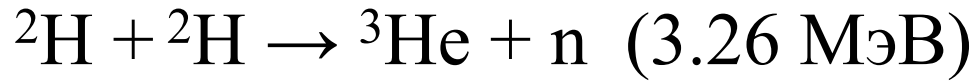


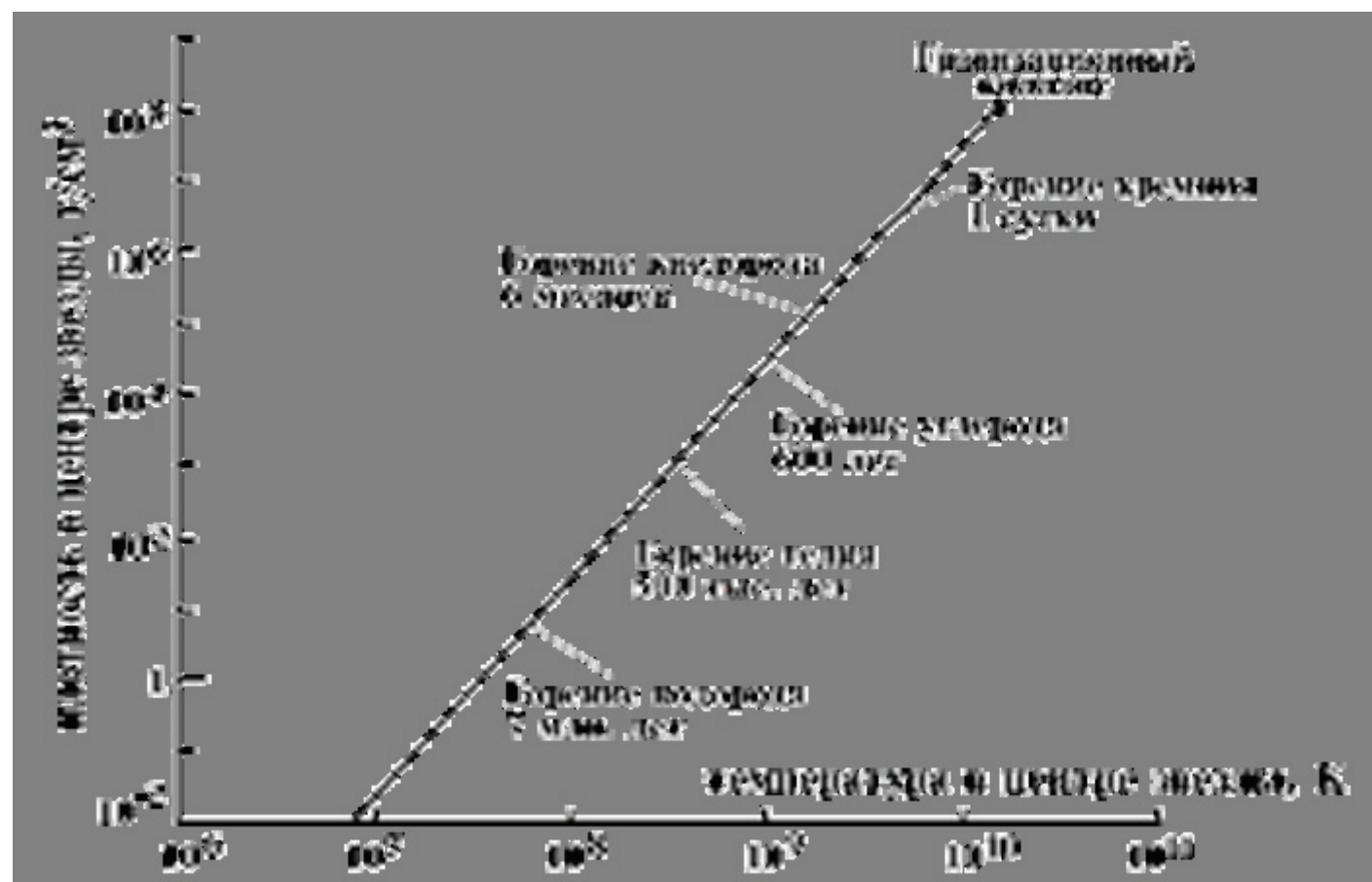
***Реакция в недрах звезды типа Солнце***

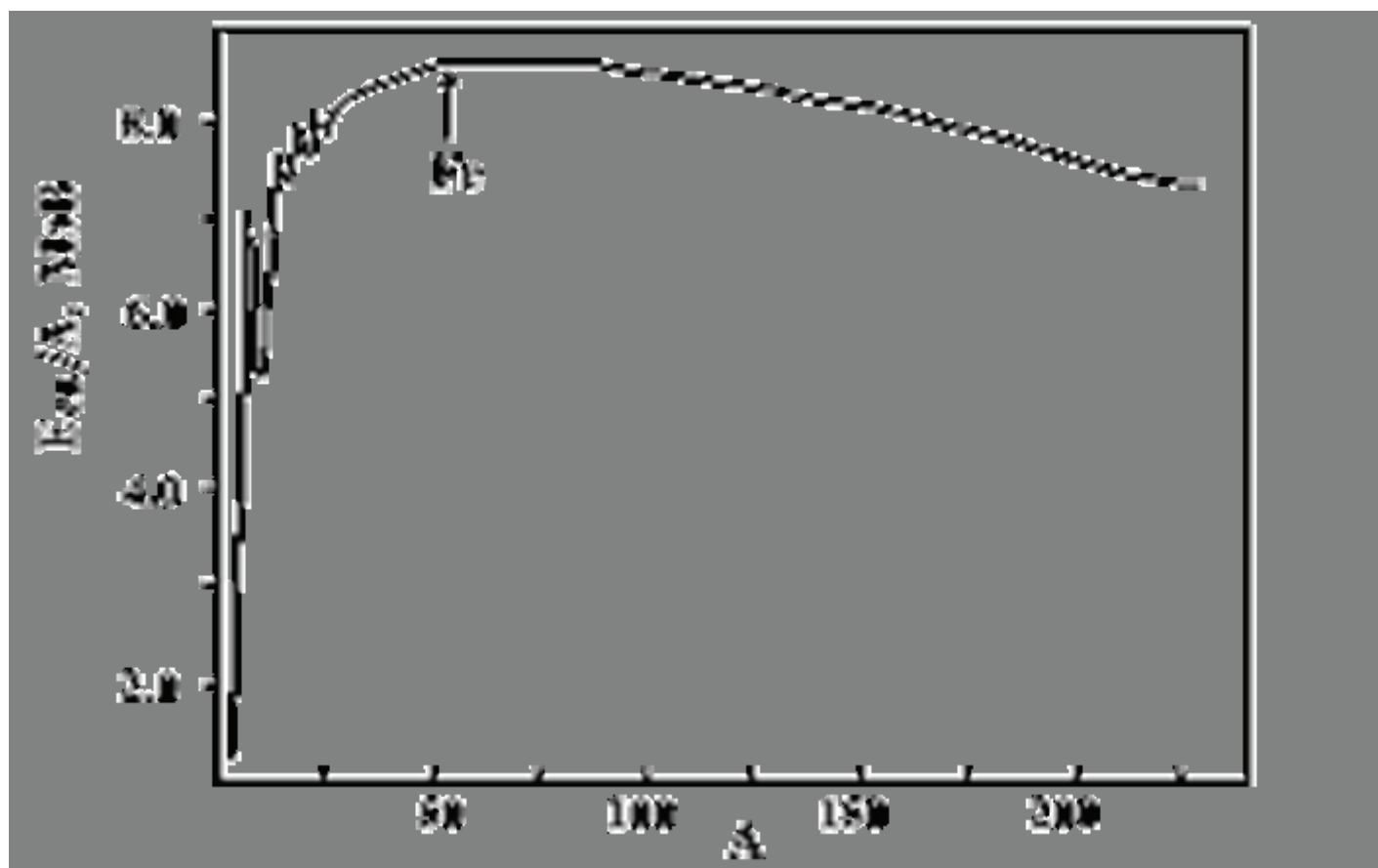


***Реакция в недрах протозвезды***

$$E_B \approx \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt[3]{A_1} + \sqrt[3]{A_2}} M \alpha B$$

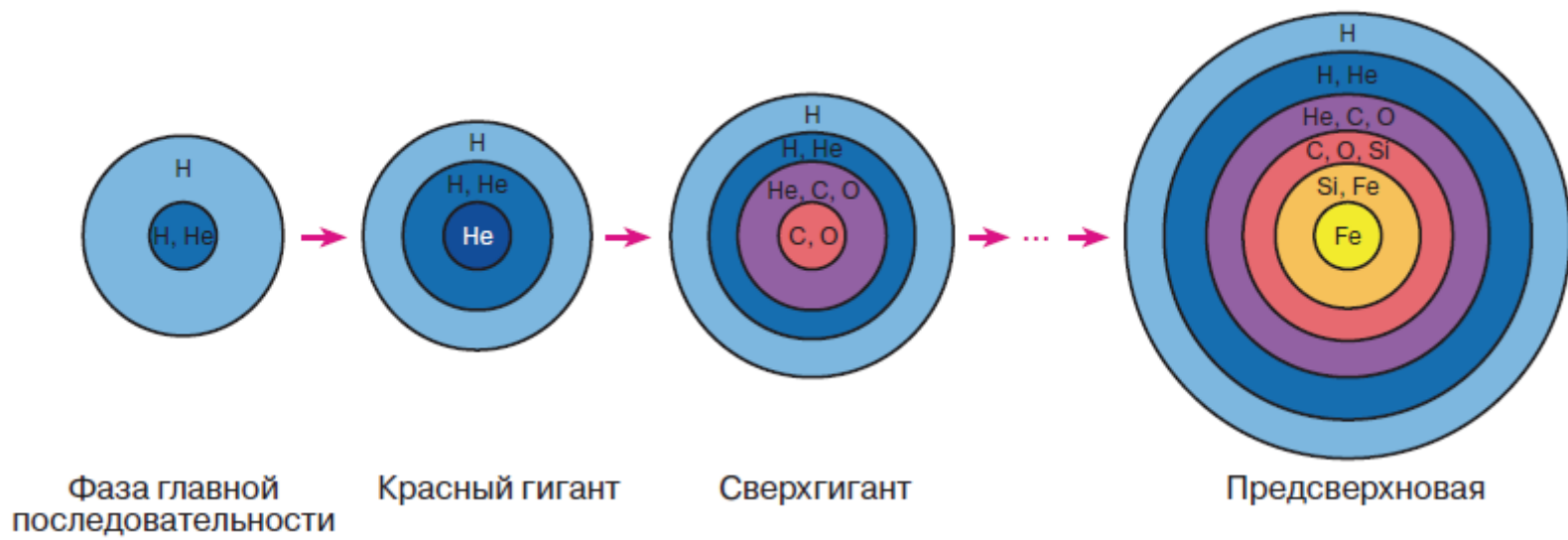
$$w \sim \exp\left\{-\frac{2pZ_1Z_2e^2}{\hbar v}\right\}$$



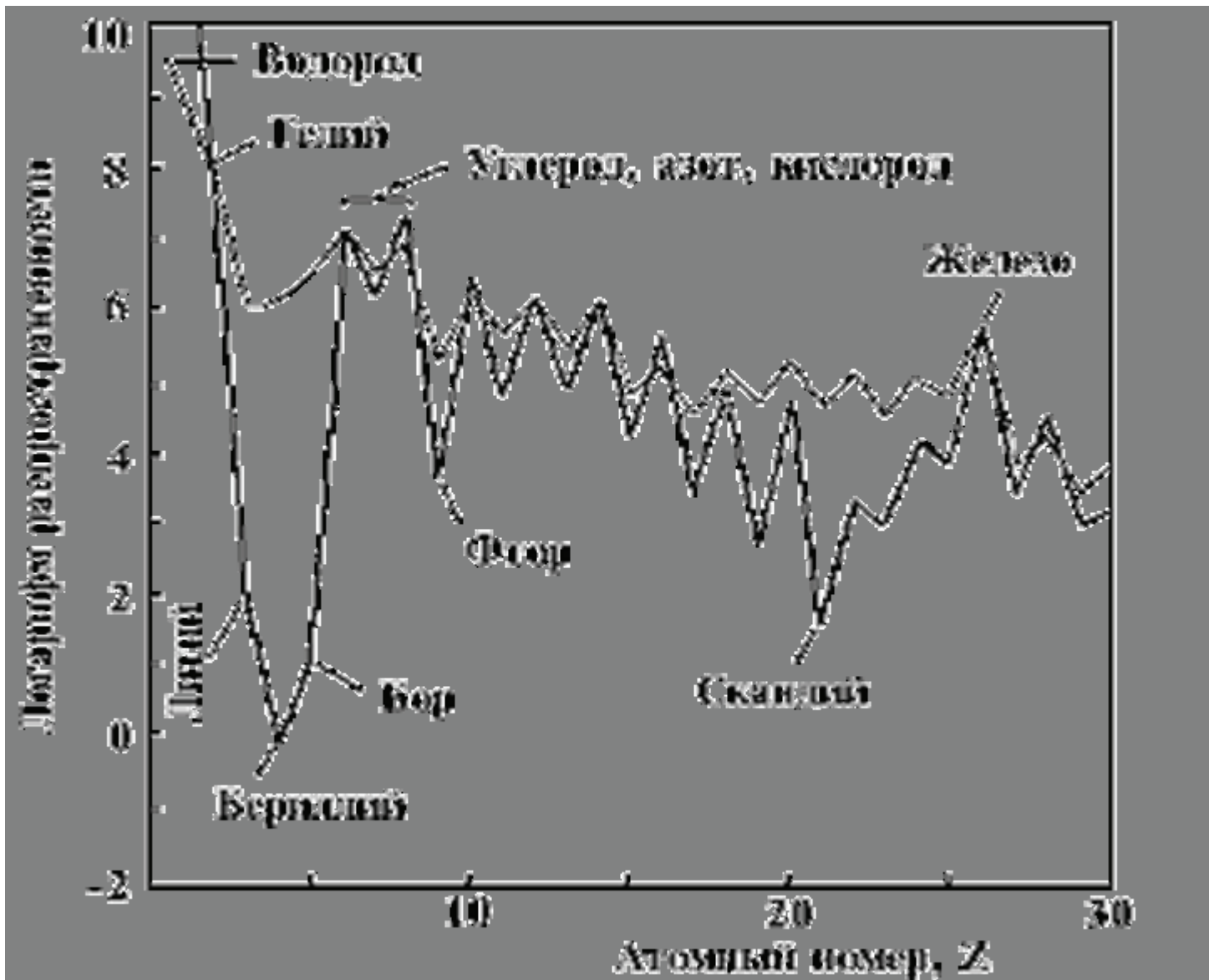


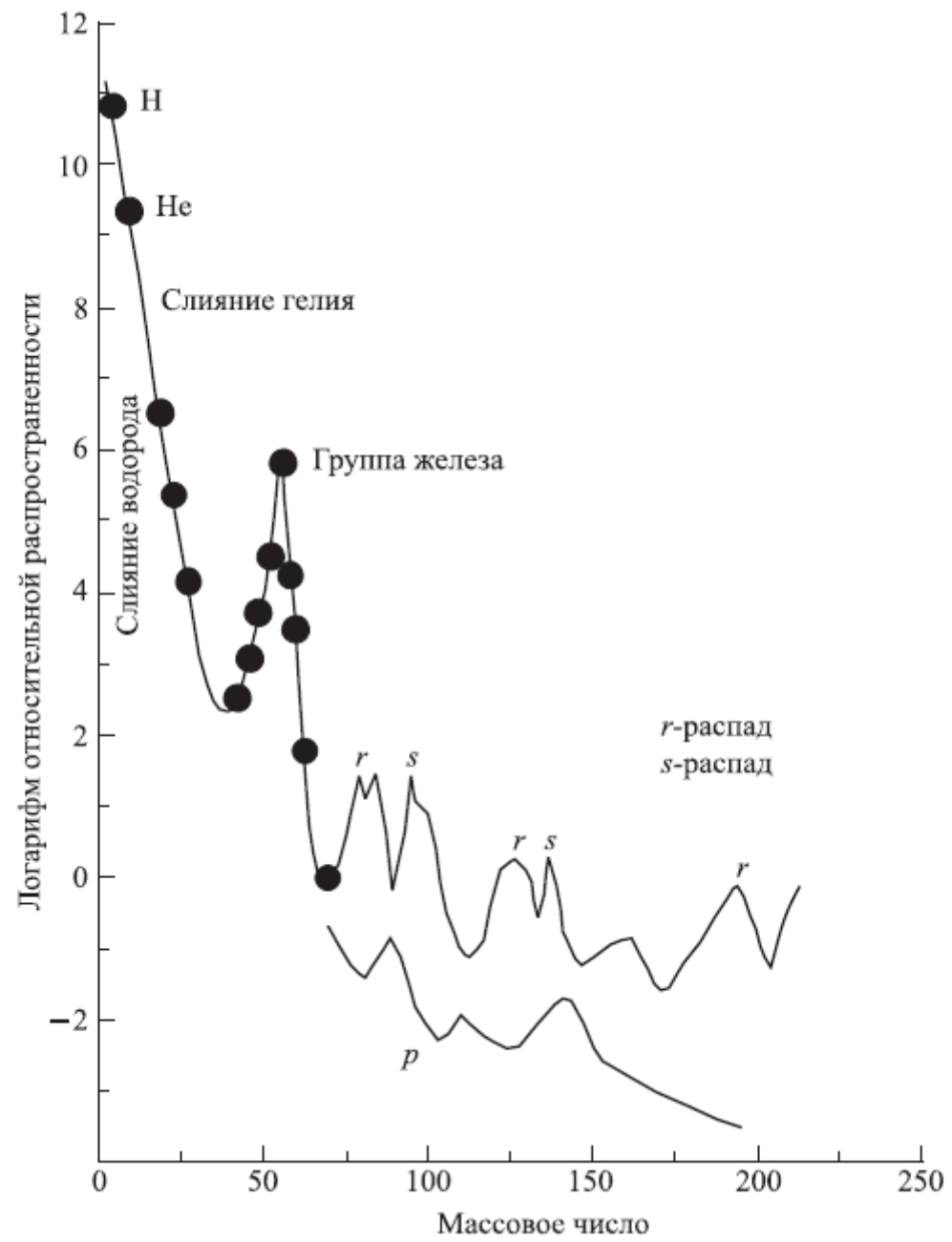


Масса, М	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии



Распространенность элементов во Вселенной. Тонкая линия - распространенность элементов в составе космического излучения; толстая - средняя распространенность элементов во Вселенной



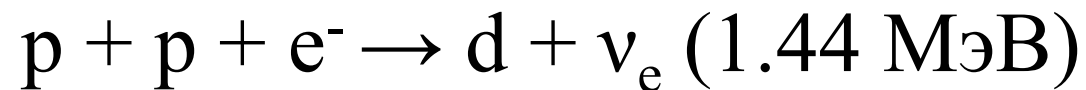
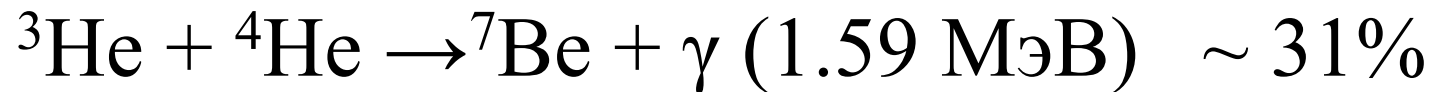
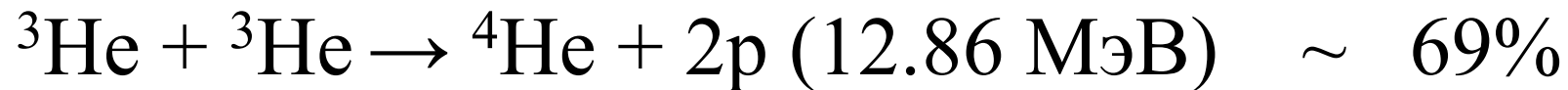
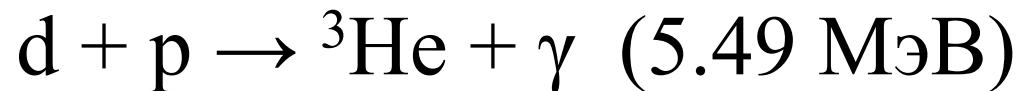
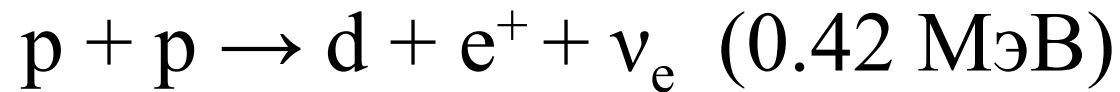


## Обойдённые ядра

$^{74}\text{Se}$ ,  $^{78}\text{Kr}$ ,  $^{80}\text{Kr}$ ,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}$ ,  $^{94}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Ru}$ ,  $^{98}\text{Ru}$ ,  $^{102}\text{Pd}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{108}\text{Cd}$ ,  $^{113}\text{In}$ ,  $^{112}\text{Sn}$ ,  
 $^{114}\text{Sn}$ ,  $^{115}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Te}$ ,  $^{124}\text{Xe}$ ,  $^{126}\text{Xe}$ ,  $^{130}\text{Ba}$ ,  $^{132}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Gd}$ ,  
 $^{152}\text{Dy}$ ,  $^{158}\text{Dy}$ ,  $^{162}\text{Er}$ ,  $^{164}\text{Er}$ ,  $^{168}\text{Yb}$ ,  $^{174}\text{Hf}$ ,  $^{180}\text{W}$ ,  $^{184}\text{Os}$ ,  $^{190}\text{Pt}$ ,  $^{196}\text{Hg}$ .

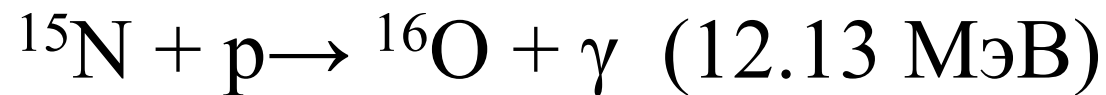
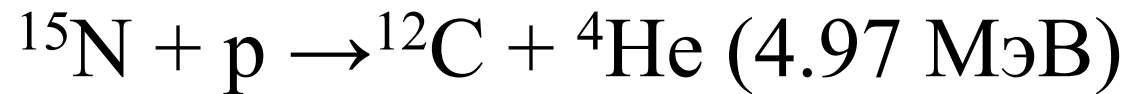
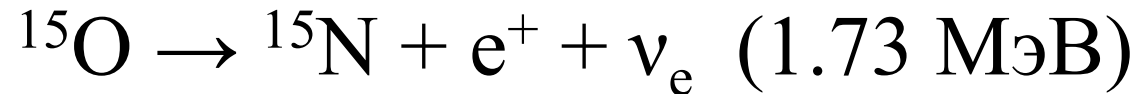
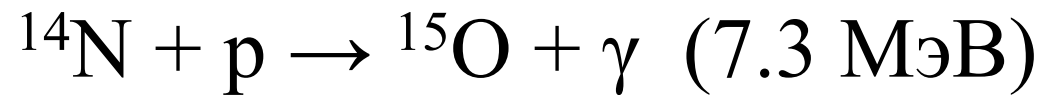
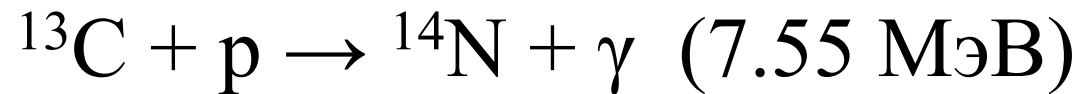
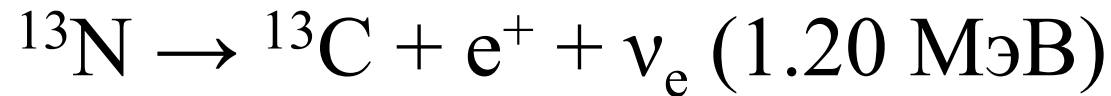
**Протон-протонная цепочка  
(водородный цикл)**

$$T \sim 1.5 \cdot 10^7 \text{K}; \quad \rho \sim 10^2 \text{ g/cm}^3$$



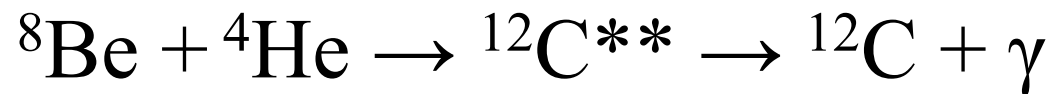
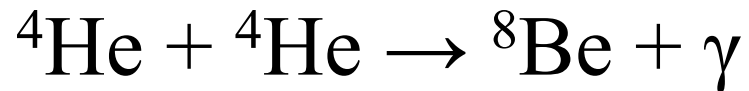
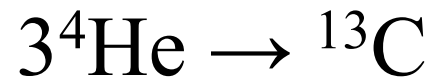
## СНО-цикл

$T \sim 1.7 \cdot 10^7 \text{K}$



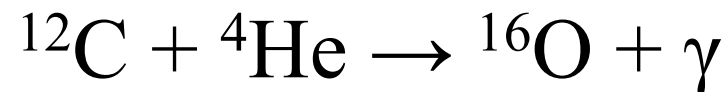
## Горение гелия

$$T \sim 1.5 \cdot 10^8 \text{K}; \quad \rho \sim 5 \cdot 10^4 \text{ g/cm}^3$$

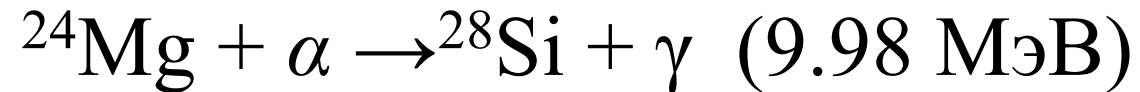
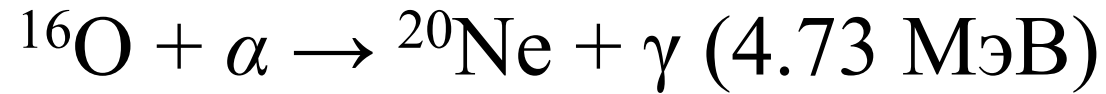


7.37 МэВ - энергия, выделяемая при синтезе  ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He}$

7.65 МэВ – энергия второго возбужденного состояния  ${}^{12}\text{C}^{**}$

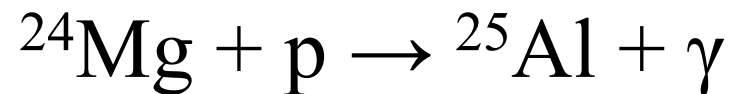
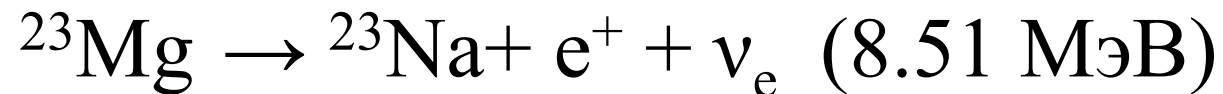
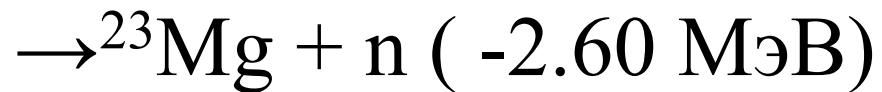
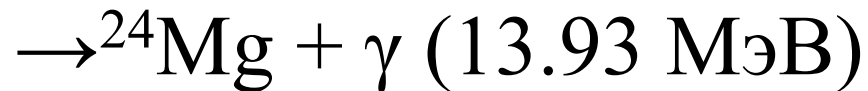
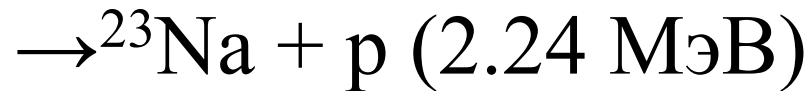
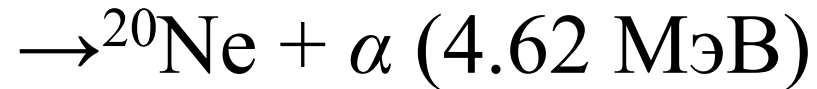
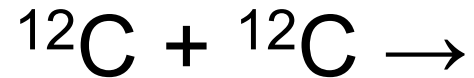


## Образование N- $\alpha$ ядер

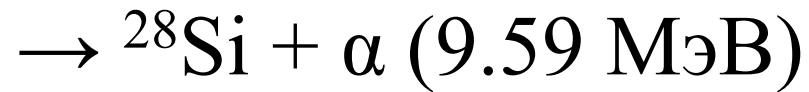
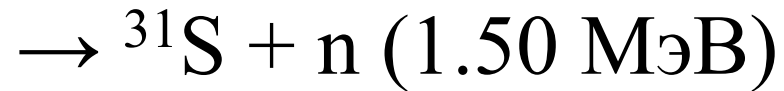
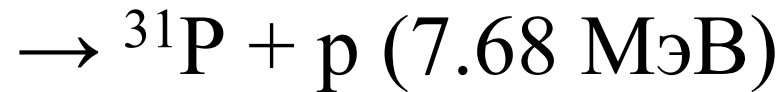
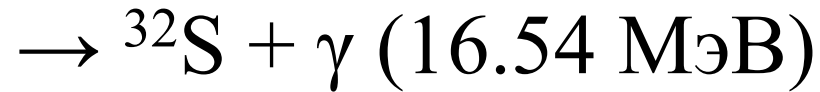
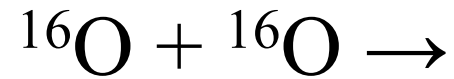


## Горение углерода

$T \sim 8 \cdot 10^8 \text{K}$ ;  $\rho \sim 10^5 \text{ g/cm}^3$

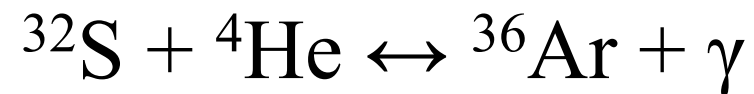
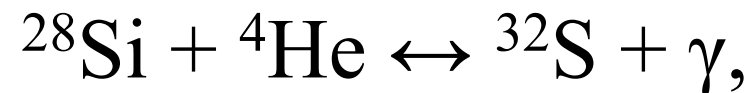
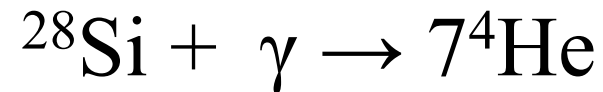
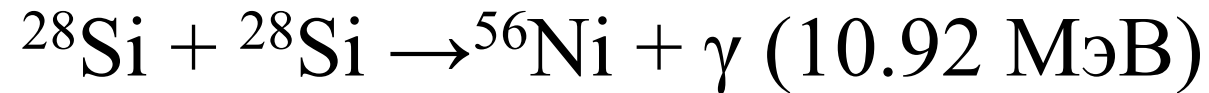


## Горение кислорода



## Горение кремния

$$T \sim (3-5) \cdot 10^9 \text{K}; \quad \rho \sim 10^5 - 10^6 \text{ g/cm}^3$$

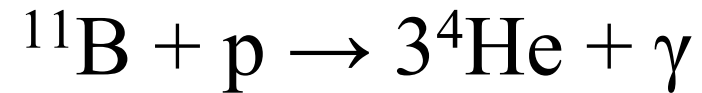
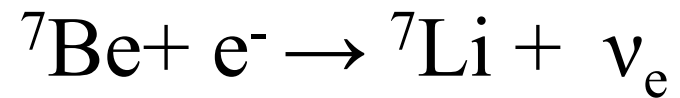
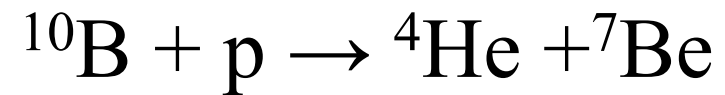
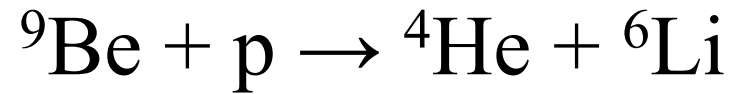
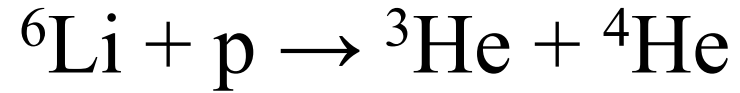


## Скандий – космохимический термометр

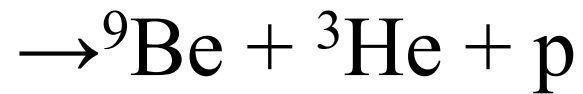
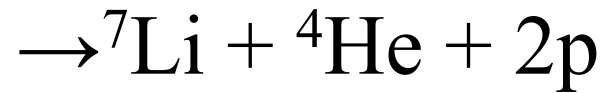
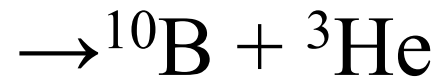
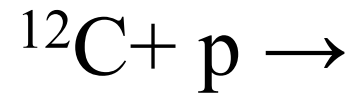
$^{45}\text{Sc}_{21}$  : резонансный (n, $\gamma$ ) – захват при энергии нейтронов 4.1 КэВ

Экзотермические реакции ( $\alpha$ , n) в выгоревших ядрах звезд становятся существенными при температурах  $\sim 4$  КэВ ( $\sim 46$  млн. К)

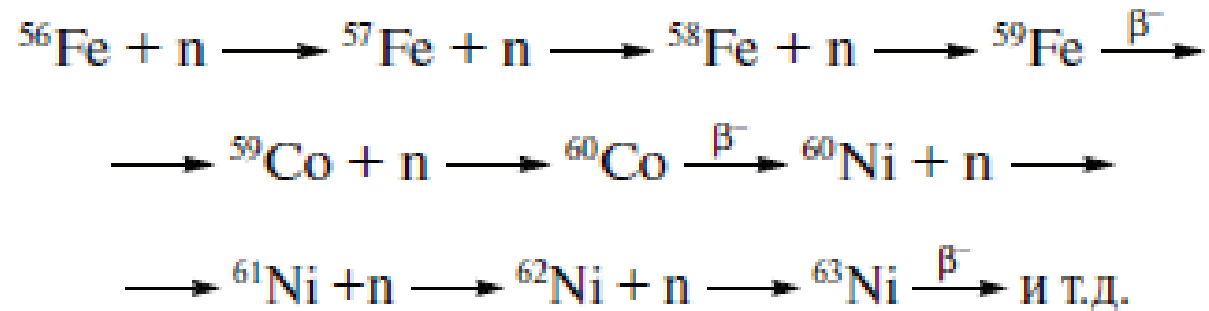
## Парадокс Li, Be, B



## Реакции скалывания $^{12}\text{C}$ под действием протонов



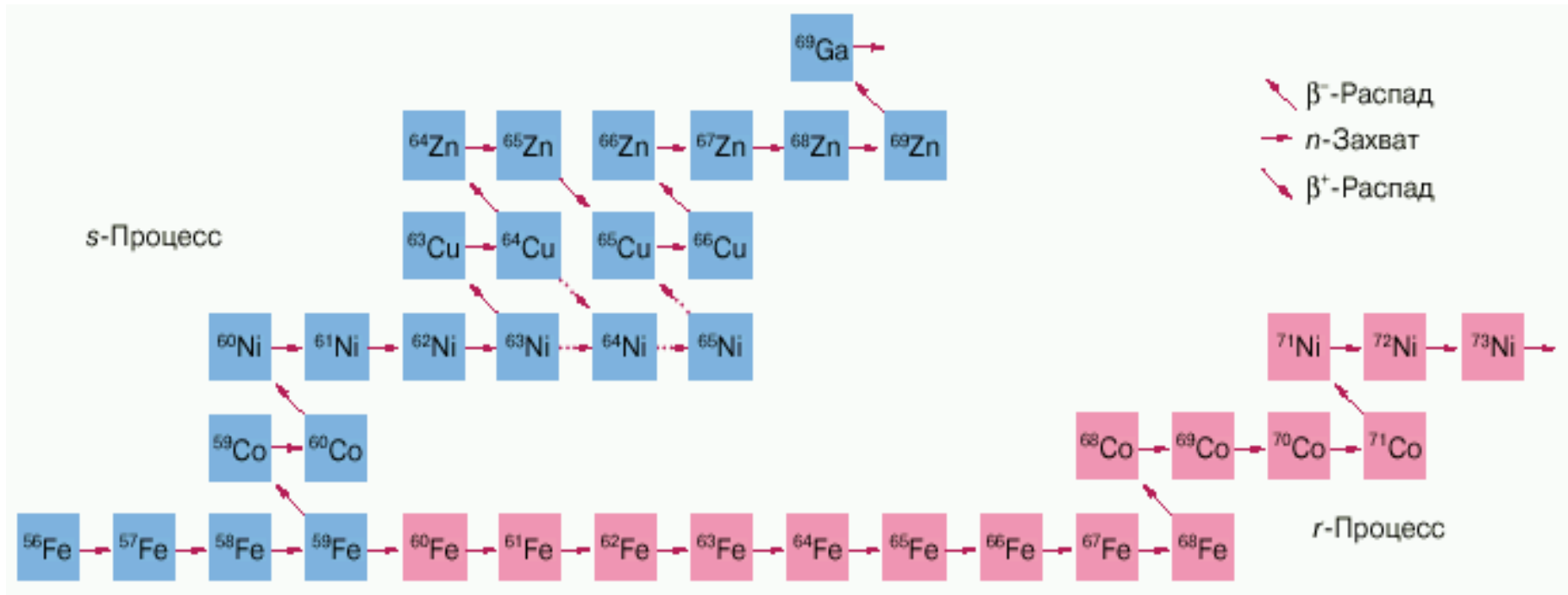
## Пример последовательных s-захватов



# Цепочки *r*-и *s*-процессов для ядра $^{56}\text{Fe}$

Точечные стрелки – альтернативные каналы образования  $^{64}\text{Cu}$

*r* – процесс:  $T \geq 10^9$  К, концентрация нейтронов  $n \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$



## Модели образования обойденных ядер

**J.W.Truran, A.G.W.Cameron, 1972**

Взрыв сверхновой

$T \sim 2 \cdot 10^9 \text{K}$

Реакции  $(p, \gamma)$ ,  $(\gamma, n)$

**Д.А. Франк-Каменецкий, 1961**

Реакции  $(p, n)$ ,  $(p, 2n)$  за свет холодного электромагнитного ускорения протонов в атмосферах звезд

**Г.Домогацкий, Д.Надеждин, 1978**

Взрыв сверхновой

$\nu_e + (A+1, Z-1) \rightarrow (A+1, Z)^* + e^-$

$(A+1, Z)^* \rightarrow (A, Z) + n$

$e^+ + (A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + \bar{\nu}_e$

### Образование обойденных ядер в реакциях (p,2n)

Обойденное ядро	Реакция образования	Имеющиеся эксп. данные, $E_p$ (МэВ)
$^{74}\text{Se}$	$^{75}\text{As}(p,2n)^{74}\text{Se}$	Нет данных
$^{78}\text{Kr}$	$^{79}\text{Br}(p,2n)^{78}\text{Kr}$	Нет данных
$^{84}\text{Sr}$	$^{85}\text{Rb}(p,2n)^{84}\text{Sr}$	Нет данных
$^{92}\text{Mo}$	$^{93}\text{Nb}(p,2n)^{92}\text{Mo}$	Нет данных
$^{96}\text{Ru}$	$^{97}\text{Tc}(p,2n)^{96}\text{Ru}$	Нет данных
$^{98}\text{Ru}$	$^{99}\text{Tc}(p,2n)^{98}\text{Ru}$	Нет данных
$^{102}\text{Pd}$	$^{103}\text{Rh}(p,2n)^{102}\text{Pd}$	Нет данных
$^{106}\text{Cd}$	$^{107}\text{Ag}(p,2n)^{106}\text{Cd}$	Нет данных
$^{112}\text{Sn}$	$^{113}\text{In}(p,2n)^{112}\text{Sn}$	Нет данных
$^{114}\text{Sn}$	$^{115}\text{In}(p,2n)^{114}\text{Sn}$	22
$^{115}\text{Sn}$	$^{116}\text{In}(p,2n)^{115}\text{Sn}$	Нет данных
$^{120}\text{Te}$	$^{121}\text{Sb}(p,2n)^{120}\text{Te}$	Нет данных
$^{124}\text{Xe}$	$^{125}\text{I}(p,2n)^{124}\text{Xe}$	Нет данных
$^{126}\text{Xe}$	$^{127}\text{I}(p,2n)^{126}\text{Xe}$	Нет данных
$^{130}\text{Ba}$	$^{131}\text{Cs}(p,2n)^{130}\text{Ba}$	Нет данных
$^{132}\text{Ba}$	$^{133}\text{Cs}(p,2n)^{132}\text{Ba}$	Нет данных
$^{136}\text{Ce}$	$^{137}\text{La}(p,2n)^{136}\text{Ce}$	Нет данных
$^{138}\text{Ce}$	$^{139}\text{La}(p,2n)^{138}\text{Ce}$	Нет данных
$^{144}\text{Sm}$	$^{145}\text{Pm}(p,2n)^{144}\text{Sm}$	Нет данных
$^{156}\text{Dy}$	$^{157}\text{Tb}(p,2n)^{156}\text{Dy}$	Нет данных
$^{158}\text{Dy}$	$^{159}\text{Tb}(p,2n)^{158}\text{Dy}$	Нет данных
$^{162}\text{Er}$	$^{163}\text{Ho}(p,2n)^{162}\text{Er}$	Нет данных
$^{164}\text{Er}$	$^{165}\text{Ho}(p,2n)^{164}\text{Er}$	Нет данных
$^{168}\text{Yb}$	$^{169}\text{Tm}(p,2n)^{168}\text{Yb}$	Нет данных
$^{174}\text{Hf}$	$^{175}\text{Lu}(p,2n)^{174}\text{Hf}$	Нет данных
$^{180}\text{W}$	$^{181}\text{Ta}(p,2n)^{180}\text{W}$	7.5-14, 22
$^{184}\text{Os}$	$^{185}\text{Re}(p,2n)^{184}\text{Os}$	Нет данных
$^{190}\text{Pt}$	$^{191}\text{Ir}(p,2n)^{190}\text{Pt}$	Нет данных
$^{196}\text{Hg}$	$^{197}\text{Au}(p,2n)^{196}\text{Hg}$	7.5-14

**The list of (p,n) reactions producing intermediate radioactive isotopes  
which can presumably participate in the avoided nuclei synthesis.**

Residual avoided nucleus	Intermediate reaction	Half-life	Isomer Half-life	Available data, E <sub>p</sub> (MeV)
<sup>74</sup> Se	<sup>74</sup> Ge (p,n) <sup>74</sup> As	17.77d		3.4-22
<sup>78</sup> Kr	<sup>78</sup> Se (p,n) <sup>78</sup> Br	6.46m		4.5-6.3
<sup>84</sup> Sr	<sup>84</sup> Kr (p,n) <sup>84</sup> Rb	32.77d		5;12;21
<sup>92</sup> Mo	<sup>92</sup> Zr (p,n) <sup>92</sup> Nb	3.5·10 <sup>7</sup> y	10.15d	3.5-25
<sup>96</sup> Ru	<sup>96</sup> Mo(p,n) <sup>96</sup> Tc	4.28d	51.5m	3.9-25
<sup>98</sup> Ru	<sup>98</sup> Mo(p,n) <sup>98</sup> Tc	4.2·10 <sup>6</sup> y		6-26
<sup>102</sup> Pd	<sup>102</sup> Ru (p,n) <sup>102</sup> Rh	207d	2.9y	5.5-11
<sup>106</sup> Cd	<sup>106</sup> Pd(p,n) <sup>106</sup> Ag	24m	8.28d	4-6;22
<sup>112</sup> Sn	<sup>112</sup> Cd(p,n) <sup>112</sup> In	15m	20.6m	3-11;21
<sup>120</sup> Te	<sup>120</sup> Sn(p,n) <sup>120</sup> Sb	15.9m	5.76d	3-25
<sup>124</sup> Xe	<sup>124</sup> Te(p,n) <sup>124</sup> I	4.2d		6-23
<sup>126</sup> Xe	<sup>126</sup> Te(p,n) <sup>126</sup> I	13.1d		3;11;22
<sup>130</sup> Ba	<sup>130</sup> Xe(p,n) <sup>130</sup> Cs	29.2m		no data
<sup>132</sup> Ba	<sup>132</sup> Xe(p,n) <sup>132</sup> Cs	6.5d		no data
<sup>136</sup> Ce	<sup>136</sup> Ba(p,n) <sup>136</sup> La	9.9m		4-6
<sup>138</sup> Ce	<sup>138</sup> Ba(p,n) <sup>138</sup> La	1.1·10 <sup>11</sup> y		no data
<sup>144</sup> Sm	<sup>144</sup> Nd(p,n) <sup>144</sup> Pm	17.7y		4-6
<sup>156</sup> Dy	<sup>156</sup> Gd(p,n) <sup>156</sup> Tb	5.35d		no data
<sup>158</sup> Dy	<sup>158</sup> Gd(p,n) <sup>158</sup> Tb	180y		no data
<sup>162</sup> Er	<sup>162</sup> Dy(p,n) <sup>162</sup> Ho	15m	67m	no data
<sup>164</sup> Er	<sup>164</sup> Dy(p,n) <sup>164</sup> Ho	29m	37.5m	no data
<sup>168</sup> Yb	<sup>168</sup> Er(p,n) <sup>168</sup> Tm	93.1d		22
<sup>174</sup> Hf	<sup>174</sup> Yb(p,n) <sup>174</sup> Lu	3.3y	142d	no data
<sup>180</sup> W	<sup>180</sup> Hf(p,n) <sup>180</sup> Ta	8.1h		6.5-9.2
<sup>184</sup> Os	<sup>184</sup> W(p,n) <sup>184</sup> Re	38d	169d	13;22
<sup>190</sup> Pt	<sup>190</sup> Os(p,n) <sup>190</sup> Ir	11.8d	3.2h	no data
<sup>196</sup> Hg	<sup>196</sup> Pt(p,n) <sup>196</sup> Au	6.2d	9.6h	16