂട്രോണായാണ് മാറുന്നത്. ഈ മാറ്റം താഴെ സൂചിപ്പിക്കുന്നവിധമാണ്.

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \tag{13.25}$$

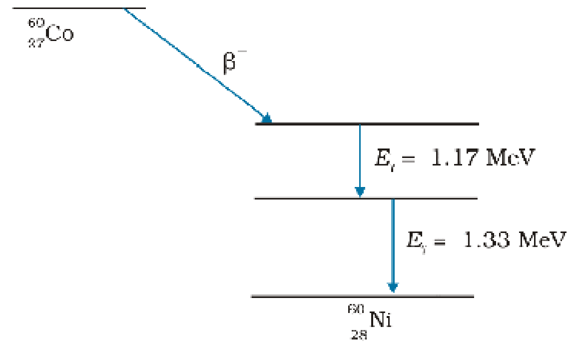
ബീറ്റ ശോഷണത്തിനു വിധേയമാകുന്ന ഒരു ന്യൂക്ലൈഡിന്റെ മാസ്നമ്പർ A മാറാത്തതെന്തുകൊണ്ടെന്ന് ഈ പ്രക്രിയകൾ കാണിച്ചുതരുന്നു. സമവാക്യം (13.24) അല്ലെങ്കിൽ (13.25) അനുസരിച്ച് ബീറ്റാ ശോഷണം നടക്കുമ്പോൾ ഘടക ന്യൂക്ലിയോണുകളിൽ ഒന്നിന്റെ സ്വഭാവം മാറുക മാത്രമാണ് സംഭവിക്കുക.

13.6.4 ഗാമാ ശോഷണം (Gamma decay)

ആറ്റങ്ങളിലേതു പോലെ തന്നെ ന്യൂക്ലിയസിലും വിവിധ ഊർജനിലകളുണ്ട്. ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് ഒരു ഉത്തേജിത നിലയിലാണെങ്കിൽ, വൈദ്യുതകാന്തിക വികിരണം പുറത്തുവിട്ടുകൊണ്ട് അതിന് താഴ്ന്ന ഊർജനിലയിലേക്കു മാറാൻ കഴിയും. ഒരു ന്യൂക്ലിയസിലെ ഊർജനിലകളിലുള്ള വ്യത്യാസങ്ങൾ MeV യുടെ തോതിലായിരിക്കുന്നതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയസുകൾ പുറത്തുവിടുന്ന ഫോട്ടോണുകൾ MeV ഊർജങ്ങൾ ഉള്ളവയായിരിക്കും, അവയെ ഗാമാ കിരണങ്ങൾ (gamma rays) എന്നു വിളിക്കുന്നു. ഇത്തരം കിരണങ്ങൾ ഉന്നത ഊർജവാഹകരായതു കൊണ്ട് അവയുടെ തരംഗദൈർഘ്യം വളരെ ചെറുതും ആവൃത്തി വളരെ കൂടിയതുമാണ്. (X കിരണ മേഖലയേക്കാൾ കുറഞ്ഞ തരംഗദൈർഘ്യം)

ഒരു ആൽഫാ അല്ലെങ്കിൽ ബീറ്റാ ശോഷണത്തിനുശേഷം മിക്ക റേഡിയോന്യൂക്ലൈഡുകളിൽ നിന്നും ഉണ്ടാകുന്ന വ്യുൽപന്ന ന്യൂക്ലിയസ് ഉത്തേജിത അവസ്ഥയിൽ

ആയിരിക്കും. ഒന്നോ അതിലധികമോ ഗാമാ കിരണങ്ങൾ പുറപ്പെടുവിച്ചുകൊണ്ട് ഒരൊറ്റ പരിവർത്തനത്തിലൂടെയോ ചിലപ്പോൾ തുടർച്ചയായ പരിവർത്തനങ്ങളിലൂടെയോ ഇത്തരം വ്യുൽപന്ന (daughter nucleus) ന്യൂക്ലിയസുകൾ ഗ്രൗണ്ട് സ്റ്റേറ്റിലെത്തുന്നു. അത്തരമൊരു പ്രക്രിയയ്ക്ക് ഒരു നല്ല ഉദാഹരണമാണ് $^{60}_{27}Co$ ബീറ്റാ ഉൽസർജനം. $^{60}_{27}Co$ ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്നും ഉണ്ടാകുന്ന $^{60}_{28}Ni$ അതിന്റെ ഉത്തേജിത അവസ്ഥയിൽ കാണപ്പെടുന്നു. ഈ ഉത്തേജിത $^{60}_{28}Ni$ ന്യൂക്ലിയസ് 1.17 MeV യും 1.33 MeV യും ഊർജങ്ങളുള്ള ഗാമാകിരണങ്ങൾ തുടർച്ചയായി ഉൽസർജിച്ചുകൊണ്ട് അതിന്റെ ഗ്രൗണ്ട് സ്റ്റേറ്റിലേക്ക് ഡീ എക്സൈറ്റ് ചെയ്യപ്പെടുന്നു. ഈ പ്രക്രിയ ഒരു ഊർജനിലയുടെ ചിത്രം വഴി ചിത്രം 13.4 ൽ കാണിച്ചിരിക്കുന്നു.



ചിത്രം 13.4: $^{60}_{28}Ni$ ൽ നിന്നും രൂപം കൊള്ളുന്ന $^{60}_{28}Ni$ അതിന്റെ ഉത്തേജിതാവസ്ഥയിലാണ്. തുടർച്ചയായ γ വികിരണ ഉൽസർജനങ്ങളിലൂടെ അത് അതിന്റെ സാധാരണ ഊർജ നിലയിലേക്ക് മാറ്റപ്പെടുന്നു.

13.7 ന്യൂക്ലിയാർ ഊർജം (Nuclear Energy)

ചിത്രം 13.1 ൽ തന്നിരിക്കുന്ന പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ (E_{bn}) ഗ്രാഫിൽ, A = 30 നും A = 170 നും ഇടയിലുള്ള ഒരു പരന്ന മധ്യ മേഖലയുണ്ട്. ഈ മേഖലയിൽ പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധനഊർജം ഏകദേശം സ്ഥിരമാണ് (8.0 MeV). ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും (A<30), ഭാരം കൂടിയ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും (A>170), പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധന ഊർജം, നാം കരുതിയ പോലെ, 8.0 MeVനേക്കാൾ കുറവാണ്. ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ ഈ സവിശേഷത അർഥമാക്കുന്നത്, 30 < A < 170 ആയ മധ്യമേഖലയിലെ ന്യൂക്ലിയസുകൾ A < 30 ഉം A > 170 ഉം ആയ ന്യൂക്ലിയസ്സുകളേക്കാൾ കൂടുതൽ ദൃഢമായി ബന്ധിപ്പിക്കപ്പെട്ടിരിക്കുന്നു എന്നാണ്. ദൃഢത കുറഞ്ഞ ബന്ധനത്തിലുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകൾ കൂടുതൽ ദൃഢബന്ധിതമായ ന്യൂക്ലിയസുകളായി മാറ്റിയാൽ ഊർജം പുറത്തുവിടാനാകും. നാം ഇതിനകം പരാമർശിച്ചിട്ടുള്ള അത്തരം രണ്ട് പ്രക്രിയകൾ ന്യൂക്ലിയാർ ഫിഷനും ഫ്യൂഷനുമാണ്.

കൽക്കരി, പെട്രോളിയം തുടങ്ങിയ പരമ്പരാഗത ഊർജസ്രോതസ്സുകളിൽ രാസപ്രവർത്തനങ്ങളിലൂടെയാണ് ഊർജം പുറത്തുവരുന്നത്. പ്രതി ആറ്റത്തിൽ ഈ ഊർജങ്ങൾ ഇലക്ട്രോൺവോൾട്ടുകളുടെ തോതിലാണ്. നാം കണ്ടുകഴിഞ്ഞതുപോലെ, ആണവ പ്രക്രിയകളുമായി ബന്ധപ്പെട്ട ഊർജം ദശലക്ഷം ഇരട്ടി (MeV പ്രതിന്യൂക്ലിയോൺ) അധികമാണ്. ഇതിനർഥം അതേ അളവിലുള്ള പരമ്പരാഗത സ്രോതസ്സുകളേക്കാൾ ആണവ സ്രോതസ്സുകൾ ദശലക്ഷം ഇരട്ടി ഊർജമാണ് നൽകുന്നതെന്നാണ്. ഒരു കിലോഗ്രാം കൽക്കരി കത്തുമ്പോൾ 10^7 ജൂൾ ഊർജം ലഭിക്കും, അതേസമയം 1 കിലോഗ്രാം യുറേനിയം ന്യൂക്ലിയാർ ഫിഷനു വിധേയമാകുമ്പോൾ 10^{14} J ഊർജം ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കുകയും ചെയ്യും.

13.7.1 ന്യൂക്ലിയാർ ഫിഷൻ (Fission)

ചാഡ്വിക് ന്യൂട്രോൺ കണ്ടുപിടിച്ചതിനു തൊട്ടുപിന്നാലെ, ന്യൂട്രോണുകൾ വിവിധ മൂലകങ്ങളിൽ വന്നിടിക്കുമ്പോഴാണ് പുതിയ റേഡിയോആക്ടീവ് മൂലകങ്ങൾ ഉണ്ടാകുന്നതെന്ന് എൻറിക്കോ ഫെർമി കണ്ടെത്തി. ന്യൂട്രോൺ മാത്രമല്ല പ്രോട്ടോൺ, α- കണങ്ങൾ മുതലായ കണങ്ങൾക്കും ഇത്തരം മാറ്റങ്ങൾ വരുത്തുവാൻ ശേഷിയുണ്ടെന്നു പിന്നീട് നിരീക്ഷിച്ചു. ഒരു ന്യൂട്രോണിനെ ഒരു യുറേനിയത്തിലിടിപ്പിക്കുമ്പോൾ യുറേനിയം ന്യൂക്ലിയസ് വളരെ കൂടിയ അളവി

ലുള്ള ഊർജം പുറത്തുവിട്ട് രണ്ട് തുല്യ ഭാഗങ്ങളായി മാറുന്നു. ന്യൂട്രോൺ പോലുള്ള കണങ്ങളുപയോഗിച്ച് ന്യൂക്ലിയസ്സുകളെ വിഭജിക്കുന്ന ഇത്തരം പ്രവർത്തനങ്ങളെ ന്യൂക്ലിയർഫിഷനെന്നു പറയുന്നു. അത്തരം പ്രവർത്തനങ്ങൾക്ക് ഒരു ഉദാഹരണമാണ്.

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U \rightarrow {}_{56}^{144}Ba + {}_{36}^{89}Kr + 3\,{}_{0}^{1}n \qquad (13.26)$$

ഫിഷൻ എല്ലായ്പ്പോഴും ബേരിയത്തെയും ക്രിപ്റ്റോണിനെയും ഉല്പാദിപ്പിക്കണമെന്നില്ല. അതിന് മറ്റ് പദാർഥ ജോഡികളും നിർമിക്കാൻ കഴിയും, ഉദാഹരണത്തിന്

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U \rightarrow {}_{51}^{133}Sb + {}_{41}^{99}Nb + 4\,{}_{0}^{1}n \qquad (13.27)$$

മറ്റൊരു ഉദാഹരണമെടുത്താൽ,

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{54}^{140}Xe + {}_{38}^{94}Sr + 2\,{}_{0}^{1}n \qquad (13.28)$$

ഫിഷനിലൂടെ ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്ന വിഘടിത ന്യൂക്ലിയസ് ന്യൂട്രോൺ സമ്പന്നവും അസ്ഥിരവുമാണ്. അവ റേഡിയോആക്ടീവ് ആണ്, ഓരോന്നും സുസ്ഥിര അന്തിമ ഉൽപന്നങ്ങളാവുന്നത് വരെ, തുടർച്ചയായി ബീറ്റ കണങ്ങൾ ഉൽസർജിച്ചുകൊണ്ടിരിക്കുന്നു.

യുറേനിയം പോലെയുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ന്യൂക്ലിയാർ വിഭജനപ്രക്രിയയിൽ പുറത്തുവിടുന്ന ഊർജം (Q മൂല്യം) പ്രതി വിഘടിത ന്യൂക്ലിയസിനു 200 MeV എന്ന ക്രമത്തിലാണ്. അത് ചുവടെ കൊടുത്ത രീതിയിൽ കണ്ടെത്താം:

A = 240 ആയ ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് A = 120 ആയ രണ്ട് ചെറു ന്യൂക്ലിയസ്സുകളായി മാറുന്നുവെന്ന് കരുതുക.

A = 240 ആയ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ E_{bn} ഏകദേശം 7.6 MeV ആണ്,

A = 120 ആയ രണ്ട് വിഘടിത ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ E_{bn} ഏകദേശം 8.5 MeV.

∴ ന്യൂക്ലിയോണിനുണ്ടാകുന്ന ബന്ധന ഊർജത്തിലെ ലാഭം ഏകദേശം 0.9 MeV ആയതിനാൽ, ആകെ ബന്ധന ഊർജത്തിലെ ലാഭം 240×0.9 അഥവാ 216 MeV

ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനങ്ങളിൽ ഉണ്ടാകുന്ന ശിഥിലീകരണ ഊർജം ആദ്യം വിഘടിത ന്യൂക്ലിയസുകളുടെയും ന്യൂട്രോണുകളുടെയും ഗതികോർജമായി കാണപ്പെടുന്നു. ഒടുവിൽ അത് ചുറ്റുപാടുകളിലേക്ക് ചൂടായി പകർന്നു കിട്ടുന്നു. വൈദ്യുതി ഉൽപാദിപ്പിക്കുന്ന ആണവ റിയാക്ടറുകളിലെ ഊർജത്തിന്റെ ഉറവിടം ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനമാണ്. ആറ്റംബോംബിൽ നിന്ന് പുറത്തുവരുന്ന ഭീമമായ ഊർജം അനിയന്ത്രിതമായ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിൽ നിന്നുമാണ്. ന്യൂക്ലിയർ റിയാക്ടർ എങ്ങനെ പ്രവർത്തിക്കുന്നു എന്ന് തുടർന്നുള്ള ഭാഗത്തിൽ വിശദമായി ചർച്ച ചെയ്യുന്നുണ്ട്.

13.7.2 ന്യൂക്ലിയാർ റിയാക്ടർ (Nuclear reactor)

ഒരു ന്യൂട്രോണുമായി കൂട്ടിയിടിച്ച് ${}_{92}^{235}U$ ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിന് വിധേയമാകുമ്പോൾ, അത് ഒരു അധിക ന്യൂട്രോൺ പുറത്തു വിടുന്നു. ഇങ്ങനെ ലഭ്യമാകുന്ന അധിക ന്യൂട്രോൺ മറ്റൊരു ${}_{92}^{235}U$ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിനു തുടക്കമിടുന്നു. വാസ്തവത്തിൽ, ഓരോ ${}_{92}^{235}U$ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിലും ശരാശരി $2\frac{1}{2}$ ന്യൂട്രോണുകൾ പുറത്തുവിടുന്നു. ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്നതിനേക്കാൾ കൂടുതൽ ന്യൂട്രോണുകൾ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിലൂടെ ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുമ്പോൾ ഓരോ

ഇന്ത്യയുടെ ആണവോർജ പദ്ധതികൾ (INDIA'S ATOMIC ENERGY PROGRAMME)

ഇന്ത്യയ്ക്ക് സ്വാതന്ത്ര്യം ലഭിച്ച കാലഘട്ടത്തോടടുപ്പിച്ചാണ് ഹോമി ജെ. ഭാഭ (1909-1966) യുടെ നേതൃത്വത്തിൽ നമ്മുടെ ആറ്റോമികോർജ പദ്ധതികൾ ആരംഭിക്കുന്നത്. ആദ്യത്തെ ഐതിഹാസികനേട്ടം എന്ന് വിശേഷിപ്പിക്കാവുന്നത് ഇന്ത്യയുടെ ആദ്യ റിയാക്ടർ ആയ അപ്സരയുടെ നിർമാണമാണ് (അത് 1956 ആഗസ്റ്റ് 4ന് ക്രാന്തീകൃത (criticality) കൈവരിക്കുകയുണ്ടായി). ഇതിൽ ഇന്ധനമായി സമ്പുഷ്ട യുറേനിയവും മോഡറേറ്ററായി ജലവുമാണ് ഉപയോഗിച്ചത്. 1960 ലെ സൈറസ് (CIRUS - Canada India Research U.S.) റിയാക്ടറിന്റെ നിർമാണമായിരുന്നു മറ്റൊരു നാഴികക്കല്ല്. ഈ 40 MW റിയാക്ടറിൽ സ്വാഭാവിക യുറേനിയം ഇന്ധനമായും ഘനജലം മോഡറേറ്ററായും ഉപയോഗിച്ചു. ന്യൂക്ലിയാർ സയൻസിന്റെ വിവിധ മേഖലകളിലെ ഗവേഷണങ്ങൾക്ക് പ്രോത്സാഹനം നൽകാൻ അപ്സരയ്ക്കും സൈറസിനും സാധിച്ചു. ഈ പ്രവർത്തനങ്ങളുടെ ആദ്യ രണ്ടു ദശകങ്ങളിലുണ്ടായ ഒരു പ്രധാന നാഴികക്കല്ല് ട്രോംബെയിലെ പ്ലൂട്ടോണിയം പ്ലാന്റിന്റെ അടിസ്ഥാന രൂപരേഖ തയ്യാറാക്കലും നിർമാണവുമായിരുന്നു. ഇത് ഇന്ത്യയിലെ ഇന്ധന പുനരുൽപാദന (റിയാക്ടറിൽ ഉപയോഗിക്കുന്ന ഇന്ധനത്തിൽ നിന്ന് ഫിഷന് ഉപയോഗപ്പെടുത്താവുന്ന ന്യൂക്ലിയാർ പദാർഥങ്ങൾ വേർതിരിക്കുന്ന) സാങ്കേതികവിദ്യയ്ക്ക് കളമൊരുക്കി. തുടർന്ന് ഗവേഷണ റിയാക്ടറുകളായ സെർലിന (ZERLINA), പൂർണിമ (PURNIMA - I, II, III), ധ്രുവ (DHRUVA), കാമിനി (KAMINI) എന്നിവ പ്രവർത്തനം തുടങ്ങി. U-233 ഇന്ധനമായി ഉപയോഗിക്കുന്ന രാജ്യത്തെ ആദ്യ വലിയ ഗവേഷണ റിയാക്ടറാണ് കാമിനി.

പേര് സൂചിപ്പിക്കുന്നതുപോലെ, ഗവേഷണ റിയാക്ടറിന്റെ പ്രാഥമികലക്ഷ്യം പവർ ഉൽപാദനമല്ല മറിച്ച് ന്യൂക്ലിയാർ സയൻസിലെയും സാങ്കേതികവിദ്യയിലെയും വ്യത്യസ്ത മേഖലകളിൽ ഗവേഷണ സൗകര്യമൊരുക്കുകയെന്നതാണ്. ഗവേഷണറിയാക്ടറുകൾ വൈവിധ്യമേറിയ റേഡിയോ ഐസോടോപ്പുകളുടെ ഉൽപാദന ഉറവിടങ്ങൾ കൂടിയാണ്. വ്യവസായം, ചികിത്സ, കൃഷി തുടങ്ങിയ മേഖലകളിൽ ഇവയ്ക്ക് വളരെയേറെ പ്രാധാന്യമുണ്ട്.

രാജ്യത്തിന്റെ സാമൂഹികസാമ്പത്തിക വളർച്ചയ്ക്ക് ഉതകുന്ന തരത്തിൽ സുരക്ഷിതവും വിശ്വസിക്കാവുന്നതുമായ വൈദ്യുതോർജം ലഭ്യമാക്കുകയും ന്യൂക്ലിയാർ സാങ്കേതികവിദ്യയുടെ എല്ലാ മേഖലയിലും സ്വയം പര്യാപ്തമാവുകയും ചെയ്യുകയെന്നതാണ്ഇന്ത്യൻ ആറ്റോമിക ഊർജപദ്ധതിയുടെ പ്രധാനലക്ഷ്യങ്ങൾ. അമ്പതുകളുടെ ആദ്യത്തിൽ ഏറ്റെടുത്ത ആറ്റോമികധാതുക്കളുടെ പര്യവേക്ഷണം സൂചിപ്പിച്ചത് ഇന്ത്യയിൽ പരിമിതമായ തോതിലുള്ള യുറേനിയം നിക്ഷേപമേയുള്ളൂവെന്നും എന്നാൽ സാമാന്യം സമൃദ്ധമായ തോതിൽ തോറിയം നിക്ഷേപമുണ്ടെന്നുമാണ്. അതുകൊണ്ട്, ഒരു ത്രിതല തന്ത്രമാണ് ന്യൂക്ലിയാർ പവർ ഉൽപാദനത്തിന്റെ കാര്യത്തിൽ നമ്മുടെ രാജ്യം സ്വീകരിച്ചത്. ഒന്നാമത്തെ ഘട്ടം സ്വാഭാവികയുറേനിയം ഇന്ധനമായും ഘനജലം മോഡറേറ്ററായും ഉപയോഗിക്കുന്നതായിരുന്നു. റിയാക്ടറിൽ നിന്നു പുറത്തുവിടുന്ന ഇന്ധനത്തിന്റെ പുനരുപയോഗത്തിലൂടെ ലഭിക്കുന്ന പ്ലൂട്ടോണിയം239 രണ്ടാമത്തെ ഘട്ടത്തിനുള്ള ഇന്ധനമായി പ്രവർത്തിക്കുന്നു. ഇത്തരം റിയാക്ടറുകൾ ഫാസ്റ്റ് ബ്രീഡർ റിയാക്ടറുകൾ എന്ന പേരിലറിയപ്പെടുന്നു. അവയെ അങ്ങനെ വിളിക്കാൻ കാരണം അവ ശൃംഖലാപ്രവർത്തനം നിലനിർത്താൻ അതിവേഗ ന്യൂട്രോണുകളെ ഉപയോഗിക്കുന്നതാണ് (അതിനാൽ മോഡറേറ്ററുകൾ ആവശ്യം വരുന്നില്ല), കൂടാതെ, അവ പവർ ഉൽപാദിപ്പിക്കുകയും ഉപയോഗിക്കുന്നതിനേക്കാൾ കൂടുതൽ ഫിഷൻ ഇന്ധനം(പ്ലൂട്ടോണിയം) ഉണ്ടാക്കുകയും ചെയ്യുന്നു. മൂന്നാമത്തെ ഘട്ടം, ദീർഘകാലാടിസ്ഥാനത്തിൽ ഏറ്റവും പ്രാധാന്യമുള്ള, തോറിയം 232ൽ നിന്ന് ഫിഷൻ നടത്താൻ കഴിയുന്ന ഇന്ധനമായ യുറേനിയം 233 ഉൽപാദിപ്പിക്കുന്ന ഫാസ്റ്റ് ബ്രീഡർ റിയാക്ടർ ഉപയോഗിക്കുകയും അതുപയോഗിച്ച് പവർ ഉൽപാദിപ്പിക്കുന്നതുമാണ്.

ഇന്ത്യ ഇപ്പോൾ ഈ പരിപാടിയുടെ രണ്ടാം ഘട്ടത്തിലാണ്. മാത്രമല്ല, മൂന്നാം ഘട്ടത്തിന്റെ ഭാഗമായ തോറിയം ഉപയോഗത്തിൽ കൊണ്ടുവരുന്ന കാര്യത്തിൽ ഗണ്യമായ പുരോഗതി നേടിയിട്ടുമുണ്ട്. ധാതു പര്യവേക്ഷണം, ഖനനം, ഇന്ധന നിർമിതി, ഘനജല ഉൽപാദനം, റിയാക്ടർ രൂപകൽപന, നിർമാണവും പ്രയോഗവും, ഇന്ധന പുനരുൽപാദനം തുടങ്ങിയ സങ്കീർണ സാങ്കേതികവിദ്യകളിൽ രാജ്യം വൈദഗ്ധ്യം നേടിക്കഴിഞ്ഞു. രാജ്യത്തിന്റെ വിവിധ കേന്ദ്രങ്ങളിൽ നിർമിച്ച സമ്മർദിത ഘനജല റിയാക്ടറുകൾ (PHWRs) പദ്ധതിയുടെ ഒന്നാം ഘട്ടത്തിന്റെ പൂർത്തീകരണം അടയാളപ്പെടുത്തുന്നു. ഘനജല ഉൽപാദനത്തിൽ ഇന്ത്യ ഇപ്പോൾ സ്വയം പര്യാപ്തത കൈവരിച്ചുകഴിഞ്ഞിരിക്കുകയാണ്. രൂപകൽപനയിലും പ്രവർത്തനത്തിലും വിപുലമായ സുരക്ഷാമാർഗങ്ങൾ, കൂടാതെ റേഡിയോളജിക്കൽ സംരക്ഷണത്തിന്റെ കർശനമായ നിലവാരങ്ങളും ഇന്ത്യൻ ആണവോർജ പരിപാടിയുടെ മുഖമുദ്രയാണ്.

ന്യൂട്രോണും മറ്റൊരു ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനം തുടങ്ങിവെയ്ക്കുന്ന തരത്തിൽ ഒരു ശൃംഖലാ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിനുള്ള (chain reaction) സാധ്യത ഉണ്ടാകുന്നു. 1939ൽ എൻറിക്കോ ഫെർമി (Enrico Fermi) യാണ് അത്തരത്തിലുള്ള ഒരു സാധ്യത ആദ്യമായി മുന്നോട്ടുവെച്ചത്. ശൃംഖലാ പ്രതിപ്രവർത്തനം ഒന്നുകിൽ അനിയന്ത്രിതവും ദ്രുതഗതിയിലുള്ളതുമാവാം (ഒരു ആണവ ബോംബ് പോലെ), അല്ലെ

ങ്കിൽ നിയന്ത്രിതവും സ്ഥിരമായതുമാകാം. (ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ റിയാക്ടറിലേതു പോലെ). ആദ്യത്തേത് നശീകരണത്തിലേക്ക് നയിക്കുമെങ്കിൽ രണ്ടാമത്തേത് വൈദ്യുതി ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കുന്നതിലേക്കായി ഉപയോഗപ്പെടുത്താനാകും.

എന്നാൽ യുറേനിയം ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്ന് വിമുക്തമായ ന്യൂട്രോണുകൾ വളരെ ഊർജമുള്ളവയായതിനാൽ, മറ്റൊരു ന്യൂക്ലിയാർ വിഭജനത്തിന് തുടക്കമിടുന്നതിനു പകരം അവ പദാർഥങ്ങളിൽ നിന്ന് പുറത്തേക്ക് എത്താമെന്നും കണ്ടെത്തുകയുണ്ടായി. കൂടാതെ വേഗം കൂടിയ ന്യൂട്രോണുകളേക്കാൾ $^{235}_{92}U$ നെ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിനു സ്വാധീനം ഉളവാക്കുന്നതിനുള്ള ഉയർന്ന സഹജ സംഭാവ്യത (intrinsic probability) വേഗം കുറഞ്ഞ ന്യൂട്രോണുകൾക്കുണ്ടെന്ന വസ്തുതയും കണ്ടെത്തി.

$^{235}_{92}U$ ന്റെ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനത്തിലുണ്ടാവുന്ന ഒരു ന്യൂട്രോണിന്റെ ശരാശരി ഊർജം 2 MeV ആണ്. വേഗം കുറയ്ക്കപ്പെടാത്ത പക്ഷം ഈ ന്യൂട്രോണുകൾ യുറേനിയം ന്യൂക്ലിയസുകളുമായി പ്രതിപ്രവർത്തിക്കാതെ റിയാക്ടറിൽ നിന്ന് രക്ഷപ്പെടാൻ ഇടയാകും, ഇത്തരം ന്യൂട്രോണുകൾ ഉപയോഗിച്ച് ശൃംഖലാപ്രതിപ്രവർത്തനം നിലനിർത്താൻ വളരെ വലിയ അളവിലുള്ള അണുവിഘടനക്ഷമമായ വസ്തുക്കൾ ഉപയോഗിക്കേണ്ടി വരുന്നു. ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകളുമായുള്ള ഇലാസ്തിക വിസരണം വഴി വേഗമേറിയ ന്യൂട്രോണുകളെ കുറഞ്ഞ വേഗത്തിലാക്കുവാൻ കഴിയും. ഹൈഡ്രജനുമായുള്ള ഇത്തരം ഇലാസ്റ്റിക് കൂട്ടിമുട്ടലിൽ ന്യൂട്രോൺ ഏതാണ്ട് നിശ്ചലാവസ്ഥയിലേക്കു വരികയും പ്രോട്ടോൺ ന്യൂട്രോണിന്റെ ഊർജത്തെ വഹിക്കുകയും ചെയ്യുന്നതായി ചാഡ്‌വിക്കിന്റെ പരീക്ഷണങ്ങളിലൂടെ തെളിയിച്ചു. ഒരു ഗോലി നിശ്ചലാവസ്ഥയിലുള്ള സമാനമായ മറ്റൊരു ഗോലിയുമായി നേർക്കുനേർ കൂട്ടിയിടി ഉണ്ടാകുമ്പോൾ ഇതേ സാഹചര്യമാണ് ഉണ്ടാകുന്നത്. അതിനാൽ, റിയാക്ടറുകളിൽ, വേഗമേറിയ ന്യൂട്രോണുകളെ മന്ദഗതിയിലാക്കാൻ ന്യൂക്ലിയാർ വിഘടനക്ഷമമായ ന്യൂക്ലിയസുകളോടൊപ്പം മോഡറേറ്ററുകൾ (moderators) എന്നറിയപ്പെടുന്ന ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾ കൂടി നൽകുന്നു. സാധാരണയായി ഉപയോഗിക്കുന്ന മോഡറേറ്ററുകളാണ് ജലം, ഘനജലം (D_2O), ഗ്രാഫൈറ്റ് എന്നിവ. മുംബൈയിലെ ഭാഭാ ആറ്റോമിക് റിസർച്ച് സെന്ററിലെ (BARC) അപ്സര റിയാക്ടറിൽ ജലമാണ് മോഡറേറ്ററായി ഉപയോഗിക്കുന്നത്.

ഇന്ത്യയിലെ വൈദ്യുത ഉൽപാദനത്തിനുപയോഗിക്കുന്ന മറ്റു റിയാക്ടറുകളിൽ മോഡറേറ്ററായി ഘനജലം ഉപയോഗിക്കുന്നു.

മോഡറേറ്ററുടെ ഉപയോഗം കാരണം, ഒരു പ്രത്യേക സമയത്തുണ്ടാകുന്ന ന്യൂട്രോണുകൾ ഉൽപാദിപ്പിക്കുന്ന അണുവിഭജനങ്ങളുടെ എണ്ണവും അതിനു മുമ്പായി നടന്ന അണുവിഭജനത്തിന്റെ എണ്ണവും തമ്മിലുള്ള അനുപാതം, K യുടെ മൂല്യം ഒന്നിലധികമാകാൻ സാധ്യതയുണ്ട്. ഈ അനുപാതത്തെ ഗുണനഘടകം (multiplication factor) എന്നു വിളിക്കുന്നു; അത് റിയാക്ടറിലെ ന്യൂട്രോണുകളുടെ വളർച്ചാനിരക്കിന്റെ അളവാണ്. K = 1 ആണെങ്കിൽ റിയാക്റ്ററിന്റെ പ്രവർത്തനം ക്രിറ്റിക്കൽ (critical) ആണെന്ന് പറയപ്പെടുന്നു, അത് സ്ഥിരമായ പവർ ഉൽപാദനത്തിനായി നമ്മെ സഹായിക്കും. K ഒന്നിനേക്കാൾ കൂടുതലാണെങ്കിൽ, പ്രവർത്തന നിരക്കും റിയാക്റ്റർ പവറും ക്രമാതീതമായി വർധിക്കുന്നു. K യെ 1 നോട് വളരെ അടുത്തേക്ക് കുറച്ചില്ലെങ്കിൽ റിയാക്റ്റർ സൂപ്പർ ക്രിറ്റിക്കൽ (supercritical) അവസ്ഥയിലെത്തുകയും പൊട്ടിത്തെറി പോലും ഉണ്ടാവുകയും ചെയ്യും. 1986 ൽ ഉക്രെയ്നിലെ ചെർണോബിൽ റിയാക്ടറിലുണ്ടായ സ്ഫോടനം ഒരു ആണവ റിയാക്ടറിലെ അപകടങ്ങൾ കൊടും ദുരന്തങ്ങൾക്ക് കാരണമായേക്കാമെന്ന ഓർമ്മപ്പെടുത്തൽ ആണ്.

കാഡ്മിയം പോലുള്ള, ന്യൂട്രോൺ ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന പദാർഥങ്ങൾ കൊണ്ട് നിർമിച്ച നിയന്ത്രണദണ്ഡുകൾ ഉപയോഗിച്ചാണ് (control rods) പ്രതിപ്രവർത്തന നിരക്ക് നിയന്ത്രിക്കുന്നത്. നിയന്ത്രണദണ്ഡുകൾക്കു പുറമേ, K ഒന്നിനു താഴെയായി അതിവേഗം കുറയ്ക്കാവുന്ന തരത്തിൽ ആവശ്യമുള്ളപ്പോൾ റിയാക്ടറിലേക്ക് കടത്തിവെയ്ക്കാവുന്ന സുരക്ഷാദണ്ഡുകൾ (safety rods) റിയാക്ടറുകളിൽ ഉപയോഗിക്കുന്നുണ്ട്.

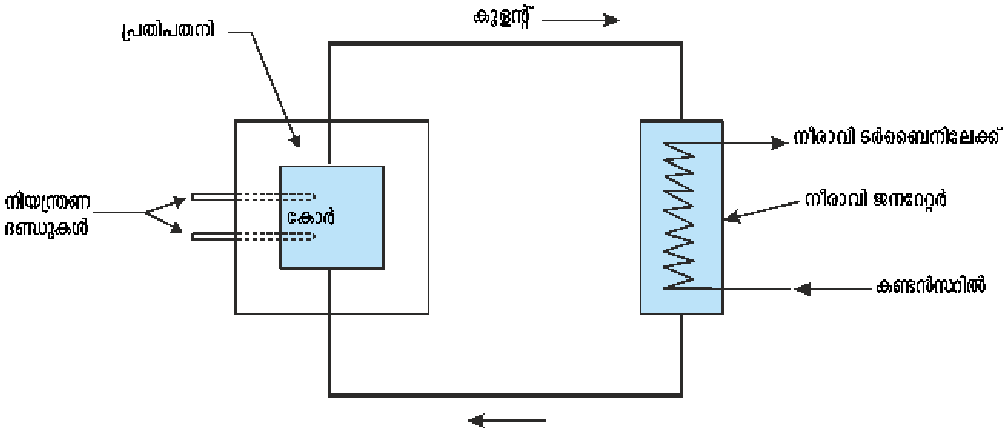
ആണവ റിയാക്ടറുകളിൽ പ്രകൃതിദത്തമായ യുറേനിയത്തിൽ ഫിഷൻ പ്രവർത്തനത്തിനുശേഷിയില്ലാത്ത $^{238}_{92}U$ ഐസോട്ടോപ്പുകളാണ് മുഖ്യമായും കാണപ്പെടുന്നത്. ഇത്തരം ഐസോട്ടോപ്പിന്റെ ($^{238}_{92}U$) ന്യൂക്ലിയസ് ഒരു ന്യൂട്രോണിനെ ആഗീരണം ചെയ്യുക വഴി റേഡിയോആക്ടീവ് ശേഷി വളരെ കൂടുതലുള്ള പ്ലൂട്ടോണിയമായി മാറുന്നു. ഇതിലുൾപ്പെടുന്ന പ്രതിപ്രവർത്തനങ്ങളുടെ പരമ്പര ഇങ്ങനെയാണ്,

$$^{238}_{92}U + n \rightarrow {}^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + e^- + \bar{\nu}$$

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + e^- + \bar{\nu} \qquad (13.29)$$

ഇങ്ങനെയുണ്ടാകുന്ന പ്ലൂട്ടോണിയം സ്ലോ ന്യൂട്രോണുകളാൽ (slow neutrons) അണുവിഘടനത്തിന് വിധേയമാവുകയും ചെയ്യുന്നു.

തെർമൽ ന്യൂട്രോണുകളെ ആധാരമാക്കി പ്രവർത്തിക്കുന്ന ഒരു ആണവ റിയാക്ടറിന്റെ രൂപരേഖയാണ് ചിത്രം (13.5) ൽ കൊടുത്തിരിക്കുന്നത്. ഈ റിയാക്ടറിന്റെ കോറിലാണ് ഫിഷൻ പ്രവർത്തനം നടക്കുന്നത്. ഫിഷൻ പ്രവർത്തനത്തിനു അനുയോജ്യമായ രീതിയിൽ ക്രമീകരിച്ചിട്ടുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ഇന്ധനമാണ് ഇവിടെ ശേഖരിച്ചിരിക്കുന്നത്. മിക്ക റിയാക്ടറുകളിലും ഇന്ധനമായി ഉപയോഗിക്കുന്നത് സമ്പുഷ്ടയുറേനിയമാണ്. (പ്രകൃതിദത്തമായ യുറേനിയത്തിൽ ഉള്ളതിനേക്കാൾ (0.7%) $^{235}_{92}U$ ഐസോട്ടുപ്പുകളുടെ അനുപാതം വർധിപ്പിച്ച പദാർഥമാണ് സമ്പുഷ്ടയൂറേനിയം). ഇന്ധനത്തോടൊപ്പം ന്യൂട്രോണുകളുടെ വേഗം കുറയ്ക്കുവാനുപയോഗിക്കുന്ന ഒരു മോഡറേറ്ററും കോർ ഉൾക്കൊള്ളുന്നു. കോറിൽ നിന്നും പദാർഥങ്ങളോ കിരണങ്ങളോ വെളിയിലേക്ക് ചോരാതെ സൂക്ഷിക്കുവാനായി ഒരു കവചം (പ്രതിപതനി) കൊണ്ട് കോറിനെ പൊതിഞ്ഞിട്ടുണ്ടാകും. ഫിഷൻ പ്രവർത്തനം വഴി ഉയർന്ന തോതിലുണ്ടാകുന്ന താപോർജത്തെ അനുയോജ്യമായ ഒരു ശീതീകാരി (coolant) ഉപയോഗിച്ച് കോറിൽ നിന്നും തുടർച്ചയായി നീക്കം ചെയ്തുകൊണ്ടിരിക്കും. റേഡിയോ വികിരണങ്ങൾ വെളിയിലേക്കു വരാതിരിക്കുവാൻ പര്യാപ്തമായ ഒരാവരണം കൊണ്ട് റിയാക്ടറിനെ പൊതിഞ്ഞിട്ടുണ്ടാകും. അപ



ചിത്രം 13.5 : തെർമൽ ന്യൂട്രോൺ ഫിഷൻ അടിസ്ഥാനമാക്കി പ്രവർത്തിക്കുന്ന ന്യൂക്ലിയാർ റിയാക്ടറിന്റെ ഘടനാചിത്രം

കടകരമായ ഏതെങ്കിലും തരത്തിലുള്ള ചോർച്ചയുണ്ടോ എന്നറിയുന്നതിനായുള്ള പ്രത്യേക സംവിധാനങ്ങളും റിയാക്ടറിലുണ്ടാകും. കൂടാതെ ന്യൂട്രോൺ ആഗീരണശേഷി വളരെ കൂടുതലായുള്ള കാഡ്മിയം പോലുള്ള പദാർഥം കൊണ്ടു നിർമിച്ചിട്ടുള്ള ദണ്ഡുകൾ ഫിഷൻ പ്രവർത്തനം നിർത്തുന്നതിനും നിയന്ത്രിക്കുന്നതിനും വേണ്ടി ഇവിടെ ഉപയോഗിക്കുന്നുണ്ട്. കോറിൽ നിന്നും കൂളന്റ് വഴി നീക്കം ചെയ്യപ്പെടുന്ന താപോർജം ഉപയോഗിച്ച് ഉന്നത മർദ്ദത്തിലുള്ള നീരാവിയുണ്ടാക്കുന്നതിനുള്ള സംവിധാനവും ഇതിൽ ക്രമീകരിച്ചിട്ടുണ്ട്. ഈ നീരാവിയുപയോഗിച്ച ജനറേറ്ററുകളുടെ ടർബൈൻ കറക്കിയാണ് വൈദ്യുതി ഉണ്ടാക്കുന്നത്.

ഏത് പവർ ഉൽപാദന സംവിധാനങ്ങളും ഉണ്ടാക്കുന്നതു പോലെ ആണവ റിയാക്ടറുകളും മാലിന്യങ്ങൾ ഉണ്ടാക്കുന്നുണ്ട്. ആണവ മാലിന്യങ്ങൾ അതീവ റേഡിയോ ആക്ടീവും അത്യന്തം അപകടകാരികളുമായതിനാൽ അവ കൈകാര്യം ചെയ്യേണ്ടത് വിപുലമായ സുരക്ഷാക്രമീകരണങ്ങൾ ഉപയോഗിച്ച് വളരെ സൂക്ഷ്മതയോടെ ആയിരിക്കണം. അതിനാൽ ആണവ മാലിന്യ നിർമാർജനത്തിനും, ഇന്ധനാവശിഷ്ടങ്ങൾ കൈകാര്യം ചെയ്യുന്നതിനും വളരെ വിപുലമായ സുരക്ഷാ സജ്ജീകരണങ്ങൾ ആവശ്യമായി വരുന്നു. ഈ സുരക്ഷാക്രമീകരണങ്ങളാണ് ഇന്ത്യൻ ആണവോർജപദ്ധതിയുടെ സവിശേഷത.

13.7.3 ന്യൂക്ലിയാർ ഫ്യൂഷൻ – നക്ഷത്രങ്ങളിലെ ഊർജോൽപാദനം (Nuclear fusion – energy generation in stars)

രണ്ട് ലഘു ന്യൂക്ലിയസുകൾ കൂടിച്ചേർന്ന് ഒരു വലിയ ന്യൂക്ലിയസാകുന്ന ന്യൂക്ലിയാർ ഫ്യൂഷൻ പ്രക്രിയയിൽ ഊർജം പുറത്തേക്കു വിടുന്നുവെന്ന് ചിത്രം 13.1ൽ കാണുന്ന ബന്ധനഊർജ ഗ്രാഫിൽ നിന്ന് വ്യക്തമാകുന്നുണ്ട്. ഇത്തരം ഊർജോത്സർജന പ്രക്രിയകളിൽ ചിലത് ഇവയാണ്.

$$ {}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu + 0.42\ \text{MeV} \qquad [13.29(a)]$$

$$ {}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + n + 3.27\ \text{MeV} \qquad [13.29(b)]$$

$$ {}^2_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + {}^1_1H + 4.03\ \text{MeV} \qquad [13.29(c)]$$

പ്രവർത്തനം [13.29(a)] യിൽ, രണ്ട് പ്രോട്ടോണുകൾ കൂടിച്ചേർന്ന് ഒരു ന്യൂട്രോണും ഒരു പോസിട്രോണും ഉണ്ടാവുകയും 0.42 MeV ഊർജം പുറത്തുവിടുകയും ചെയ്യുന്നു. പ്രവർത്തനം [13.29(b)]യിൽ, രണ്ട് ഡ്യൂട്രോണുകൾ യോജിച്ച് ഹീലിയത്തിന്റെ ഭാരംകുറഞ്ഞ ഐസോടോപ്പ് രൂപം കൊള്ളുന്നു. പ്രവർത്തനം [13.29(c)] യിൽ, രണ്ട് ഡ്യൂട്ടറോണുകൾ യോജിച്ച് ഒരു ട്രിഷിയവും ഒരു പ്രോട്ടോണുമാണ് ഉണ്ടാകുന്നത്. ഈ പ്രവർത്തനങ്ങളിലെല്ലാം, പോസിറ്റീവ് ചാർജുള്ള രണ്ട് കണങ്ങൾ കൂടിച്ചേർന്ന് ഒരു വലിയ ന്യൂക്ലിയസുണ്ടാവുകയാണ് ചെയ്യുന്നത്. ഫ്യൂഷൻ ഉണ്ടാകണമെങ്കിൽ ആകർഷണ സ്വഭാവം പ്രദർശിപ്പിക്കുന്നതും പ്രവർത്തന ദൂരപരിധി വളരെ കുറവായിട്ടുള്ളതുമായ ന്യൂക്ലിയാർ ബലത്തിനു വിധേയമാകത്തക്കവിധത്തിൽ രണ്ടു ന്യൂക്ലിയസുകൾ വളരെ അടുത്തു വരേണ്ടതുണ്ട്. എന്നാൽ ഇവ രണ്ടും പോസിറ്റീവ് ചാർജുകൾ ഉള്ളവയായതിനാൽ അവയ്ക്കിടയിൽ കൂളോം വികർഷണ ബലമുണ്ടാകും. ഈ വികർഷണബലത്തെ അതിജീവിച്ച് ഇതു സാധ്യമാകണമെങ്കിൽ അവയ്ക്ക് വളരെ ഉയർന്ന ഊർജം ഉണ്ടാവണം.

കൂളോം ബാരിയറിന്റെ ഉയരം പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിലേർപ്പെടുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ചാർജുകളെയും ആരങ്ങളെയും ആശ്രയിക്കുന്നു. ഉദാഹരണമായി, രണ്ട്

പ്രോട്ടോണുകളുടെ ബാരിയർ ഉയരം ഏകദേശം 400 keV ആണ്. കൂടുതൽ ചാർജുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ബാരിയർ ഉയരവും കൂടുതലായിരിക്കും. പ്രോട്ടോൺ വാതകത്തിലെ പ്രോട്ടോണുകൾക്ക് കൂളോം ബാരിയർ മറികടക്കുന്നതിന് ആവശ്യമായ താപനില $(3/2)kT = 400$ keV എന്ന രീതിയിൽ ഏകദേശം 3×10^9 K ആയിരിക്കും.

കൂളോം ബാരിയർ മറികടക്കാവുന്ന അത്രയും ഊർജം അവയുടെ തെർമൽ ചലനത്തിലൂടെ മാത്രം കണികകൾക്ക് ലഭിക്കുന്ന തരത്തിൽ പദാർഥത്തിന്റെ താപനില ഉയർത്തേണ്ടി വരും. ഈ താപനില ഉയർത്തൽ പ്രക്രിയ മൂലം ഇത്തരം പ്രവർത്തനത്തെ തെർമോന്യൂക്ലിയാർ ഫ്യൂഷൻ (thermonuclear fusion) എന്നു പറയുന്നു.

സൂര്യന്റെ അകക്കാമ്പിലെ താപനില ഏകദേശം 1.5×10^7 K ആണ്. അതിനാൽ, പ്രോട്ടോണുകളുടെ ശരാശരി ഊർജത്തേക്കാൾ വളരെ ഉയർന്ന ഊർജമുള്ള പ്രോട്ടോണുകൾ ഉൾപ്പെട്ടാൽ മാത്രമേ സൂര്യനിൽപ്പോലും ഫ്യൂഷൻ നടക്കുകയുള്ളൂ.

അതായത്, തെർമോന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനം നടക്കണമെങ്കിൽ, സൂര്യനുൾപ്പെടെയുള്ള നക്ഷത്രങ്ങളുടെ ഉൾഭാഗത്ത് ലഭ്യമായ അത്രയും ഉയർന്ന താപനിലയും മർദ്ദവും ആവശ്യമാണ്. നക്ഷത്രങ്ങളിൽ ഊർജോൽപാദനം നടക്കുന്നത് തെർമോന്യൂക്ലിയാർ ഫ്യൂഷൻ മൂലമാണ്.

സൂര്യനിലെ ഫ്യൂഷൻ പ്രവർത്തനം ഒന്നിലധികം ഘട്ടങ്ങളുള്ള ഒരു പ്രക്രിയയാണ്. ഈ പ്രക്രിയയിൽ ഹൈഡ്രജൻ ജ്വലിച്ച് ഹീലിയമായിത്തീരുന്നു. അതുകൊണ്ട് സൂര്യനിലെ 'ഇന്ധനം' ഹൈഡ്രജനാണെന്നു പറയാം.

താഴെ കൊടുത്ത ഘട്ടങ്ങൾ ഉൾക്കൊള്ളുന്ന പ്രവർത്തനങ്ങളിലൂടെയുള്ള പ്രോട്ടോൺ പ്രോട്ടോൺ സൈക്കിളിലൂടെയാണിത് സംഭവിക്കുന്നത്.

$${}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + e^+ + \nu + 0.42\ \mathrm{MeV} \qquad \text{(i)}$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma + 1.02\ \mathrm{MeV} \qquad \text{(ii)}$$

$${}_1^2\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3\mathrm{He} + \gamma + 5.49\ \mathrm{MeV} \qquad \text{(iii)}$$

$${}_2^3\mathrm{He} + {}_2^3\mathrm{He} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} + 12.86\ \mathrm{MeV} \qquad \text{(iv)} \qquad (13.30)$$

നാലാമത്തെ പ്രവർത്തനം നടക്കാൻ ആദ്യ മൂന്നു പ്രവർത്തനങ്ങൾ രണ്ടു തവണ നടക്കേണ്ടതുണ്ട്. 2(i)+2(ii)+2(iii)+(iv) എന്ന സംയോജനം പരിഗണിക്കുകയാണെങ്കിൽ, ആകെ ഫലം ഇതാണ്

$$4\,{}_1^1\mathrm{H} + 2e^- \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2\nu + 6\gamma + 26.7\ \mathrm{MeV}$$

അല്ലെങ്കിൽ $(4\,{}_1^1\mathrm{H} + 4e^-) \rightarrow ({}_2^4\mathrm{He} + 2e^-) + 2\nu + 6\gamma + 26.7\ \mathrm{MeV}$ (13.31)

അതായത്, നാല് ഹൈഡ്രജൻ ആറ്റങ്ങൾ കൂടിച്ചേർന്ന് ഒരു ഹീലിയം ആറ്റം ഉണ്ടാവുകയും 26.7 MeV ഊർജം പുറത്തുവിടുകയും ചെയ്യുന്നു.

സൂര്യന്റെ അകക്കാമ്പിലെ ഹൈഡ്രജന്റെ ജ്വലനം, വിശാല അർഥത്തിൽ ഒരു മൂലകത്തെ മറ്റൊന്നാക്കി മാറ്റുന്ന രാസവിദ്യയാണ്. ഇത് 5×10^9 വർഷങ്ങളായി തുടർന്നുകൊണ്ടിരിക്കുന്നുവെന്നും, ഭാവിയിൽ ഏതാണ്ട് ഇത്രയും കാലം സൂര്യനെ ജ്വലിപ്പിക്കാനാവശ്യമായ ഹൈഡ്രജൻ അവിടെയുണ്ടെന്നും കണക്കുകൾ സൂചിപ്പിക്കുന്നു. 5 ബില്യൺ വർഷങ്ങൾക്കകം, സൂര്യന്റെ അകക്കാമ്പ് ഹീലിയത്താൽ നിറയുകയും, തണുക്കാൻ തുടങ്ങുകയും, സൂര്യൻ അതിന്റെ ഗുരുത്വബലത്താൽ ചുരുങ്ങാൻ തുടങ്ങുകയും ചെയ്യും. ഇത് അകക്കാമ്പിന്റെ താപനില വർധിക്കുന്നതിനും അതിന്റെ

പുറം വലയം വികസിക്കുന്നതിനും, സൂര്യനെ ചുവപ്പുഭീമൻ (Red giant) എന്ന അവസ്ഥയിലെത്തിക്കുന്നതിനും കാരണമാകുന്നു.

അകക്കാമ്പിന്റെ താപനില 10^8K നിലേക്ക് വീണ്ടും വർധിക്കുമ്പോൾ, ഒരിക്കൽ കൂടി ഫ്യൂഷനിലൂടെ ഊർജോൽപാദനം സാധ്യമാകുന്നു ഇത്തവണ ഹീലിയം ജ്വലനത്തിലൂടെ കാർബണായി മാറുന്നതുകൊണ്ടാണെന്നു മാത്രം. ഒരു നക്ഷത്രം അതിന്റെ പരിണാമപ്രക്രിയകളിലൂടെ കടന്നുപോകുകയും അതോടൊപ്പം കൂടുതൽ ചൂടുള്ളതാവുകയും ചെയ്യുമ്പോൾ മറ്റു ഫ്യൂഷൻ പ്രവർത്തനങ്ങളിലൂടെ കൂടുതൽ മൂലകങ്ങൾ ഉണ്ടാകുന്നു. എങ്കിലും, ചിത്രം 13.1 ൽ കാണുന്ന ബന്ധന ഊർജ ഗ്രാഫിലെ ഉയർന്ന ഭാഗത്തോടു ചേർന്നുള്ള മൂലകങ്ങളെക്കാൾ മാസുള്ളവ പിന്നീടുള്ള ഫ്യൂഷൻ മുഖേന നിർമിക്കാൻ സാധിക്കില്ല.

ന്യൂക്ലിയാർ സർവനാശം (NUCLEAR HOLOCAUST)

ഒരൊറ്റ യുറേനിയം ഫിഷനിൽ ഏകദേശം 0.9×235 MeV (≈200 MeV) ഊർജം പുറത്തുവിടുന്നുണ്ട്.

50 kg യുറേനിയം 235 ന്റെ ഓരോ ന്യൂക്ലിയസും ഫിഷനു വിധേയമാകുമ്പോൾ അതിൽ ഉൾപ്പെടുന്ന ഊർജം ഏകദേശം 4 10^{15}J ആണ്. 20,000 ടൺ TNT യ്ക്ക് സമാനമായ ഈ ഊർജം ഒരു അതിശക്തസ്ഫോടനത്തിന് പര്യാപ്തമാണ്. വലിയ അളവിലുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ഊർജത്തിന്റെ അനിയന്ത്രിതമായ ഉത്സർജനത്തെയാണ് ആറ്റോമികസ്ഫോടനമെന്നു പറയുന്നത്. 1945 ആഗസ്റ്റ് 6ന് യുദ്ധമുഖത്ത് ഒരു ആറ്റോമിക ഉപകരണം ആദ്യമായി ഉപയോഗിക്കപ്പെട്ടു. ജപ്പാനിലെ ഹിരോഷിമയിൽ അമേരിക്ക ആറ്റംബോംബ് ഇട്ടു. ഈ സ്ഫോടനം 20.000 ടൺ TNTയ്ക്ക് സമാനമായതായിരുന്നു. ഉടൻ തന്നെ 3,43.000 നിവാസികൾ ഉണ്ടായിരുന്ന നഗരത്തിന്റെ 10 sq km പ്രദേശം റേഡിയോക്ടീവ് ഉൽപന്നങ്ങളാൽ നശിപ്പിക്കപ്പെടുകയും ചെയ്തു. ഇതിൽ 66,000 പേർ കൊല്ലപ്പെടുകയും 69,000 പേർക്ക് പരിക്കേൽക്കുകയും, നഗരത്തിന്റെ 67% ഭാഗം നശിപ്പിക്കപ്പെടുകയും ചെയ്തു.

ഫ്യൂഷൻ പ്രവർത്തനത്തിനാവശ്യമായ ഉന്നത താപനില സൃഷ്ടിക്കുന്നത് ഒരു ഫിഷൻബോംബ് പൊട്ടിച്ചുകൊണ്ടാണ്. 1954ൽ 10 മെഗാടൺ TNT യുടെ സ്ഫോടനപവറിന് സമാനമായ വൻസ്ഫോടനങ്ങൾ പരീക്ഷിക്കപ്പെട്ടു. ഇത്തരം ബോംബുകളിൽ ഹൈഡ്രജന്റെ ഐസോടോപ്പുകളായ ഡ്യൂട്ടീരിയം,ട്രിഷിയം എന്നിവയുടെ ഫ്യൂഷനാണുള്ളത്, ഇവയെ ഹൈഡ്രജൻ ബോംബ് എന്നു വിളിക്കുന്നു. ഈ ഗ്രഹത്തിലെ ജീവന്റെ എല്ലാ രൂപങ്ങളെയും പലതവണ നശിപ്പിക്കുന്നതിന് ഒരു ആണവ ആയുധപ്പുര മതിയാകുമെന്നു കണക്കാക്കുന്നു. ഇത്തരം ഒരു ആണവനശീകരണം ഇപ്പോഴുള്ള ജീവവർഗങ്ങളെ നശിപ്പിക്കുമെന്ന് മാത്രമല്ല, അതിന്റെ റേഡിയോആക്ടീവ് അണുപ്രസരം ഈ ഗ്രഹത്തെ ജീവന് എക്കാലത്തും നിരുപയോഗപ്രദമാക്കുകയും ചെയ്യും. സൈദ്ധാന്തികമായ കണക്കുകൂട്ടലുകളുടെ അടിസ്ഥാനത്തിൽ ഇത്തരം സ്ഫോടനങ്ങൾ ഒരു ദീർഘ ഹേമന്തം ഉണ്ടാകുവാനുള്ള സാഹചര്യങ്ങൾ പ്രവചിക്കുന്നു, റേഡിയോആക്ടീവ് അവശിഷ്ടങ്ങൾ ഒരു മേഘം പോലെ ഭൂമിയുടെ അന്തരീക്ഷത്തിൽ തങ്ങിനിൽക്കുകയും സൂര്യവികിരണങ്ങളെ ആഗിരണം നടത്തുകയും ചെയ്യുന്നതാണ് ഈ സാഹചര്യം ഉണ്ടാക്കുന്നത്.

13.7.4 നിയന്ത്രിത തെർമോന്യൂക്ലിയാർ ഫ്യൂഷൻ (Controlled thermonuclear fusion)

ഒരു തെർമോ ന്യൂക്ലിയാർഫ്യൂഷൻ റിയാക്ടർ (ഉപകരണം) പ്രവർത്തിക്കണമെങ്കിൽ തെർമോ ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനം നടക്കുന്ന നക്ഷത്രാന്തരഭാഗങ്ങളിലെ സാഹചര്യം സൃഷ്ടിക്കേണ്ടിവരും. നിയന്ത്രിത ഫ്യൂഷൻ റിയാക്ടറുകളിൽ 10^8 K എന്ന തോതിലുള്ള ഉയർന്ന താപനില കൈവരിച്ചിട്ടുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ഇന്ധനം ഉപയോഗിച്ച് തുടർച്ചയായി വൈദ്യുത ഉൽപാദനമാണ് ലക്ഷ്യമിടുന്നത്. ഇത്രയും ഉയർന്ന താപനിലയിൽ ഇന്ധനം പോസിറ്റീവ് അയോണുകളും ഇലക്ട്രോണുകളും നിറഞ്ഞ പ്ലാസ്മ അവസ്ഥയിലായിരിക്കും. ഈ ഉന്നത താപനിലയെ അതിജീവിക്കാനും പ്ലാസ്മയെ ഉൾക്കൊള്ളാനും പര്യാപ്തമായ അറകളോ കവചങ്ങളോ ഇതേവരെ ശാസ്ത്രലോകത്തിനു കണ്ടെത്തുവാൻ കഴിഞ്ഞിട്ടില്ല. അതുകൊണ്ട് പ്ലാസ്മയുടെ ശേഖരണം ഇന്നും ഒരു വലിയ കടമ്പയായി നിൽക്കുന്നു. ഭാരത മുൾപ്പെടെയുള്ള ധാരാളം രാജ്യങ്ങൾ ഈ രംഗത്ത് ധാരാളം ഗവേഷണങ്ങൾ നടത്തി വരുന്നു. ഗവേഷണം ഫലപ്രാപ്തിയിലെത്തിയാൽ അത് മാനവരാശിക്ക് ഊർജസ്രോതസ്സിന്റെ അനന്തമായ ഉറവിടം സമ്മാനിക്കും.

ഉദാഹരണം 13.7: താഴെ കൊടുത്തിരിക്കുന്ന ചോദ്യങ്ങൾക്ക് ഉത്തരം കണ്ടെത്തുക

(a) രാസ സമവാക്യങ്ങൾ പോലെ (ഉദാ: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O$) ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങളുടെ [സമവാക്യം (13.7) ലേതുപോലെ] സമവാക്യങ്ങളും സമീകൃതമാണോ? അല്ലെങ്കിൽ, എന്ത് അർത്ഥത്തിലാണ് അവ ഇരുവശത്തും സമീകൃതമാകുന്നത്?

(b) ഓരോ ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനത്തിലും പ്രോട്ടോണുകളുടെ എണ്ണവും ന്യൂട്രോണുകളുടെ എണ്ണവും സംരക്ഷിക്കപ്പെടുന്നുവെങ്കിൽ, ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനത്തിൽ മാസിനെ ഏതു വിധത്തിലാണ് ഊർജമായി (തിരിച്ചും) മാറ്റുന്നത്?

(c) മാസ് ഊർജ പരസ്പരപരിവർത്തനം സംഭവിക്കുന്നത് ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങളിലൂടെ മാത്രമാണെന്നും രാസപ്രവർത്തനങ്ങളിലൂടെ സാധ്യമല്ലെന്നുമുള്ളത് ഒരു പൊതു ധാരണയാണ്. കൃത്യമായി പറഞ്ഞാലിത് ശരിയല്ല. വിശദീകരിക്കുക.

ഉത്തരം:

(a) ഒരു രാസസമവാക്യം സമീകൃതമാകുന്നത്, ഓരോ മൂലകത്തിന്റെയും ആറ്റങ്ങളുടെ എണ്ണം സമവാക്യത്തിന്റെ ഇരുവശങ്ങളിലും തുല്യമാകുമ്പോഴാണ്. ഒരു രാസപ്രക്രിയ ആറ്റത്തിന്റെ യഥാർത്ഥ ചേരുവകളെ മാത്രം മാറ്റുന്നു. ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനത്തിൽ മൂലകങ്ങൾ തന്നെ മാറ്റപ്പെടാം. അതിനാൽ, ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങളിൽ ഓരോ മൂലകത്തിലെയും ആറ്റങ്ങളുടെ എണ്ണം സംരക്ഷിക്കപ്പെടണമെന്നില്ല. എന്നാൽ, ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങളിൽ പ്രോട്ടോണുകളുടെയും ന്യൂട്രോണുകളുടെയും എണ്ണങ്ങൾ പ്രത്യേകം സംരക്ഷിക്കപ്പെടുന്നു.

(b) ബന്ധന ഊർജം ഒരു ന്യൂക്ലിയസിനെ സംബന്ധിച്ചിടത്തോളം ഒരു മാസ് ശോഷക പ്രഭാവമാണ്. അതായത് മാസ്സിനെ കുറയ്ക്കുന്ന പ്രഭാവം (Mass Defect). ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിൽ ന്യൂട്രോണുകളുടെയും പ്രോട്ടോണുകളുടെയും എണ്ണം സംരക്ഷിക്കപ്പെട്ടിരിക്കുന്നതിനാൽ ന്യൂക്ലിയാർ സമവാക്യത്തിന്റെ വലതു ഭാഗത്തും ഇടതു ഭാഗത്തും കാണപ്പെടുന്ന ന്യൂട്രോണുകളുടെ മൊത്തം സ്ഥിതമാസ്സിനും, പ്രോട്ടോണുകളുടെ മൊത്തം സ്ഥിതമാസിനും വ്യതിയാനമുണ്ടാവുകയില്ല. അതേ സമയം സമവാക്യത്തിന്റെ ഇടതുവശത്തും വലതുവശത്തും കാണപ്പെടുന്ന ന്യൂക്ലിയസ്സുകളുടെ ബന്ധനഊർജം സമമായിരിക്കുകയില്ല. ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ വ്യത്യാസം ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനം നടക്കുമ്പോൾ പുറത്തുവിടുന്നതോ ആഗീകരണം ചെയ്യുന്നതോ ആയ ഊർജത്തിനു തുല്യമായിരിക്കും. ബന്ധനഊർജം മാസിന്റെ തന്നെ മറ്റൊരു രൂപമായതിനാൽ സമവാക്യത്തിന്റെ ഇരുവശങ്ങളിലുമുള്ള ന്യൂക്ലിയസ്സുകളുടെ മാസ്സിലെ വ്യതിയാനം മാസ്സ് ഊർജമായി മാറ്റപ്പെട്ടതോ അല്ലെങ്കിൽ ഊർജം മാസായി രൂപാന്തരപ്പെട്ടതോ കൊണ്ടാകാം എന്നു പറയാനാകും. അതുകൊണ്ട് ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തെ മാസ്- ഊർജ പരസ്പര മാറ്റത്തിന്റെ ഒരുദാഹരണമായി കണക്കാക്കാൻ കഴിയും.

(c) മാസ്- ഊർജ പരസ്പരമാറ്റ പ്രക്രിയയുടെ വീക്ഷണകോണിൽ നിന്നും പരിശോധിക്കുമ്പോൾ രാസപ്രതിപ്രവർത്തനവും ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനവും താത്വീകമായി സമാനമാണെന്നു പറയാം. ഒരു രാസപ്രവർത്തനം നടക്കുമ്പോൾ ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്നതോ ആഗിരണം ചെയ്യപ്പെടുന്നതോ ആയ ഊർജത്തിന്റെ അളവ് രാസസമീകരണത്തിന്റെ ഇരുവശത്തുള്ള ആറ്റങ്ങളുടെയോ അല്ലെങ്കിൽ തന്മാത്രകളുടെയോ രാസബന്ധനോർജത്തിന്റെ വ്യത്യാസമാണ്. രാസബന്ധനോർജവും ആറ്റത്തിന്റെ/തന്മാത്രയുടെ മാസ്സിനെ കുറയ്ക്കുന്ന (മാസ്സ് ശോഷണ) സവിശേഷതയാണ്. അതിനാൽ രാസസമീകരണത്തിന്റെ ഇരുവശത്തുമുള്ള ആറ്റങ്ങളുടെയോ, തന്മാത്രകളുടെയോ മാസ്സിലുള്ള വ്യത്യാസമാണ് ഊർജമായി പരിണമിച്ചിട്ടുള്ളതെന്നു പറയുന്നതിൽ തെറ്റില്ല. പക്ഷേ രാസമാറ്റം മൂലം ഉണ്ടാകുന്ന മാസ്സ് ശോഷണം (mass defect) ന്യൂക്ലിയാർ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിലുണ്ടാകുന്ന മാസ് ശോഷണ (mass defect) ത്തിന്റെ ദശലക്ഷത്തിൽ ഏതാനും ഭാഗം മാത്രമേ വരൂ. അതുകൊണ്ടാണ് രാസമാറ്റത്തിൽ മാസ്- ഊർജ പരസ്പരമാറ്റം ഉണ്ടാകുന്നില്ല എന്ന ധാരണ (യഥാർഥത്തിൽ അങ്ങനെ അല്ലെങ്കിൽ കൂടി) വ്യാപകമായത്.

ഉദാഹരണം 13.7

സംഗ്രഹം

1. ഒരു ആറ്റത്തിന് ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് ഉണ്ട്. ആ ന്യൂക്ലിയസിന് പോസിറ്റീവ് ചാർജാണുള്ളത്. ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആരം ആറ്റത്തിന്റേതിന്റെ 10^4 ഭാഗം മാത്രമാണ്. ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ 99.9%വും കേന്ദ്രീകരിക്കപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത് ന്യൂക്ലിയസിലാണ്.
2. അറ്റോമിക ഏകകത്തിൽ, മാസ് അളക്കുന്നത് അറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റ് (u) ആയാണ്. നിർവചനപ്രകാരം, 1 അറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റ് (1u) എന്നത് ഒരു ^{12}C ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ 1/12 ആണ്. 1u = 1.660563×10^{-27} kg.
3. ന്യൂക്ലിയസിൽ ന്യൂട്രോൺ എന്നു പറയുന്ന ന്യൂട്രൽ കണമുണ്ട്. അതിന്റെ മാസ് ഏറെക്കുറെ പ്രോട്ടോണിന്റെ മാസിന് തുല്യമാണ്.
4. അറ്റോമികനമ്പർ Z എന്നത് ഒരു മൂലകത്തിന്റെ ആറ്റോമികന്യൂക്ലിയസിലില്ള പ്രോട്ടോണുകളുടെ എണ്ണമാണ്. മാസ് നമ്പർ A അറ്റോമികന്യൂക്ലിയസിലെ പ്രോട്ടോണുകളുടെയും ന്യൂട്രോണുകളുടെയും ആകെ എണ്ണമാണ്, A = Z + N; N എന്നത് ന്യൂട്രോണുകളുടെ എണ്ണത്തെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു. ഒരു ന്യൂക്ലൈഡിനെ അടയാളപ്പെടുത്തുന്നത് $^{A}_{Z}X$

   എന്നാണ്. ഇതിൽ X ന്യൂക്ലിയസിന് ആധാരമായ ആറ്റത്തിന്റെ രാസപ്രതീകമാണ്. ഒരേ അറ്റോമികനമ്പർ (Z) ഉള്ളതും വ്യത്യസ്ത ന്യൂട്രോൺ നമ്പർ (N) ഉള്ളതുമായ ന്യൂക്ലൈഡുകളെ ഐസോടോപ്പുകൾ എന്നു പറയുന്നു. ഒരേ A ഉള്ള ന്യൂക്ലൈഡുകളെ ഐസോബാറുകൾ എന്നും ഒരേ N ഉള്ളവയെ ഐസോടോണുകൾ എന്നും പറയുന്നു. മിക്ക മൂലകങ്ങളും രണ്ടോ അതിലധികമോ ഐസോടോപ്പുകളുടെ മിശ്രിതമാണ്. ഒരു മൂലകത്തിന്റെ അറ്റോമികമാസ് അതിന്റെ ഐസോടോപ്പുകളുടെ മാസുകളുടെ വെയ്റ്റഡ് ആവറേജ് ആണ്. ഐസോടോപ്പുകളുടെ ആപേക്ഷിക ലഭ്യതയാണ് ഈ മാസുകൾ.
5. ന്യൂക്ലിയസിനെ ഗോളാകൃതിയിലുള്ളതായി പരിഗണിക്കുക. ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആരം കണ്ടെത്താൻ ഇലക്ട്രോൺ വിസരണപരീക്ഷണം ഉപയോഗിക്കാം; ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ആരങ്ങൾക്ക് കൊടുക്കാവുന്ന സൂത്രവാക്യം $R = R_0 A^{1/3}$ എന്നാണ്. ഇതിൽ R_0 = ഒരു സ്ഥിരസംഖ്യ = 1.2 fm. ഇത് സൂചിപ്പിക്കുന്നത് ന്യൂക്ലിയാർ സാന്ദ്രത A യെ ആശ്രയിക്കുന്നില്ലായെന്നാണ്. ന്യൂക്ലിയാർ സാന്ദ്രത 10^{17} kg/m³ എന്ന അളവിന്റെ തോതിലാണ് കാണപ്പെടുന്നത്.
6. ഹ്രസ്വദൂരപരിധിയുള്ള ന്യൂക്ലിയാർ ബലം കൊണ്ടാണ് ന്യൂട്രോണുകളും പ്രോട്ടോണുകളും ബന്ധിപ്പിക്കപ്പെടുന്നത്. ന്യൂക്ലിയാർ ബലം ന്യൂട്രോണിലും പ്രോട്ടോണിലും ഒരുപോലെ അനുഭവപ്പെടുന്നു.
7. ന്യൂക്ലിയാർ മാസ് M എപ്പോഴും അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെ ആകെ മാസ് (Σm) നേക്കാൾ കുറവായിരിക്കും. ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും അതിന്റെ ഘടകങ്ങളുടെയും മാസുകൾ തമ്മിലുള്ള വ്യത്യാസമാണ് മാസ് ന്യൂനത

   $$\Delta M = (Z m_p + (A - Z) m_n) - M$$

   ഐൻസ്റ്റൈന്റെ മാസ്ഊർജ ബന്ധം ഉപയോഗിച്ച്, ഈ മാസ് വ്യത്യാസത്തെ ഊർജമായി ഇങ്ങനെ എഴുതാം

   $$\Delta E_b = \Delta M c^2$$

   ΔE_b എന്നത് ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ബന്ധന ഊർജത്തെ പ്രതിനിധീകരിക്കുന്നു. മാസ് നമ്പർ A = 30 മുതൽ 170, വരെ പ്രതിന്യൂക്ലിയോണിന്റെ ബന്ധനഊർജം ഏറെക്കുറെ സ്ഥിരമായിരിക്കും, ഏകദേശം 8 MeV/ന്യൂക്ലിയോൺ ആയിരിക്കുമിത്.
8. ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങളുമായി ബന്ധപ്പെട്ട ഊർജങ്ങൾ രാസപ്രവർത്തനങ്ങളിലേതിനേക്കാൾ ദശലക്ഷം മടങ്ങ് കൂടുതലാണ്.
9. ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രക്രിയയുടെ Q മൂല്യം, Q = അവസാന ഗതികോർജം - തുടക്ക ഗതികോർജം, എന്ന് ഊർജസംരക്ഷണനിയമപ്രകാരം എഴുതാം,

   Q = (തുടക്കമാസുകളുടെ തുക - അവസാന മാസുകളുടെ തുക) c^2
10. ചില പ്രത്യേക ന്യൂക്ലിയസുകൾ α, β, γ കിരണങ്ങൾ പുറത്തേക്കുവിട്ടുകൊണ്ട് മറ്റൊന്നായി മാറുന്ന പ്രതിഭാസമാണ് റേഡിയോആക്ടിവിറ്റി. α കിരണങ്ങൾ ഹീലിയം ന്യൂക്ലിയസുകളാണ്, β കിരണങ്ങൾ

ഇലക്ട്രോണുകളും. γ വികിരണങ്ങൾ X-കിരണങ്ങളേക്കാൾ തരംഗദൈർഘ്യം കുറഞ്ഞ വൈദ്യുത കാന്തികവികിരണങ്ങളാണ്.

11. റേഡിയോആക്ടീവ് ശോഷണനിയമം: $N(t) = N(0)\,e^{-\lambda t}$

ഇതിൽ λ ശോഷണസ്ഥിരാങ്കം എന്നറിയപ്പെടുന്നു. ഒരു റേഡിയോ ന്യൂക്ലൈഡിന്റെ അർധായുസ്സ് $T_{1/2}$ എന്നത് N അതിന്റെ തുടക്കമൂല്യത്തിന്റെ പകുതിയാകാൻ വേണ്ട സമയമാണ്. ശരാശരി ആയുസ്സ് τ എന്നത് N അതിന്റെ തുടക്കമൂല്യത്തിന്റെ $e^{-1}\left(=\frac{1}{e}\right)$ ആയി കുറയാനെടുക്കുന്ന സമയമാണ്.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

12. ദൃഢത കുറഞ്ഞ ബന്ധനാവസ്ഥയിലുള്ള ന്യൂക്ലിയസ് ദൃഢമായി ബന്ധിപ്പിക്കപ്പെട്ട ന്യൂക്ലിയസായി മാറുമ്പോൾ ഊർജം പുറത്തുവിടുന്നു. ഫിഷനിൽ, ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ പോലുള്ള ഭാരമേറിയ ന്യൂക്ലിയസ് രണ്ട് ചെറിയ ന്യൂക്ലിയസുകളായി മാറുന്നു.

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{133}_{51}\mathrm{Sb} + ^{99}_{41}\mathrm{Nb} + 4\,^{1}_{0}\mathrm{n}$$

13. ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്ന ന്യൂട്രോണുകളേക്കാൾ കൂടുതൽ സ്വതന്ത്ര ന്യൂട്രോണുകൾ ഫിഷൻ പ്രക്രിയയിൽ ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുകയാണെങ്കിൽ അത് ശൃംഖലാ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിനുള്ള സാധ്യത നൽകുന്നു. അതിൽ ഓരോ ന്യൂട്രോണും മറ്റൊരു ഫിഷൻ തുടങ്ങിവെയ്ക്കുന്നു. ന്യൂക്ലിയാർ സ്ഫോടനത്തിൽ ശൃംഖലാ പ്രതിപ്രവർത്തനം നിയന്ത്രണാതീതവും ദ്രുതഗതിയിലുള്ളതുമായിരിക്കും. എന്നാൽ ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ റിയാക്ടറിൽ, അത് നിയന്ത്രണവിധേയവും സുസ്ഥിരവും ആയിരിക്കും. റിയാക്ടറിൽ ന്യൂട്രോൺ ഗുണനഘടകം K യുടെ മൂല്യം 1 ആയി നിലനിർത്തുന്നു.

14. ഫ്യൂഷനിൽ, ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾ കൂടിച്ചേർന്ന് വലിയ ന്യൂക്ലിയസായി മാറുന്നു. സൂര്യനുൾപ്പെടെ എല്ലാ നക്ഷത്രങ്ങളിലും ഊർജത്തിന്റെ ഉറവിടം ഹൈഡ്രജൻ ന്യൂക്ലിയസുകൾ ഹീലിയമായി മാറുന്ന ഫ്യൂഷൻ പ്രക്രിയയാണ്.

ഭൗതിക അളവ്	പ്രതീകം	ഡൈമെൻഷൻ	യൂണിറ്റ്	പരാമർശം
അറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റ്	u	[M]	u	ആറ്റത്തിന്റെയും ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും മാസുകൾ സൂചിപ്പിക്കുന്നതിനുള്ള യൂണിറ്റ്. ഒരു ^{12}C ആറ്റത്തിന്റെ മാസിന്റെ 1/12 ഭാഗമാണ് ഒരു അറ്റോമിക് മാസ് യൂണിറ്റ്.
ശോഷണസ്ഥിരാങ്കം	λ	$[T^{-1}]$	s^{-1}	
അർധായുസ്	$T_{1/2}$	[T]	s	ഒരു റേഡിയോ ആക്ടീവ് സാമ്പിളിൽ തുടക്കത്തിൽ ഉണ്ടായിരുന്ന ന്യൂക്ലിയസുകൾ അതിന്റെ പകുതിയായി ശോഷിക്കാനെടുക്കുന്ന സമയം
ശരാശരി ആയുസ്	τ	[T]	s	ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ എണ്ണം അതിന്റെ തുടക്കമൂല്യത്തിന്റെ e^{-1} ആയി കുറയാനെടുക്കുന്ന സമയമാണ്.
ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് സാമ്പിളിന്റെ ആക്റ്റിവിറ്റി	R	$[T^{-1}]$	Bq	ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് സ്രോതസ്സിന്റെ ആക്റ്റിവിറ്റിയുടെ അളവ്

വിചിന്തന വിഷയങ്ങൾ

1. ന്യൂക്ലിയാർ ദ്രവ്യത്തിന്റെ സാന്ദ്രത അതിന്റെ വലുപ്പത്തിനെ ആശ്രയിക്കുന്നില്ല. എന്നാൽ ഒരു ആറ്റത്തിന്റെ മാസ് സാന്ദ്രത ഇങ്ങനെയല്ല

2. ഇലക്ട്രോൺ വിസരണത്തിലൂടെ കണ്ടെത്തിയ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ ആരം, ആൽഫാ വിസരണ പരീക്ഷണത്തിലൂടെ കണ്ടെത്തിയതിൽ നിന്ന് നേരിയ തോതിൽ വ്യത്യസ്തമാണ്. ഇതിന് കാരണം ഇലക്ട്രോൺ വിസരണം ന്യൂക്ലിയസിലെ ചാർജിന്റെ വിതരണത്തെ ആശ്രയിക്കുമ്പോൾ ആൽഫയും അതുപോലെയുള്ള മറ്റ് കണങ്ങളും ന്യൂക്ലിയാർ ദ്രവ്യത്തെയാണ് ആശ്രയിക്കുന്നത് എന്നതാണ്.

3. ആൽബർട്ട് ഐൻസ്റ്റൈൻ മാസ്ഊർജ തുല്യത $E=mc^2$ തെളിയിച്ചു, മാസിന്റെയോ ഊർജത്തിന്റെയോ വെവ്വേറെ സംരക്ഷണ നിയമങ്ങളെക്കുറിച്ച് ഇനി നാം സംസാരിക്കുന്നതിൽ അർത്ഥമില്ല, മറിച്ച് മാസിന്റെയും ഊർജത്തിന്റെയും കൂടിച്ചേർന്ന സംരക്ഷണ നിയമത്തെക്കുറിച്ച് പറയേണ്ടതായുണ്ട്. ഈ നിയമത്തിന്റെ ഏറ്റവും ബോധ്യപ്പെടാവുന്ന തെളിവ് ന്യൂക്ലിയാർ ഫിസിക്സിലാണുള്ളത്. നമ്മുടെ ഊർജ ആവശ്യങ്ങൾക്കായി പ്രയോജനപ്പെടുത്തുന്ന ന്യൂക്ലിയാർ ഊർജത്തെക്കുറിച്ചുള്ള നമ്മുടെ അറിവിന്റെ കേന്ദ്ര ബിന്ദു ഇതാണ്. ഈ തത്വം ഉപയോഗിച്ച് ഒരു ന്യൂക്ലിയാർ പ്രക്രിയയുടെ (ശോഷണം അല്ലെങ്കിൽ പ്രതിപ്രവർത്തനം) Q മൂല്യം അതിലെ തുടക്കമാസിന്റെയും അവസാന മാസിന്റെയും പദങ്ങളിൽ രേഖപ്പെടുത്താവുന്നതാണ്.

4. ബന്ധന ഊർജ (പ്രതി ന്യൂക്ലിയോണിന്റെ) ഗ്രാഫ് കാണിക്കുന്നത് താപമോചക ന്യൂക്ലിയാർ പ്രവർത്തനങ്ങൾ സാധ്യമാണെന്നാണ്. ഇത് ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾ കൂടിച്ചേർന്ന് ഒന്നാകുമ്പോഴോ, വലിയ ന്യൂക്ലിയസ് വിഭജിക്കപ്പെട്ട് ഇടത്തരം ന്യൂക്ലിയസുകൾ രൂപം കൊള്ളുമ്പോഴോ സംഭവിക്കാം.

5. ഫ്യൂഷൻ നടക്കണമെങ്കിൽ, കൂളോം പൊട്ടൻഷ്യൽ ബാരിയർ മറികടക്കാവുന്ന തരത്തിലുള്ള ആദ്യ ഊർജം ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്ക് ഉണ്ടായിരിക്കണം. അതിനാലാണ് ഫ്യൂഷന് വളരെ ഉയർന്ന താപനില ആവശ്യമാണെന്നു പറയുന്നത്.

6. ബന്ധന ഊർജ (പ്രതി ന്യൂക്ലിയോൺ) ഗ്രാഫ് നിർബാധവും ക്രമേണ വ്യത്യാസപ്പെടുന്നതുമാണെങ്കിലും ^{4}He ^{16}O തുടങ്ങിയ ന്യൂക്ലൈഡുകളുടെ ഭാഗത്ത് ചില ഉച്ചസ്ഥാനങ്ങൾ കാണപ്പെടുന്നു. ന്യൂക്ലിയസിന് ആറ്റത്തെപ്പോലെയുള്ള ഷെൽ ഘടനയുണ്ടെന്നതിന്റെ തെളിവായി ഇത് പരിഗണിക്കപ്പെടുന്നു.

7. ഇലക്ട്രോണുകളും പോസിട്രോണുകളും ഒരു കണിക പ്രതി കണിക ജോടിയാണ്. മാസിന്റെ കാര്യത്തിൽ അവയൊരു പോലെയാണ്, ചാർജ് തുല്യവും വിപരീത സ്വഭാവമുള്ളതുമാണ്. (ഇലക്ട്രോണും പോസിട്രോണും ഒരുമിച്ച് വന്നാൽ അവ പരസ്പരം ഇല്ലാതാവുകയും പകരം ഗാമാ വികിരണ ഫോട്ടോണുകളുടെ രൂപത്തിൽ ഊർജം നിർമിക്കപ്പെടുകയും ചെയ്യുന്നു.)

8. ഒരു β (ഇലക്ട്രോൺ ഉത്സർജനം) ശോഷണത്തിൽ, ഇലക്ട്രോണിനോടൊപ്പം പുറത്തു വരുന്ന കണിക ആന്റി ന്യൂട്രിനോ ($\bar{\nu}$)യാണ്. എന്നാൽ β^- ശോഷണത്തിൽ (പോസിട്രോൺ ഉത്സർജനം) പുറത്തു വരുന്ന കണിക ന്യൂട്രിനോ (ν)യാണ്. ന്യൂട്രിനോയും ആന്റി ന്യൂട്രിനോയും കണപ്രതികണ ജോടിയാണ്. ഓരോ കണികയുമായും ബന്ധപ്പെട്ട ഒരു പ്രതി കണികയുമുണ്ട്. പ്രോട്ടോണുമായി ബന്ധപ്പെട്ട പ്രതികണം എന്തായിരിക്കും?

9. ഒരു സ്വതന്ത്ര ന്യൂട്രോൺ അസ്ഥിരമാണ് ($n \to p + e + \bar{\nu}$). എന്നാൽ ഇത്തരത്തിലുള്ള ഒരു സ്വതന്ത്ര പ്രോട്ടോൺ ശോഷണം സാധ്യമല്ല, കാരണം ന്യൂട്രോണിനേക്കാൾ നേരിയ തോതിൽ ഭാരം കുറഞ്ഞതാണ് പ്രോട്ടോൺ.

10. ഗാമാ ഉത്സർജനം സാധാരണ ഗതിയിൽ ആൽഫാ/ബീറ്റാ ഉത്സർജനത്തിനൊപ്പം സംഭവിക്കുന്നു. ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് അതിന്റെ ഉത്തേജിതാവസ്ഥയിൽ നിന്ന് താഴ്ന്ന നിലയിലേക്കു വരുന്നത് ഒരു ഗാമാ ഫോട്ടോൺ പുറത്തുവിട്ടു കൊണ്ടാണ്. ആൽഫാ/ ബീറ്റാ ഉത്സർജന ശേഷം ഒരു ന്യൂക്ലിയസ് അതിന്റെ ഉത്തേജിതാവസ്ഥയിൽ തുടരാം.അതേ ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്ന് തുടർന്നുണ്ടാകുന്ന ഗാമാ വികിരണ

ഉത്സർജനം (^{60}Ni, ചിത്രം 13.4പോലെ) സൂചിപ്പിക്കുന്നത് ന്യൂക്ലിയസുകൾക്കും ആറ്റങ്ങളെപ്പോലെ വ്യതിരിക്തമായ ഊർജ നിലകളുണ്ട് എന്നാണ്.

11. ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ അസ്ഥിരാവസ്ഥയുടെ സൂചകമാണ് റേഡിയോ ആക്ടിവിറ്റി. സ്ഥിരത കൈവരിക്കാൻ, ഭാരം കുറഞ്ഞ ന്യൂക്ലിയസുകൾക്ക് ന്യൂട്രോൺ പ്രോട്ടോൺ അനുപാതം ഏകദേശം 1:1 ആയിരിക്കണം. ഭാരമുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകൾക്ക് ഇത് ഏകദേശം 3:2 വരെയാകാം. (പ്രോട്ടോണുകൾ തമ്മിലുള്ള വികർഷണം മറികടക്കാൻ കൂടുതൽ ന്യൂട്രോണുകൾ ആവശ്യമാണ്). ഈ അനുപാതത്തിൽ നിന്നും അകലെയുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകൾ, അതായത് ന്യൂട്രോണുകളോ പ്രോട്ടോണുകളോ അധികമുള്ളവ, അസ്ഥിരമായവയാണ്. യഥാർത്ഥത്തിൽ, (എല്ലാ മൂലകങ്ങളുടെയും) അറിയപ്പെടുന്ന ഐസോടോപ്പുകളുടെ 10% മാത്രമാണ് സ്ഥിരതയുള്ളത്. മറ്റുള്ളവ ഒന്നുകിൽ α, p, d, n, തുടങ്ങിയവയെക്കൊണ്ട് സ്ഥിരതയുള്ള ന്യൂക്ലിയസുകളെ കൂട്ടിയിടിച്ചാൽ ലഭ്യമാവുന്നവയാണ്, അല്ലെങ്കിൽ പ്രപഞ്ചദ്രവ്യത്തെ സംബന്ധിച്ച ജ്യോതിശാസ്ത്ര നിരീക്ഷണങ്ങളിൽ തിരിച്ചറിഞ്ഞവയാണ്.

പരിശീലനപ്രശ്നങ്ങൾ

താഴെ കൊടുത്തിട്ടുള്ള ഡാറ്റ പരിശീലനപ്രശ്നങ്ങൾക്ക് ഉത്തരം കാണുന്നതിൽ നിങ്ങൾക്ക് സഹായകമാവും

e	$= 1.6\times10^{-19}$ C	N	$= 6.023\times10^{23}$ പ്രതി മോൾ
$1/(4\pi\varepsilon_0)$	$= 9\times10^{9}$ Nm^2/C^2	k	$= 1.381\times10^{-23}$ J K^{-1}
1 MeV	$= 1.6\times10^{-13}$ J		
1 year	$= 3.154\times10^{7}$ s	1 u	$= 931.5$ MeV/c^2
m_H	$= 1.007825$ u	m_n	$= 1.008665$ u
$m(^4_2He)$	$= 4.002603$ u	m_e	$= 0.000548$ u

13.1 (a) ലിഥിയത്തിന്റെ രണ്ട് സ്ഥിരതയുള്ള ഐസോടോപ്പുകളായ ^6_3Li, ^7_3Li എന്നിവയുടെ ലഭ്യത യഥാക്രമം 7.5%, 92.5% ആണ്. അവയുടെ മാസുകൾ 6.01512 u, 7.01600 u എന്നിങ്ങനെയും. ലിഥിയത്തിന്റെ അറ്റോമിക് മാസ് കണ്ടുപിടിക്കുക.

(b) ബോറോണിന്റെ രണ്ട് സ്ഥിരതയുള്ള ഐസോടോപ്പുകളാണ് $^{10}_5B$ ഉം $^{11}_5B$ ഉം. അവയുടെ മാസുകൾ യഥാക്രമം 10.01294 u, 11.00931 u. ബോറോണിന്റെ അറ്റോമിക മാസ് 10.811 u. $^{10}_5B$, $^{11}_5B$ എന്നിവയുടെ ലഭ്യത കണ്ടെത്തുക.

13.2 നിയോണിന്റെ മൂന്ന് സ്ഥിരതയുള്ള ഐസോടോപ്പുകളാണ് $^{20}_{10}Ne$, $^{21}_{10}Ne$, $^{22}_{10}Ne$ അവയുടെ ലഭ്യത യഥാക്രമം 90.51%, 0.27%, 9.22%. മൂന്ന് ഐസോടോപ്പുകളുടെ അറ്റോമിക മാസുകൾ യഥാക്രമം 19.99 u, 20.99 u, 21.99 u. നിയോണിന്റെ ശരാശരി അറ്റോമിക മാസ് കണ്ടെത്തുക.

13.3 നൈട്രജൻ ന്യൂക്ലിയസിന്റെ $(^{14}_7N)$ ബന്ധന ഊർജം കണ്ടെത്തുക. $m(^{14}_7N) =$ 14.00307 u

13.4 താഴെ കൊടുത്ത ഡാറ്റ ഉപയോഗിച്ച് $^{56}_{26}Fe$, $^{209}_{83}Bi$ ന്യൂക്ലിയസുകളുടെ ബന്ധന ഊർജം MeVയിൽ കണ്ടെത്തുക.

$m(^{56}_{26}Fe) = 55.934939$ u $m(^{209}_{83}Bi) = 208.980388$ u

13.5 ഒരു നാണയത്തിന് 3.0g മാസുണ്ട്. എല്ലാ ന്യൂട്രോണുകളെയും പ്രോട്ടോണുകളെയും പരസ്പരം വേർതിരിക്കാനാവശ്യമായ ന്യൂക്ലിയാർ ഊർജം കണക്കാക്കുക. എളുപ്പത്തിനായി, നാണയം പൂർണമായും നിർമിക്കപ്പെട്ടിട്ടുള്ളത് $^{63}_{29}Cu$ (62.92960 u മാസുള്ള) കൊണ്ടാണെന്ന് സങ്കൽപിക്കുക.

13.6 താഴെ കൊടുത്തിരിക്കുന്നവയുടെ ന്യൂക്ലിയാർ സമവാക്യം എഴുതുക.

(i) $^{226}_{88}Ra$ ന്റെ α ശോഷണം (ii) $^{242}_{94}Pu$ ന്റെ α ശോഷണം

(iii) $^{32}_{15}P$ ന്റെ β^- ശോഷണം (iv) $^{210}_{83}Bi$ ന്റെ β^- ശോഷണം

(v) $^{11}_{6}C$ ന്റെ β^+- ശോഷണം (vi) $^{97}_{43}Tc$ ന്റെ β^+- ശോഷണം

(vii) $^{120}_{54}Xe$ ന്റെ ഇലക്ട്രോൺ പിടിച്ചെടുക്കൽ

13.7 ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് ഐസോടോപ്പിന്റെ അർധായുസ് T വർഷങ്ങളാണ്. അതിന്റെ ആക്ടിവിറ്റി യഥാർത്ഥമൂല്യത്തിൽ നിന്നും ഇനി പറയുംപ്രകാരം കുറയാൻ എത്ര കാലമെടുക്കും? a) 3.125%, b) 1% ?

13.8 കാർബൺ ഉൾക്കൊള്ളുന്ന ജൈവദ്രവ്യത്തിന്റെ സാധാരണ ആക്ടിവിറ്റി ഓരോ ഗ്രാം കാർബണിനും 15 ശോഷണങ്ങൾ പ്രതി മിനിറ്റ് ആണ്. ഈ ആക്ടിവിറ്റി ഉണ്ടാകുന്നത് സ്ഥിരതയുള്ള കാർബൺ ഐസോടോപ്പായ $^{12}_{6}C$ യുടെ കൂടെ നേരിയ അളവിൽ റേഡിയോആക്ടീവ് ആയ $^{14}_{6}C$ കൂടികലരുന്നതിനാലാണ്. ജൈവവസ്തു മരിക്കുമ്പോൾ, അതിന്റെ അന്തരീക്ഷവുമായുള്ള പ്രതിപ്രവർത്തനം (മുകളിൽ പറഞ്ഞ സംതുലിത ആക്ടിവിറ്റി നിലനിർത്തുന്ന) നിലയ്ക്കുകയും അതിന്റെ ആക്ടിവിറ്റി കുറയാൻ തുടങ്ങുകയും ചെയ്യുന്നു. $^{12}_{6}C$ ന്റെ അറിയപ്പെടുന്ന അർധായുസും (5730 years), ആക്ടിവിറ്റി കണ്ടെത്തിയതും ഉപയോഗിച്ച്, ആ വസ്തുവിന്റെ ഏകദേശ പ്രായം കണ്ടെത്താം. ഇതാണ് പുരാവസ്തുശാസ്ത്രത്തിൽ ഉപയോഗിക്കുന്ന കാർബൺ ഡേറ്റിംഗിന്റെ തത്വം. മോഹൻജൊദാരോവിൽ നിന്ന് ലഭിച്ച ഒരു പുരാവസ്തുവിന്റെ ആക്ടിവിറ്റി 9 ശോഷണങ്ങൾ/മിനിറ്റ് ആണെന്നു കരുതുക. സിന്ധുനദീതട സംസ്കാരത്തിന്റെ ഏകദേശ പ്രായം കണക്കാക്കുക.

13.9 8.0 mCi ശക്തിയുള്ള ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് ഉറവിടത്തിനാവശ്യമായ $^{60}_{27}Co$ ന്റെ അളവ് കണക്കാക്കുക. $^{60}_{27}Co$ ന്റെ അർധായുസ് 5.3 വർഷങ്ങൾ.

13.10 $^{90}_{38}Sr$ ന്റെ അർധായുസ് 28 വർഷങ്ങളാണ്. 15 mg അളവിലുള്ള ഈ ഐസോടോപ്പിന്റെ ശോഷണനിരക്ക് എന്ത്?

13.11 ഗോൾഡ് ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും ($^{197}_{79}Au$) സിൽവർ ന്യൂക്ലിയസിന്റെയും ($^{107}_{47}Ag$) ആരങ്ങൾ തമ്മിലുള്ള ഏകദേശ അനുപാതം കണക്കാക്കുക.

13.12 താഴെ കൊടുത്ത α ശോഷണത്തിൽ Q മൂല്യവും ഉത്സർജിക്കപ്പെട്ട α കണത്തിന്റെ ഗതികോർജവും കണ്ടുപിടിക്കുക. (a) $^{226}_{88}Ra$ (b) $^{220}_{86}Rn$.

തന്നിരിക്കുന്ന ഡാറ്റ:

$m(^{226}_{88}Ra) = 226.02540\,u$, $m(^{222}_{86}Rn) = 222.01750\,u$

$m(^{222}_{86}Rn) = 220.01137\,u$, $m(^{216}_{84}Po) = 216.00189\,u$.

13.13 റേഡിയോ ന്യൂക്ലൈഡ് ആയ $^{11}_{6}C$ താഴെ കൊടുത്ത പ്രകാരം ശോഷണത്തിന് വിധേയമാകുന്നു.

$^{11}_{6}C \rightarrow ^{11}_{5}B + e^{+} + \nu$: $T_{1/2}$=20.3 min ഉത്സർജിക്കപ്പെടുന്ന പോസിട്രോണിന്റെ പരമാവധി ഊർജം 0.960 MeV. തന്നിരിക്കുന്ന മാസുകൾ: $m(^{11}_{6}C)$= 11.011434 u, $m(^{11}_{6}B)$ = 11.009305 u, Q കണ്ടുപിടിക്കുക. ഉത്സർജിക്കുന്ന പോസിട്രോണിന്റെ ഊർജവുമായി അതിനെ താരതമ്യപ്പെടുത്തുക.

13.14 β ഉത്സർജനം വഴി $^{23}_{10}Ne$ ശോഷണം ചെയ്യപ്പെടുന്നു. β ഉത്സർജന സമവാക്യം എഴുതുക. ഉത്സർജിക്കപ്പെടുന്ന ഇലക്ട്രോണിന്റെ പരമാവധി ഗതികോർജം കണ്ടുപിടിക്കുക.

തന്നിരിക്കുന്ന ഡാറ്റ: $m(^{23}_{10}Ne)$ = 22.994466 u, $m(^{23}_{11}Na)$ = 22.089770 u.

13.15 $A + b \rightarrow C + d$ എന്ന പ്രവർത്തനത്തിന്റെ Q മൂല്യം നിർവചിക്കപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത് $Q = [m_A + m_b - m_C - m_d]c^2$ എന്നാണ്, ഇതിൽ ഓരോ മാസും അതാതിന്റെ ന്യൂക്ലിയസുകളെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു. തന്നിരിക്കുന്ന ഡാറ്റ ഉപയോഗിച്ച് താഴെ കൊടുത്ത പ്രവർത്തനങ്ങളുടെ Q മൂല്യം കണ്ടുപിടിക്കുക. അവ താപശോഷകപ്രവർത്തനമാണോ താപമോചകപ്രവർത്തനമാണോ എന്ന് പ്രസ്താവിക്കുക.

(i) $^{1}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H$

(ii) $^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{20}_{10}Ne + ^{4}_{2}He$

അറ്റോമിക് മാസുകൾ:

$m(^{2}_{1}H)$ = 2.014102 u
$m(^{3}_{1}H)$ = 3.016049 u
$m(^{12}_{6}C)$ = 12.000000 u
$m(^{20}_{10}Ne)$ = 19.992439 u

13.16 ഒരു $^{56}_{26}Fe$ ന്യൂക്ലിയസ് ഫിഷനു വിധേയമാവുകയും രണ്ട് തുല്യ $^{28}_{13}Al$ ന്യൂക്ലിയസുകളായി മാറുകയും ചെയ്യുന്നതായി സങ്കൽപിക്കുക. ഊർജപരമായി ഈ ഫിഷൻ സാധ്യമാണോ? ഈ പ്രക്രിയയുടെ Q മൂല്യം കണ്ടെത്തി ഉത്തരം എഴുതുക. $m(^{56}_{26}Fe)$ = 55.93494 u, $m(^{28}_{13}Al)$ = 27.98191 u.

13.17 $^{239}_{94}Pu$ ന്റെ ഫിഷൻ ഗുണങ്ങൾ $^{235}_{92}U$ ന് സമാനമാണ്. ഓരോ ഫിഷനിലും പുറത്തുവിടുന്ന ശരാശരി ഊർജം 180 MeV ആണ്. 1 kg ശുദ്ധമായ $^{239}_{94}Pu$ ഫിഷന് വിധേയമാകുമ്പോൾ പുറത്തുവിടുന്ന ഊർജം MeVയിൽ കണ്ടുപിടിക്കുക.

13.18 ഒരു 1000 MW ഫിഷൻ റിയാക്ടർ 5.00 വർഷങ്ങൾ കൊണ്ട് അതിന്റെ പകുതി ഇന്ധനം ഉപയോഗിക്കുന്നു. എത്ര ഇന്ധനം ആയിരിക്കും തുടക്കത്തിൽ ഉണ്ടായിരുന്നത്? റിയാക്ടർ സമയത്തിന്റെ 80%വും പ്രവർത്തിക്കുന്നുവെന്ന് കരുതുക, കൂടാതെ ഊർജം മുഴുവനായും ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്നത് $^{235}_{92}U$ ന്റെ ഫിഷനിൽ നിന്നാണെന്നും ഈ ന്യൂക്ലൈഡുകൾ ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്നത് ഫിഷൻ പ്രക്രിയയിലൂടെ മാത്രമാണെന്നും സങ്കൽപിക്കുക.

13.19 2.0 kg ഡ്യൂട്ടീരിയത്തിന്റെ ഫ്യൂഷൻ നടന്നുകഴിഞ്ഞാൽ എത്രകാലം ഒരു 100W ബൾബിനെ പ്രകാശിപ്പിക്കാനാകും? ഫ്യൂഷൻ പ്രവർത്തനം താഴെ കൊടുത്തതു പരിഗണിക്കുക. $^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + n + 3.27$ MeV

13.20 രണ്ട് ഡ്യൂട്രോണുകളുടെ നേർക്കുനേർ കൂട്ടിയിടിക്കുള്ള പൊട്ടൻഷ്യൽ ബാരിയറിന്റെ ഉയരം കണക്കാക്കുക. (സൂചന:രണ്ട് ഡ്യൂട്രോണുകൾ

പരസ്പരം സ്പർശിക്കുമ്പോൾ ഉണ്ടാകുന്ന കൂളോം വികർഷണമാണ് പൊട്ടൻഷ്യൽ ബാരിയറിന്റെ ഉയരം തരുന്നത്. ഇവയെ 2.0 fm ആരമുള്ള ദൃഢഗോളങ്ങളായി സങ്കൽപിക്കുക)

13.21 $R = R_0 A^{1/3}$ (R_0 ഒരു സ്ഥിരാങ്കം, A ന്യൂക്ലിയസിന്റെ മാസ് നമ്പർ) എന്ന ബന്ധം ഉപയോഗിച്ച് ന്യൂക്ലിയാർ മാസ് സാന്ദ്രത ഒരു സ്ഥിരസംഖ്യയാണെന്ന് തെളിയിക്കുക. (അതായത് A യെ ആശ്രയിക്കാത്ത)

13.22 ഒരു ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്നുള്ള β^+ (പോസിട്രോൺ) ഉൽസർജനത്തിന്, ഇലക്ട്രോൺ പിടിച്ചെടുക്കൽ എന്ന മറ്റൊരു പ്രക്രിയകൂടിയുണ്ട്. (ആന്തര ഓർബിറ്റുകളിൽ K ഷെല്ലിൽ-നിന്നുള്ള ഇലക്ട്രോണുകളെ ന്യൂക്ലിയസ് പിടിച്ചെടുക്കുകയും ന്യൂട്രിനോ ഉൽസർജിക്കപ്പെടുകയും ചെയ്യുന്നു. $e^+ + {}^A_Z X \rightarrow {}_{Z-1}^{A}Y + \nu$. ഊർജപരമായി β^+ ഉത്സർജനം അനുവദനീയമാണെങ്കിൽ ഇലക്ട്രോൺ പിടിച്ചെടുക്കൽ സാധ്യമാണെന്നും എന്നാൽ തിരിച്ച് സംഭവിക്കുന്നില്ലായെന്നും തെളിയിക്കുക.

അധികപരിശീലനപ്രശ്നങ്ങൾ

13.23 ഒരു ആവർത്തനപ്പട്ടികയിൽ മെഗ്നീഷ്യത്തിന്റെ ശരാശരി അറ്റോമികമാസ് 24.312 u ആയാണ് തന്നിരിക്കുന്നത്. ഈ ശരാശരി മൂല്യം അവയുടെ പ്രകൃതിയിലെ ആപേക്ഷികസമൃദ്ധിയെ ആശ്രയിച്ചിരിക്കുന്നു. മൂന്ന് ഐസോടോപ്പുകളും അവയുടെ മാസുകളും താഴെ കൊടുക്കുന്നു. ${}^{24}_{12}Mg$ (23.98504u), ${}^{25}_{12}Mg$ (24.98584u), ${}^{26}_{12}Mg$ (25.98259u). ${}^{24}_{12}Mg$ ന്റെ പ്രകൃതിയിലുള്ള സമൃദ്ധി മാസിന്റെ 78.99% ആണ്. മറ്റു രണ്ടു ഐസോടോപ്പുകളുടെ സമൃദ്ധി കണക്കാക്കുക.

13.24 ഒരു ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്ന് ഒരു ന്യൂട്രോണിനെ ഒഴിവാക്കാൻ ആവശ്യമായ ഊർജമാണ് ന്യൂട്രോൺ വേർതിരിക്കൽ ഊർജം. ${}^{41}_{20}Ca$, ${}^{27}_{13}Al$ എന്നിവയുടെ ന്യൂട്രോൺ വേർതിരിക്കൽ ഊർജം തന്നിരിക്കുന്ന ഡാറ്റ ഉപയോഗിച്ച് കണ്ടെത്തുക.

$m({}^{40}_{20}Ca) = 39.962591\,u$

$m({}^{41}_{20}Ca) = 40.962278\,u$

$m({}^{26}_{13}Al) = 25.986895\,u$

$m({}^{27}_{13}Al) = 26.981541\,u$

13.25 ഒരു റേഡിയോആക്ടീവ് സ്രോതസ്സിൽ ഫോസ്ഫറസിന്റെ രണ്ട് ഐസോടോപ്പുകളായ ${}^{32}_{15}P$ ($T_{1/2} = 14.3d$), ${}^{33}_{15}P$ ($T_{1/2} = 25.3d$) എന്നിവ അടങ്ങിയിരിക്കുന്നു. തുടക്കത്തിൽ ശോഷണത്തിന്റെ 10% വരുന്നത് ${}^{33}_{15}P$ ൽ നിന്നാണ്. 90% ശോഷണം ചെയ്യപ്പെടാൻ എത്ര സമയം കാത്തിരിക്കണം?

13.26 ചില പ്രത്യേക സാഹചര്യങ്ങളിൽ, α-കണങ്ങളേക്കാൾ മാസുള്ള കണിക ഉത്സർജിച്ചുകൊണ്ട് ന്യൂക്ലിയസിന് ശോഷണം സംഭവിക്കുന്നു. താഴെ കൊടുത്ത ശോഷണപ്രക്രിയകൾ പരിഗണിക്കുക. ${}^{223}_{88}Ra \rightarrow {}^{209}_{82}Pb + {}^{14}_{6}C$, ${}^{223}_{88}Ra \rightarrow {}^{219}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$. ഈ ശോഷണങ്ങളുടെ Q മൂല്യങ്ങൾ കണ്ടുപിടിക്കുകയും അവ ഊർജപരമായി സാധ്യമാണോയെന്ന് പരിശോധിക്കുകയും ചെയ്യുക.

13.27 അതിവേഗന്യൂട്രോണുകളാലുള്ള $^{238}_{92}U$ ന്റെ ശോഷണം പരിഗണിക്കുക. ഒരു ഫിഷൻ പ്രക്രിയയിൽ, ന്യൂട്രോണുകളൊന്നും ഉത്സർജിക്കപ്പെടുന്നില്ല, പ്രാഥമിക കണങ്ങളുടെ ബീറ്റാശോഷണത്തിനുശേഷം ഉണ്ടാകുന്ന അവസാന ഉൽപന്നങ്ങൾ $^{140}_{58}Ce$, $^{99}_{44}Ru$ എന്നിവയാണ്. ഈ ഫിഷൻ പ്രക്രിയയുടെ Q മൂല്യം കണക്കാക്കുക. ആറ്റോമിക, മാസുകൾ: $m(^{238}_{92}U) = 238.05079$ u, $m(^{140}_{58}Ce) = 139.90543$ u, $m(^{99}_{44}Ru) = 98.90594$ u

13.28 D–T പ്രതിപ്രവർത്തനം പരിഗണിക്കുക (ഡ്യൂട്ടീരിയം-ട്രിഷിയം).

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + n$$

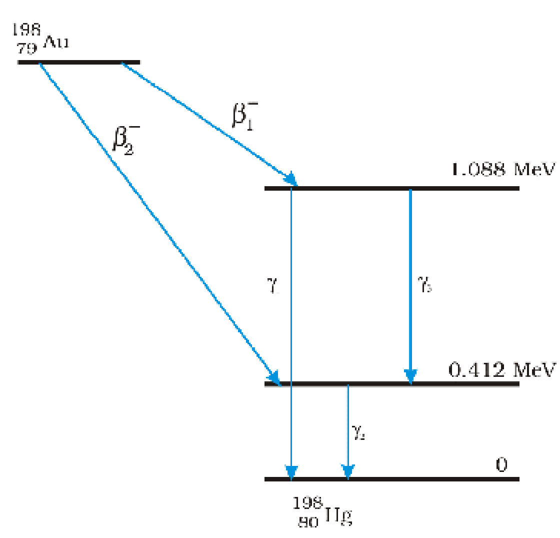
(a) ഈ പ്രതിപ്രവർത്തനത്തിൽ പുറത്തുവിടുന്ന ഊർജം MeV യിൽ കാണുക. $m(^{2}_{1}H) = 2.014102$ u, $m(^{3}_{1}H) = 3.016049$ u

(b) ഡ്യൂട്ടീരിയത്തിന്റെയും ട്രിഷിയത്തിന്റെയും ആരം ഏകദേശം 2.0 fm ആണെന്ന് പരിഗണിക്കുക. രണ്ട് ന്യൂക്ലിയസുകൾ തമ്മിലുള്ള കൂളോം വികർഷണം അതിജീവിയ്ക്കാൻ ആവശ്യമായ ഗതികോർജമെന്ത്? ഈ പ്രവർത്തനം തുടങ്ങാൻ വാതകത്തെ ഏതു താപനിലവരെ ചൂടാക്കണം?

(സൂചന: ഒരു ഫ്യൂഷൻ പ്രക്രിയയ്ക്ക് ആവശ്യമായ ഗതികോർജം = പ്രതിപ്രവർത്തിക്കുന്ന കണികകൾക്ക് ലഭ്യമായ താപീയ ഗതികോർജം = $2(3kT/2)$; k = ബോൾട്ട്സ്മാൻ സ്ഥിരാങ്കം, T = കേവല താപനില)

13.29 ചിത്രം 13.6ൽ കാണിച്ചിട്ടുള്ള β- കണികകളുടെ പരമാവധി ഗതികോർജവും γ ശോഷണങ്ങളുടെ ആവൃത്തികളും കാണുക.

$m(^{198}Au) = 197.968233$ u
$m(^{198}Hg) = 197.966760$ u



ചിത്രം 13.6

13.30 താഴെ കൊടുത്ത പ്രവർത്തനങ്ങളിൽ പുറപ്പെടുവിക്കുന്ന ഊർജം കണ്ടെത്തുകയും താരതമ്യപ്പെടുത്തുകയും ചെയ്യുക.

a) സൂര്യനിലെ അകകാമ്പിലുള്ള 1.0 kg ഹൈഡ്രജന്റെ ഫ്യൂഷൻ

b) ഒരു ഫിഷൻ റിയാക്ടറിലെ 1.0 kg ^{235}Uന്റെ ഫിഷൻ

13.31 AD 2020 ൽ 200,000 MW ഊർജം ഉൽപാദിപ്പിക്കുകയെന്നത് ഇന്ത്യയുടെ ലക്ഷ്യമാണെന്നു കരുതുക. അതിൽ 10% ന്യൂക്ലിയാർ വൈദ്യുതനിലയങ്ങളിൽ നിന്നാണ് വേണ്ടത്. റിയാക്ടറിൽ ഉൽപാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്ന താപോർജ (അതായത്, വൈദ്യുതോർജമായി മാറ്റപ്പെടുന്ന) ഉപയോഗത്തിന്റെ ക്ഷമത ശരാശരി 25% ആണെന്ന് സങ്കൽപിക്കുക. 2020 ആകുമ്പോഴേക്കും നമ്മുടെ രാജ്യത്തിനാവശ്യമായ ഫിഷന് അനുയോജ്യമായ യുറേനിയത്തിന്റെ അളവെത്രയായിരിക്കും? ^{235}Uന്റെ ഒരു ഫിഷനിലുള്ള താപോർജം 200MeV ആയിട്ടെടുക്കുക.