



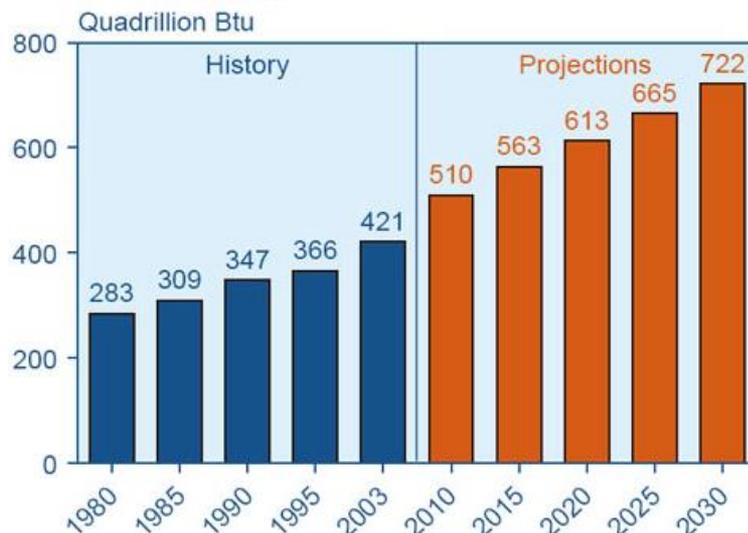
Il sole in laboratorio: l'energia da fusione nucleare

Antonio Cucchiaro - ENEA

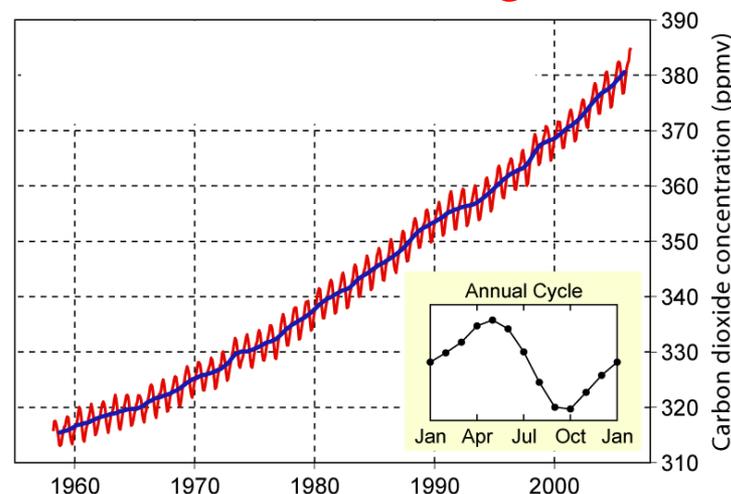
Cesare Battisti, Via dei Lauri 1, Velletri - 9 Novembre 2019

Consumi Energetici

- L'energia ha un ruolo fondamentale nella vita dell'umanità e nella promozione della civilizzazione.
- Il consumo di energia mondiale cresce ~2% per anno con raddoppio in 35 anni.
- I combustibili fossili emettono CO₂ che contribuisce al riscaldamento globale, alle piogge acide e allo smog urbano.
- La CO₂ nell'atmosfera sta incrementando nelle ultime decine di anni.



Consumi energetici



Concentrazione atmosferica di CO₂



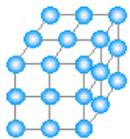
Come si presentano i corpi

- ❑ L'energia è prodotta o dallo spostamento di grandi masse (vento, invasi) o dalla trasformazione della materia (reazioni chimiche e nucleari)

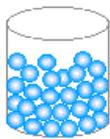
Tre stati di aggregazione:

- ❑ solido, forma e volume proprio;
- ❑ liquido, non ha forma, ma volume proprio;
- ❑ gassoso, non ha né forma né volume proprio;
- ❑ Plasma, gli atomi sono ionizzati.

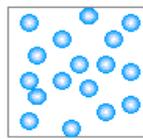
States of Matter



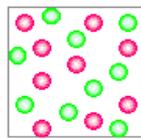
SOLID



LIQUID



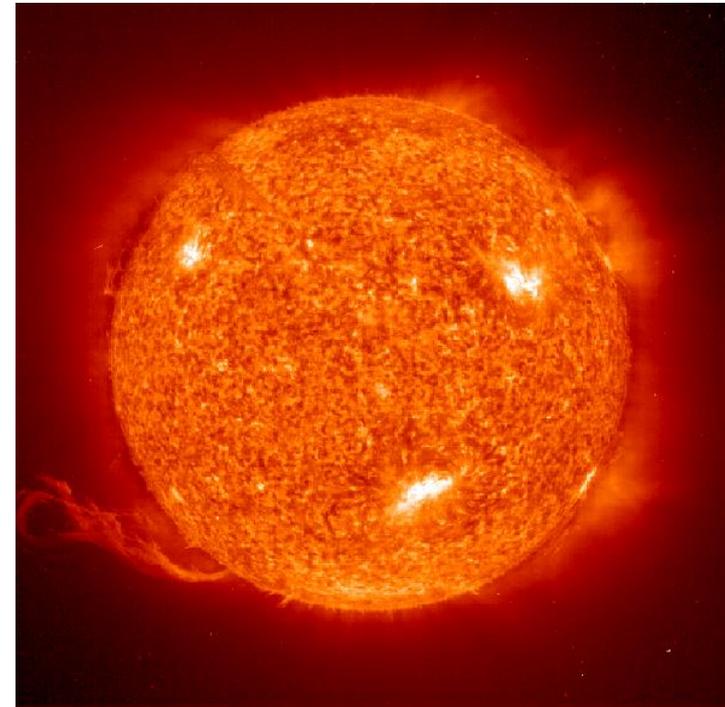
GAS



PLASMA



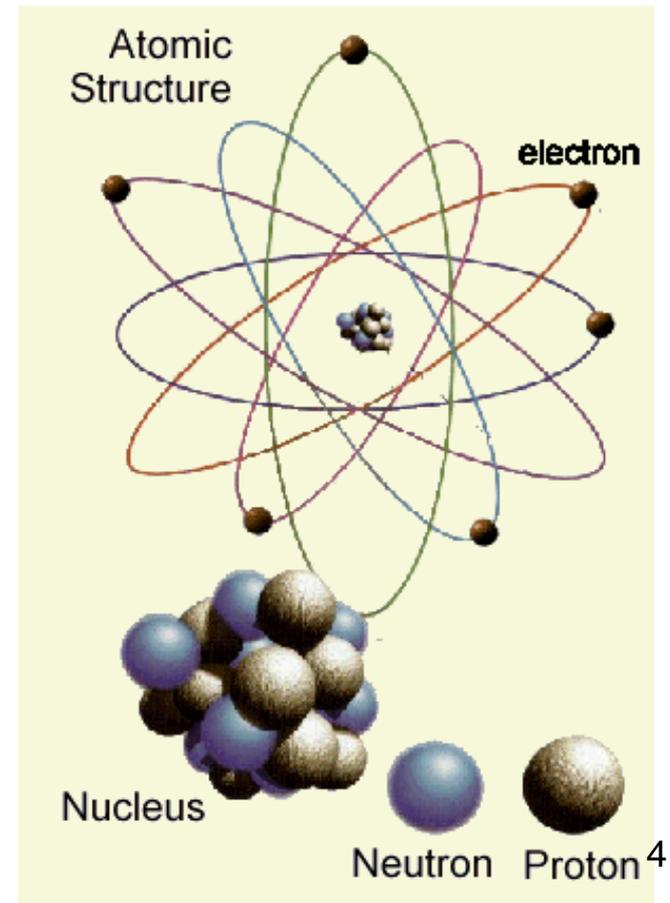
Aggiungendo calore



Il Sole è nello stato di plasma

Struttura Atomica

- ❑ L'atomo è costituito da: protoni con carica positiva, elettroni con carica negativa, e neutroni con carica neutra.
- ❑ I protoni e i neutroni costituiscono il nucleo dell'atomo e gli elettroni si trovano a distanza molto elevata dal nucleo.
- ❑ Ogni atomo è definito da:
 - numero di massa A : somma dei neutroni e protoni
 - numero atomico Z : numero dei protoni nel nucleo
- ❑ I protoni e neutroni sono tenuti insieme da forze intense e a breve raggio di azione, le forze nucleari.





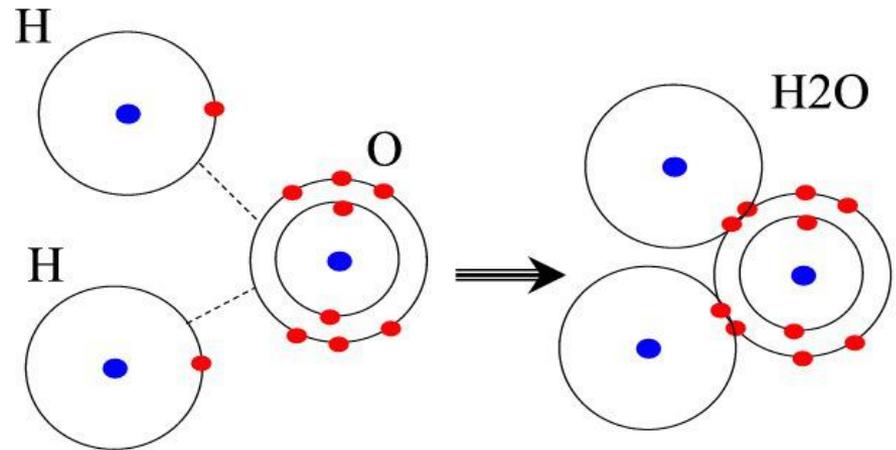
- Gli elementi sono sistemati in ordine crescente del numero atomico secondo righe (periodi) e colonne (gruppi). I periodi sono formati da elementi che hanno gli elettroni esterni nello stesso livello energetico.
- Gli elementi dello stesso gruppo hanno proprietà chimiche simili perché contengono lo stesso numero di elettroni nell'ultimo livello energetico.

Tavola Periodica degli elementi

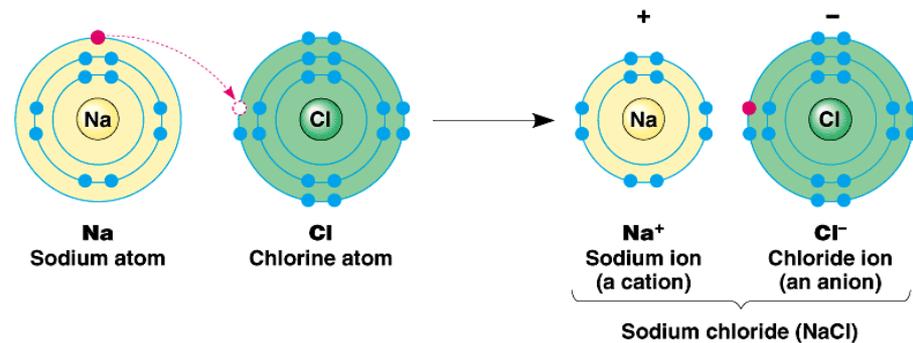
1 IA 1 1,00794 H Idrogeno	2 IIA 4 9,01224 He Elio	3 11 3,047 Na Sodio	4 12 24,305 Mg Magnesio	5 19 39,0983 K Potassio	6 20 40,08 Ca Calcio	7 21 44,9559 Sc Scandio	8 22 47,88 Ti Titanio	9 23 50,9415 V Vanadio	10 24 51,9961 Cr Cromo	11 25 52,0042 Mn Manganese	12 26 54,938 Fe Ferro	13 27 58,9332 Co Cobalto	14 28 58,9332 Ni Nichel	15 29 63,546 Cu Rame	16 30 65,38 Zn Zinco	17 31 69,723 Ga Gallio	18 32 72,59 Ge Germanio	19 33 74,9216 As Arsenico	20 34 78,96 Se Selenio	21 35 79,904 Br Bromo	22 36 83,8 Kr Kriptone																																																																																																																																																																																																																																																																																								
19 37 85,4678 Rb Rubidio	20 38 87,62 Sr Stronzio	21 39 88,9059 Y Ittrio	22 40 91,224 Zr Zirconio	23 41 92,9064 Nb Niobio	24 42 95,94 Mo Molibdeno	25 43 95,94 Tc Tecnecio	26 44 101,07 Ru Rutenio	27 45 102,9055 Rh Rodio	28 46 106,4 Pd Palladio	29 47 107,8682 Ag Argento	30 48 112,411 Cd Cadmio	31 49 114,818 In Indio	32 50 118,710 Sn Stagno	33 51 121,757 Sb Antimonio	34 52 127,6 Te Tellurio	35 53 127,6 I Iodio	36 54 131,3 Xe Xenone	37 55 132,9054 Cs Cesio	38 56 137,33 Ba Bario	39 57 138,9055 La Lantanio	40 58 175,053 Ce Cerio	41 59 173,054 Pr Praseodimio	42 60 175,037 Nd Neodimio	43 61 175,037 Pm Promezio	44 62 175,037 Sm Samario	45 63 175,037 Eu Europio	46 64 175,037 Gd Gadolonio	47 65 175,037 Tb Terbio	48 66 175,037 Dy Diospro	49 67 175,037 Ho Olimio	50 68 175,037 Er Erbio	51 69 175,037 Tm Terbium	52 70 175,037 Yb Ytterbio	53 71 175,037 Lu Lutezio																																																																																																																																																																																																																																																																											
6 88 226,0254 Fr Francio	7 89 226,0254 Ra Radio	8 90 226,0254 Ac Attinio	9 91 226,0254 Rf Rutherfordio	10 92 226,0254 Db Dubnio	11 93 226,0254 Sg Seaborgio	12 94 226,0254 Bh Bohrio	13 95 226,0254 Hs Hassio	14 96 226,0254 Mt Meitnerio	15 97 226,0254 Ds Darmstadtio	16 98 226,0254 Rg Roentgenio	17 99 226,0254 Cn Copernicio	18 100 226,0254 Nh Nihonio	19 101 226,0254 Fl Flerovio	20 102 226,0254 Lv Livermorio	21 103 226,0254 Ts Tennessio	22 104 226,0254 Og Oganesson	23 105 226,0254 Lr Lawrencio	24 106 226,0254 Uu Ununbium	25 107 226,0254 Uub Ununbium	26 108 226,0254 Uuq Ununquadio	27 109 226,0254 Uubh Ununbium	28 110 226,0254 Uuq Ununquadio	29 111 226,0254 Uubh Ununbium	30 112 226,0254 Uuq Ununquadio	31 113 226,0254 Uubh Ununbium	32 114 226,0254 Uuq Ununquadio	33 115 226,0254 Uubh Ununbium	34 116 226,0254 Uuq Ununquadio	35 117 226,0254 Uubh Ununbium	36 118 226,0254 Uuq Ununquadio	37 119 226,0254 Uubh Ununbium	38 120 226,0254 Uuq Ununquadio	39 121 226,0254 Uubh Ununbium	40 122 226,0254 Uuq Ununquadio	41 123 226,0254 Uubh Ununbium	42 124 226,0254 Uuq Ununquadio	43 125 226,0254 Uubh Ununbium	44 126 226,0254 Uuq Ununquadio	45 127 226,0254 Uubh Ununbium	46 128 226,0254 Uuq Ununquadio	47 129 226,0254 Uubh Ununbium	48 130 226,0254 Uuq Ununquadio	49 131 226,0254 Uubh Ununbium	50 132 226,0254 Uuq Ununquadio	51 133 226,0254 Uubh Ununbium	52 134 226,0254 Uuq Ununquadio	53 135 226,0254 Uubh Ununbium	54 136 226,0254 Uuq Ununquadio	55 137 226,0254 Uubh Ununbium	56 138 226,0254 Uuq Ununquadio	57 139 226,0254 Uubh Ununbium	58 140 226,0254 Uuq Ununquadio	59 141 226,0254 Uubh Ununbium	60 142 226,0254 Uuq Ununquadio	61 143 226,0254 Uubh Ununbium	62 144 226,0254 Uuq Ununquadio	63 145 226,0254 Uubh Ununbium	64 146 226,0254 Uuq Ununquadio	65 147 226,0254 Uubh Ununbium	66 148 226,0254 Uuq Ununquadio	67 149 226,0254 Uubh Ununbium	68 150 226,0254 Uuq Ununquadio	69 151 226,0254 Uubh Ununbium	70 152 226,0254 Uuq Ununquadio	71 153 226,0254 Uubh Ununbium	72 154 226,0254 Uubh Ununbium	73 155 226,0254 Uubh Ununbium	74 156 226,0254 Uubh Ununbium	75 157 226,0254 Uubh Ununbium	76 158 226,0254 Uubh Ununbium	77 159 226,0254 Uubh Ununbium	78 160 226,0254 Uubh Ununbium	79 161 226,0254 Uubh Ununbium	80 162 226,0254 Uubh Ununbium	81 163 226,0254 Uubh Ununbium	82 164 226,0254 Uubh Ununbium	83 165 226,0254 Uubh Ununbium	84 166 226,0254 Uubh Ununbium	85 167 226,0254 Uubh Ununbium	86 168 226,0254 Uubh Ununbium	87 169 226,0254 Uubh Ununbium	88 170 226,0254 Uubh Ununbium	89 171 226,0254 Uubh Ununbium	90 172 226,0254 Uubh Ununbium	91 173 226,0254 Uubh Ununbium	92 174 226,0254 Uubh Ununbium	93 175 226,0254 Uubh Ununbium	94 176 226,0254 Uubh Ununbium	95 177 226,0254 Uubh Ununbium	96 178 226,0254 Uubh Ununbium	97 179 226,0254 Uubh Ununbium	98 180 226,0254 Uubh Ununbium	99 181 226,0254 Uubh Ununbium	100 182 226,0254 Uubh Ununbium	101 183 226,0254 Uubh Ununbium	102 184 226,0254 Uubh Ununbium	103 185 226,0254 Uubh Ununbium	104 186 226,0254 Uubh Ununbium	105 187 226,0254 Uubh Ununbium	106 188 226,0254 Uubh Ununbium	107 189 226,0254 Uubh Ununbium	108 190 226,0254 Uubh Ununbium	109 191 226,0254 Uubh Ununbium	110 192 226,0254 Uubh Ununbium	111 193 226,0254 Uubh Ununbium	112 194 226,0254 Uubh Ununbium	113 195 226,0254 Uubh Ununbium	114 196 226,0254 Uubh Ununbium	115 197 226,0254 Uubh Ununbium	116 198 226,0254 Uubh Ununbium	117 199 226,0254 Uubh Ununbium	118 200 226,0254 Uubh Ununbium	119 201 226,0254 Uubh Ununbium	120 202 226,0254 Uubh Ununbium	121 203 226,0254 Uubh Ununbium	122 204 226,0254 Uubh Ununbium	123 205 226,0254 Uubh Ununbium	124 206 226,0254 Uubh Ununbium	125 207 226,0254 Uubh Ununbium	126 208 226,0254 Uubh Ununbium	127 209 226,0254 Uubh Ununbium	128 210 226,0254 Uubh Ununbium	129 211 226,0254 Uubh Ununbium	130 212 226,0254 Uubh Ununbium	131 213 226,0254 Uubh Ununbium	132 214 226,0254 Uubh Ununbium	133 215 226,0254 Uubh Ununbium	134 216 226,0254 Uubh Ununbium	135 217 226,0254 Uubh Ununbium	136 218 226,0254 Uubh Ununbium	137 219 226,0254 Uubh Ununbium	138 220 226,0254 Uubh Ununbium	139 221 226,0254 Uubh Ununbium	140 222 226,0254 Uubh Ununbium	141 223 226,0254 Uubh Ununbium	142 224 226,0254 Uubh Ununbium	143 225 226,0254 Uubh Ununbium	144 226 226,0254 Uubh Ununbium	145 227 226,0254 Uubh Ununbium	146 228 226,0254 Uubh Ununbium	147 229 226,0254 Uubh Ununbium	148 230 226,0254 Uubh Ununbium	149 231 226,0254 Uubh Ununbium	150 232 226,0254 Uubh Ununbium	151 233 226,0254 Uubh Ununbium	152 234 226,0254 Uubh Ununbium	153 235 226,0254 Uubh Ununbium	154 236 226,0254 Uubh Ununbium	155 237 226,0254 Uubh Ununbium	156 238 226,0254 Uubh Ununbium	157 239 226,0254 Uubh Ununbium	158 240 226,0254 Uubh Ununbium	159 241 226,0254 Uubh Ununbium	160 242 226,0254 Uubh Ununbium	161 243 226,0254 Uubh Ununbium	162 244 226,0254 Uubh Ununbium	163 245 226,0254 Uubh Ununbium	164 246 226,0254 Uubh Ununbium	165 247 226,0254 Uubh Ununbium	166 248 226,0254 Uubh Ununbium	167 249 226,0254 Uubh Ununbium	168 250 226,0254 Uubh Ununbium	169 251 226,0254 Uubh Ununbium	170 252 226,0254 Uubh Ununbium	171 253 226,0254 Uubh Ununbium	172 254 226,0254 Uubh Ununbium	173 255 226,0254 Uubh Ununbium	174 256 226,0254 Uubh Ununbium	175 257 226,0254 Uubh Ununbium	176 258 226,0254 Uubh Ununbium	177 259 226,0254 Uubh Ununbium	178 260 226,0254 Uubh Ununbium	179 261 226,0254 Uubh Ununbium	180 262 226,0254 Uubh Ununbium	181 263 226,0254 Uubh Ununbium	182 264 226,0254 Uubh Ununbium	183 265 226,0254 Uubh Ununbium	184 266 226,0254 Uubh Ununbium	185 267 226,0254 Uubh Ununbium	186 268 226,0254 Uubh Ununbium	187 269 226,0254 Uubh Ununbium	188 270 226,0254 Uubh Ununbium	189 271 226,0254 Uubh Ununbium	190 272 226,0254 Uubh Ununbium	191 273 226,0254 Uubh Ununbium	192 274 226,0254 Uubh Ununbium	193 275 226,0254 Uubh Ununbium	194 276 226,0254 Uubh Ununbium	195 277 226,0254 Uubh Ununbium	196 278 226,0254 Uubh Ununbium	197 279 226,0254 Uubh Ununbium	198 280 226,0254 Uubh Ununbium	199 281 226,0254 Uubh Ununbium	200 282 226,0254 Uubh Ununbium	201 283 226,0254 Uubh Ununbium	202 284 226,0254 Uubh Ununbium	203 285 226,0254 Uubh Ununbium	204 286 226,0254 Uubh Ununbium	205 287 226,0254 Uubh Ununbium	206 288 226,0254 Uubh Ununbium	207 289 226,0254 Uubh Ununbium	208 290 226,0254 Uubh Ununbium	209 291 226,0254 Uubh Ununbium	210 292 226,0254 Uubh Ununbium	211 293 226,0254 Uubh Ununbium	212 294 226,0254 Uubh Ununbium	213 295 226,0254 Uubh Ununbium	214 296 226,0254 Uubh Ununbium	215 297 226,0254 Uubh Ununbium	216 298 226,0254 Uubh Ununbium	217 299 226,0254 Uubh Ununbium	218 300 226,0254 Uubh Ununbium	219 301 226,0254 Uubh Ununbium	220 302 226,0254 Uubh Ununbium	221 303 226,0254 Uubh Ununbium	222 304 226,0254 Uubh Ununbium	223 305 226,0254 Uubh Ununbium	224 306 226,0254 Uubh Ununbium	225 307 226,0254 Uubh Ununbium	226 308 226,0254 Uubh Ununbium	227 309 226,0254 Uubh Ununbium	228 310 226,0254 Uubh Ununbium	229 311 226,0254 Uubh Ununbium	230 312 226,0254 Uubh Ununbium	231 313 226,0254 Uubh Ununbium	232 314 226,0254 Uubh Ununbium	233 315 226,0254 Uubh Ununbium	234 316 226,0254 Uubh Ununbium	235 317 226,0254 Uubh Ununbium	236 318 226,0254 Uubh Ununbium	237 319 226,0254 Uubh Ununbium	238 320 226,0254 Uubh Ununbium	239 321 226,0254 Uubh Ununbium	240 322 226,0254 Uubh Ununbium	241 323 226,0254 Uubh Ununbium	242 324 226,0254 Uubh Ununbium	243 325 226,0254 Uubh Ununbium	244 326 226,0254 Uubh Ununbium	245 327 226,0254 Uubh Ununbium	246 328 226,0254 Uubh Ununbium	247 329 226,0254 Uubh Ununbium	248 330 226,0254 Uubh Ununbium	249 331 226,0254 Uubh Ununbium	250 332 226,0254 Uubh Ununbium	251 333 226,0254 Uubh Ununbium	252 334 226,0254 Uubh Ununbium	253 335 226,0254 Uubh Ununbium	254 336 226,0254 Uubh Ununbium	255 337 226,0254 Uubh Ununbium	256 338 226,0254 Uubh Ununbium	257 339 226,0254 Uubh Ununbium	258 340 226,0254 Uubh Ununbium	259 341 226,0254 Uubh Ununbium	260 342 226,0254 Uubh Ununbium	261 343 226,0254 Uubh Ununbium	262 344 226,0254 Uubh Ununbium	263 345 226,0254 Uubh Ununbium	264 346 226,0254 Uubh Ununbium	265 347 226,0254 Uubh Ununbium	266 348 226,0254 Uubh Ununbium	267 349 226,0254 Uubh Ununbium	268 350 226,0254 Uubh Ununbium	269 351 226,0254 Uubh Ununbium	270 352 226,0254 Uubh Ununbium	271 353 226,0254 Uubh Ununbium	272 354 226,0254 Uubh Ununbium	273 355 226,0254 Uubh Ununbium	274 356 226,0254 Uubh Ununbium	275 357 226,0254 Uubh Ununbium	276 358 226,0254 Uubh Ununbium	277 359 226,0254 Uubh Ununbium	278 360 226,0254 Uubh Ununbium	279 361 226,0254 Uubh Ununbium	280 362 226,0254 Uubh Ununbium	281 363 226,0254 Uubh Ununbium	282 364 226,0254 Uubh Ununbium	283 365 226,0254 Uubh Ununbium	284 366 226,0254 Uubh Ununbium	285 367 226,0254 Uubh Ununbium	286 368 226,0254 Uubh Ununbium	287 369 226,0254 Uubh Ununbium	288 370 226,0254 Uubh Ununbium	289 371 226,0254 Uubh Ununbium	290 372 226,0254 Uubh Ununbium	291 373 226,0254 Uubh Ununbium	292 374 226,0254 Uubh Ununbium	293 375 226,0254 Uubh Ununbium	294 376 226,0254 Uubh Ununbium	295 377 226,0254 Uubh Ununbium	296 378 226,0254 Uubh Ununbium	297 379 226,0254 Uubh Ununbium	298 380 226,0254 Uubh Ununbium	299 381 226,0254 Uubh Ununbium	300 382 226,0254 Uubh Ununbium	301 383 226,0254 Uubh Ununbium	302 384 226,0254 Uubh Ununbium	303 385 226,0254 Uubh Ununbium	304 386 226,0254 Uubh Ununbium	305 387 226,0254 Uubh Ununbium	306 388 226,0254 Uubh Ununbium	307 389

Legami Chimici

- ❑ Gli atomi si aggregano per formare delle molecole uniti da forze elettrostatiche.
- ❑ Due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno danno luogo ad una molecola di acqua.
- ❑ I legami coinvolgono sempre gli elettroni esterni di ogni atomo. Se gli elettroni sono condivisi il legame è covalente, nel caso di cessione dell'elettrone si parla di legame ionico. L'energia di legame è sempre di qualche eV.



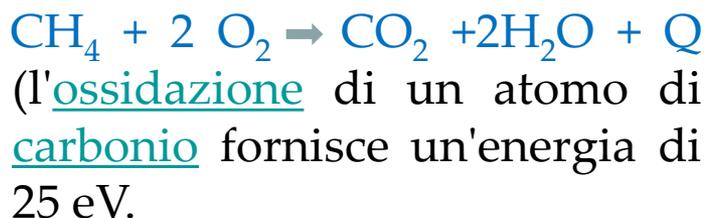
Molecola d'acqua





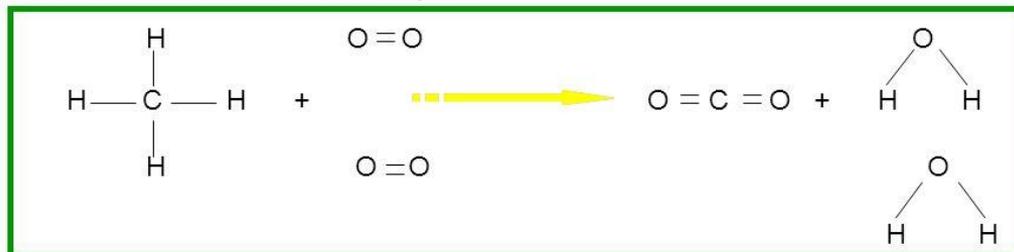
Reazione di Combustione

- La combustione avviene tra l'ossigeno e altri elementi ed è accompagnata da uno sviluppo di energia sotto forma di calore.
- Gli elementi base dei combustibili sono l'idrogeno e il carbonio, che quando bruciano con l'ossigeno producono acqua e anidride carbonica.
- Combustione del metano:



Il calore di reazione

Il **calore emesso** nel corso della reazione ha come fonte l'**energia dei legami delle molecole**. Nella combustione del metano, ad esempio:

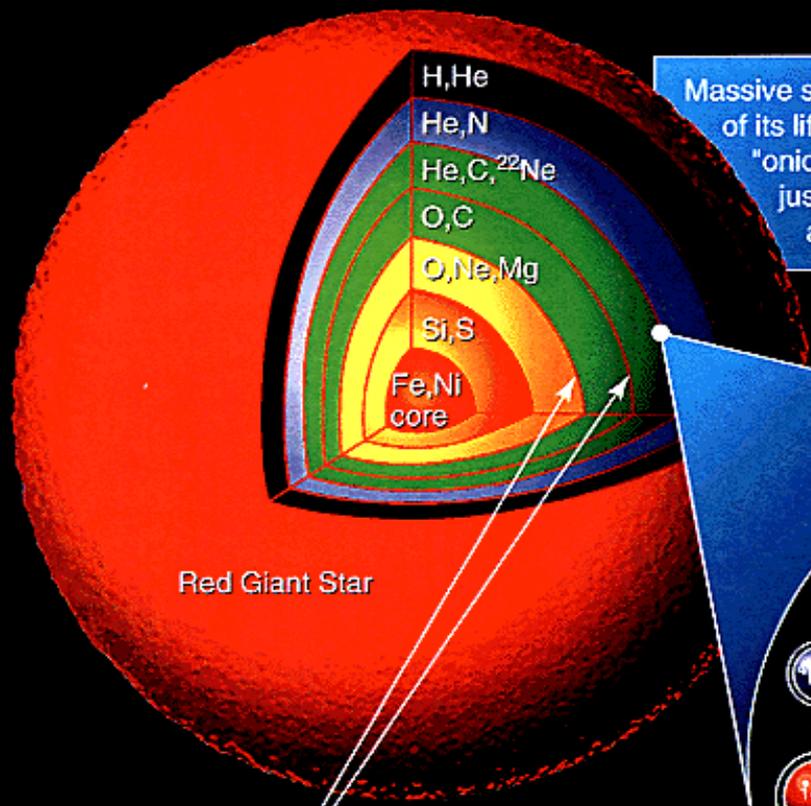


L'**energia** immagazzinata nei **legami C-H** del metano e nei **legami O=O** dell'ossigeno è **maggiore** dell'energia dei **legami C=O** dell'anidride carbonica e dei **legami H-O** dell'acqua. **Parte dell'energia** immagazzinata nei legami dei reagenti si libera **sotto forma di calore**, il **resto** viene immagazzinato **nei legami prodotti**. **Si formano molecole più stabili, con legami più forti.**



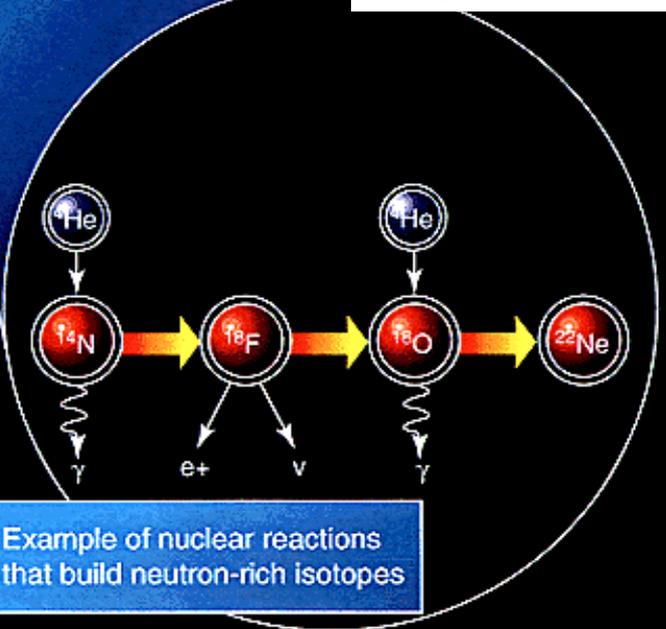
LE VIE DELLA SCIENZA

Tra passato, presente e futuro



Massive star near the end of its lifetime has an 'onion-like' structure just prior to exploding as a supernova

Nuclear burning occurs at the boundaries between zones

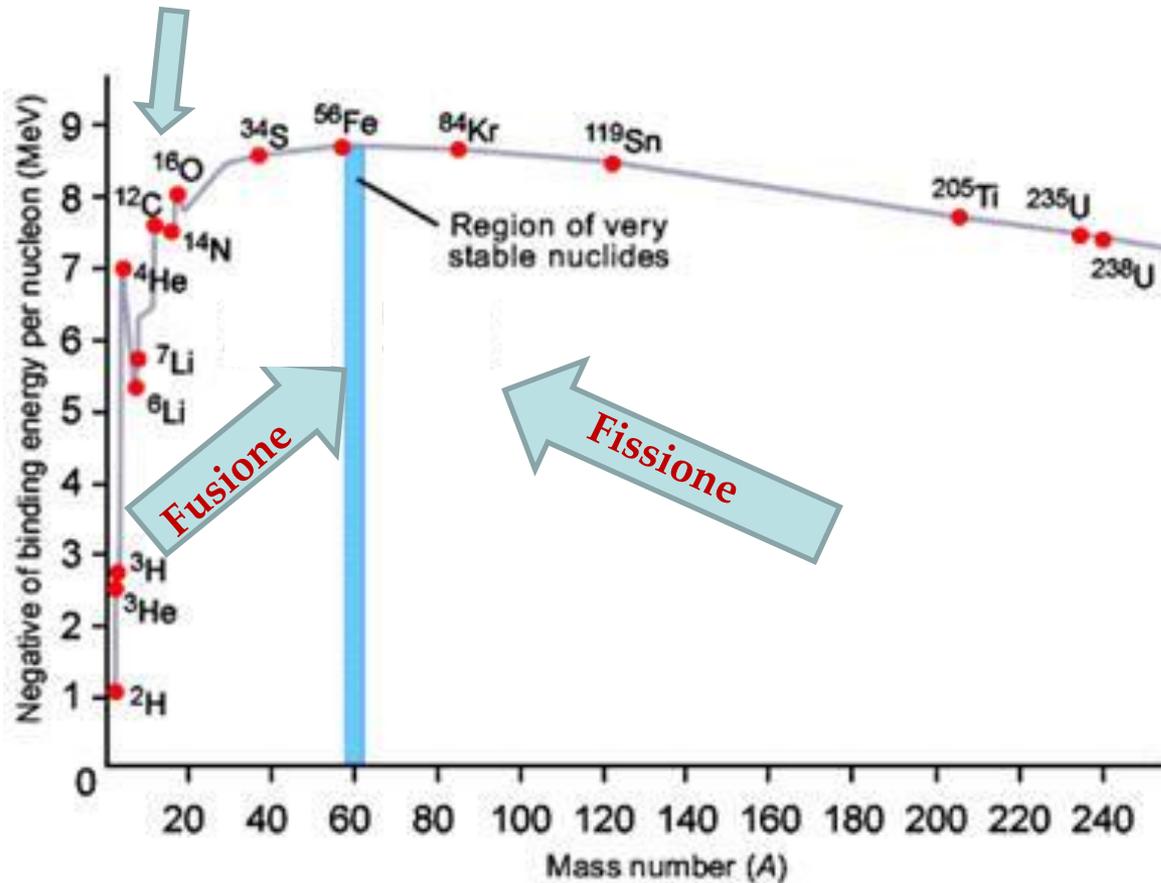


Example of nuclear reactions that build neutron-rich isotopes

Le stelle producono tutti gli elementi chimici per fusione fino al ferro-56. Gli elementi più pesanti sono prodotti in un'esplosione di una supernova, che avviene alla fine della vita di una stella di grande massa.



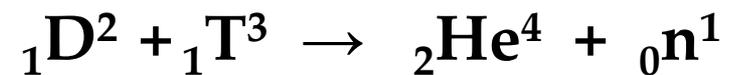
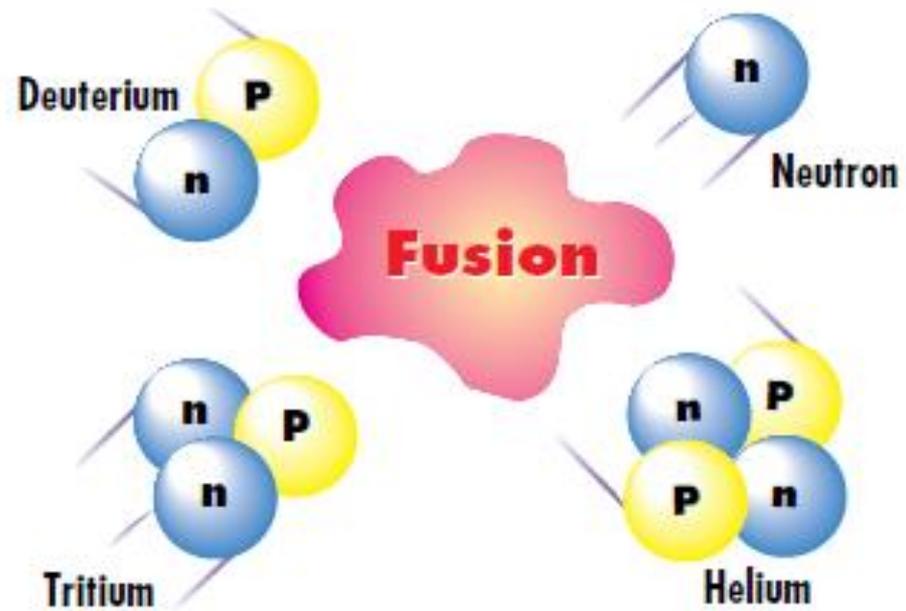
Ciclo del carbonio-azoto-ossigeno



- Nel passaggio da un nucleo meno stabile ad uno più stabile si ha rilascio di energia.
- Ci sono due modalità per sfruttare la liberazione di energia: la **Fusione** per i nuclei leggeri, la **Fissione** per i nuclei pesanti.
- L'energia è alta dell'ordine dei MeV.

Reazione di Fusione Nucleare

- Nella Fusione due nuclei leggeri si fondono in un nucleo più pesante: l'energia liberata è pari alla differenza di massa del nucleo risultante e dei due nuclei reagenti.
- La reazione avviene in un plasma ionizzato ad alta temperatura e si libera una energia di circa 17.6 MeV.
- Il plasma costituisce il 99% dell'Universo.



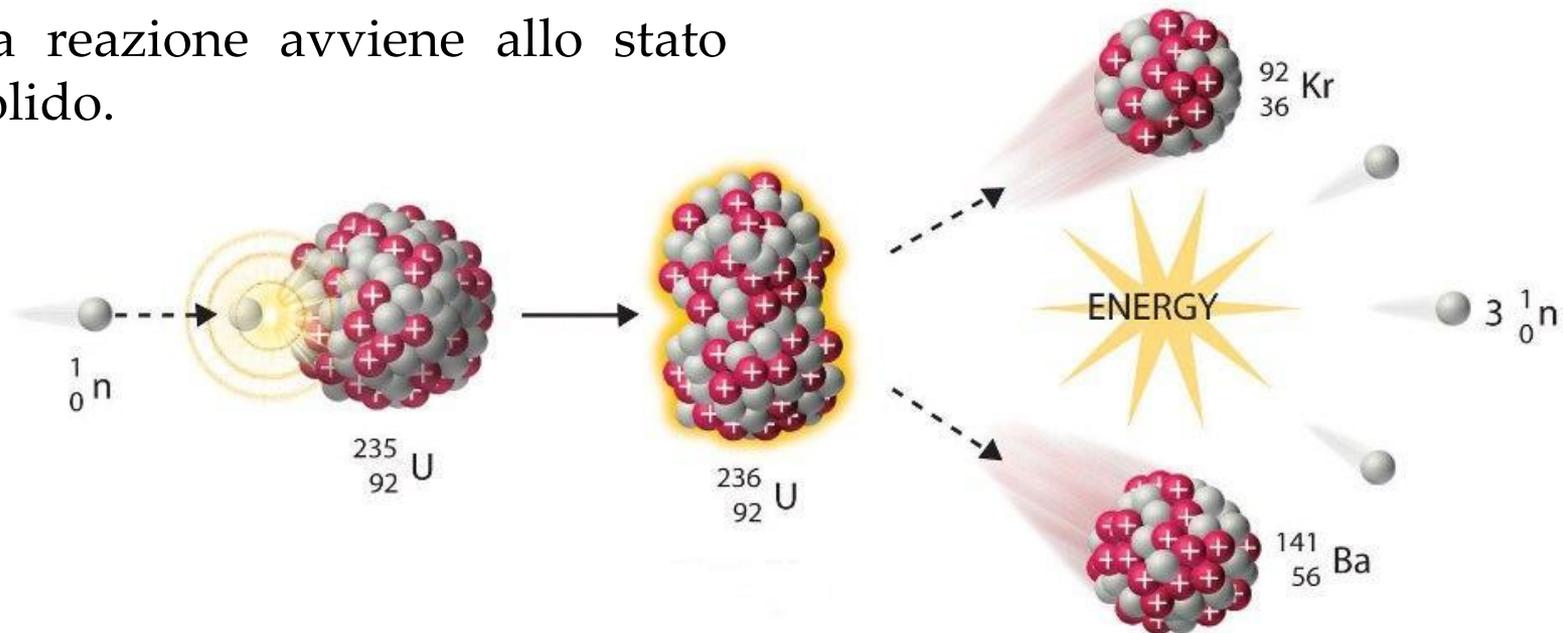
$$3.5 \text{ MeV} + 14.1 \text{ MeV}$$

10

Reazioni di Fissione Nucleare

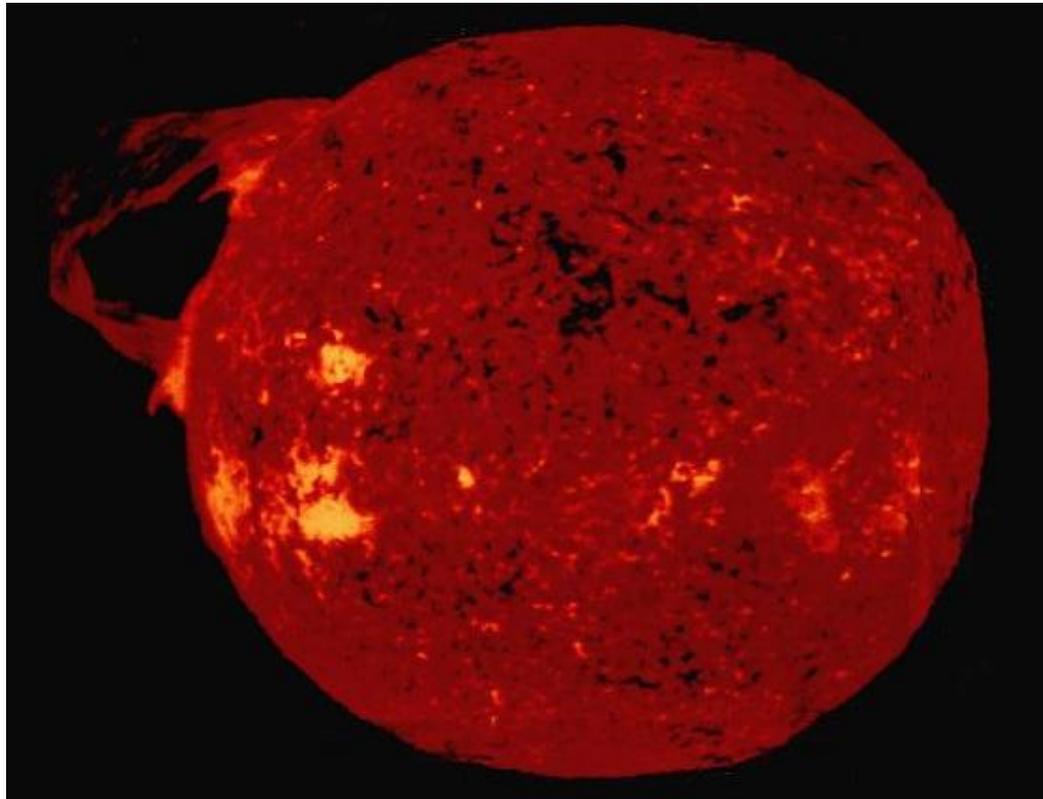
- Una reazione di Fissione Nucleare consiste nella scissione di un nucleo pesante in due nuclei più leggeri.
- La reazione avviene allo stato solido.

- La massa complessiva dei frammenti è minore della massa del nucleo di partenza e si libera una energia di circa 200 MeV.





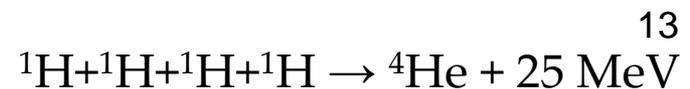
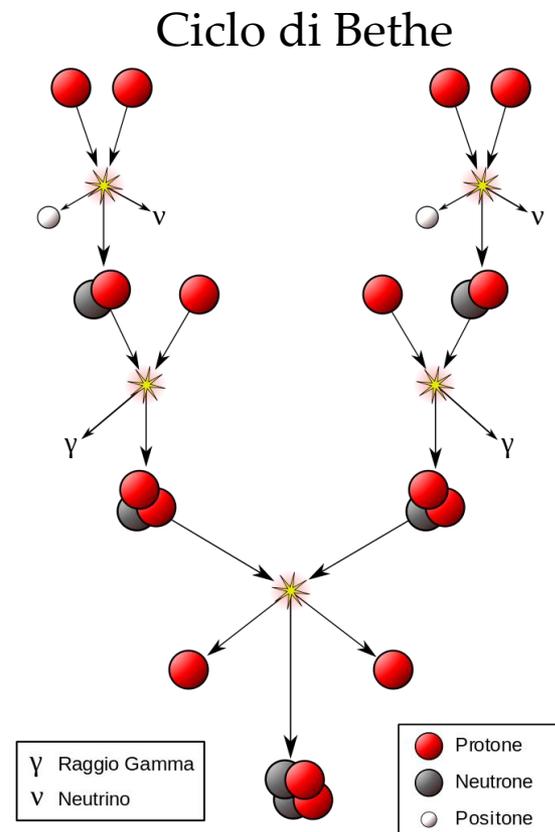
Un esempio di reattore a fusione



- ❑ Il sole produce l'energia necessaria al nostro pianeta attraverso reazioni di fusione nucleare.
- ❑ Nel Sole vengono fuse 600 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo, e di queste 4 milioni di tonnellate convertite in energia secondo $E=mc^2$.
- ❑ Queste reazioni producono 4×10^{26} watt di cui meno di un milionesimo cade sulla terra.

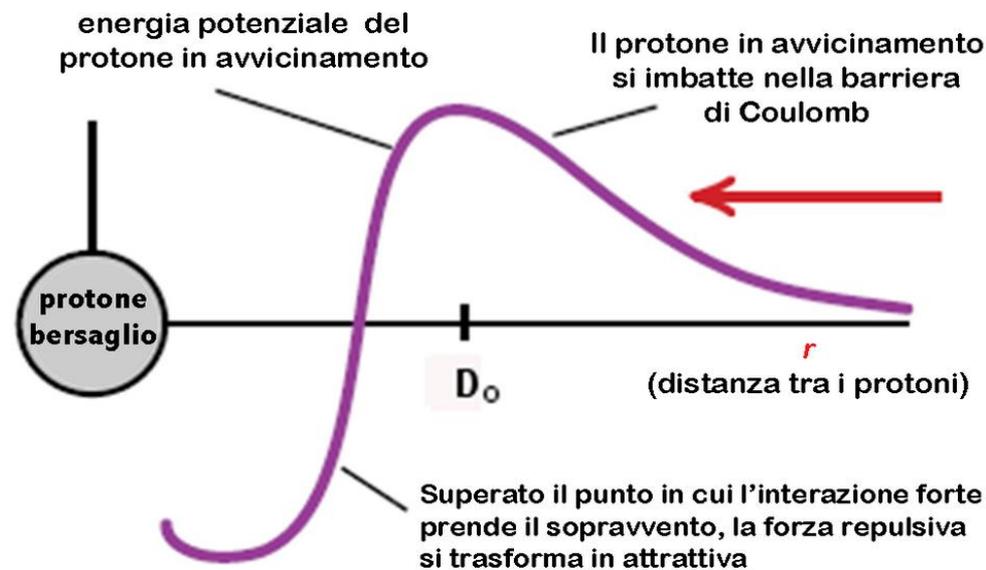
Le reazioni di fusione nel sole

- La catena protone-protone, è la fonte di energia nelle stelle di piccola massa, come il Sole.
- Il sole è costituito da **idrogeno** ed **elio**, l'alta temperatura (circa 15 milioni di K nel nucleo) consente la vita della stella che altrimenti imploderebbe per attrazione gravitazionale.
- Il ciclo di Bethe e gli altri che partono dall'idrogeno richiedono grandi densità e grandi dimensioni = confinamento gravitazionale.



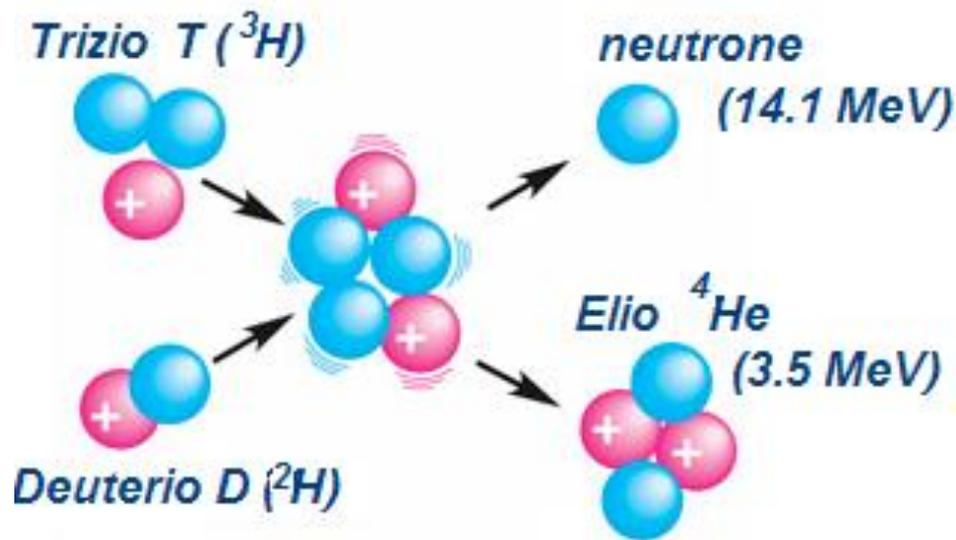
Le reazioni di fusione nel sole

- Affinchè i due protoni possano fondere è necessario vincere la cosiddetta **barriera di Coulomb**, cioè la forza repulsiva che esiste tra particelle dotate di carica elettrica uguale.
- La barriera di Coulomb va superata fino a portare i due protoni ad una distanza (10^{-15} m) tale che possa attivarsi la forza nucleare. A distanze così piccole la forza richiesta è molto alta 1,25 MeV.



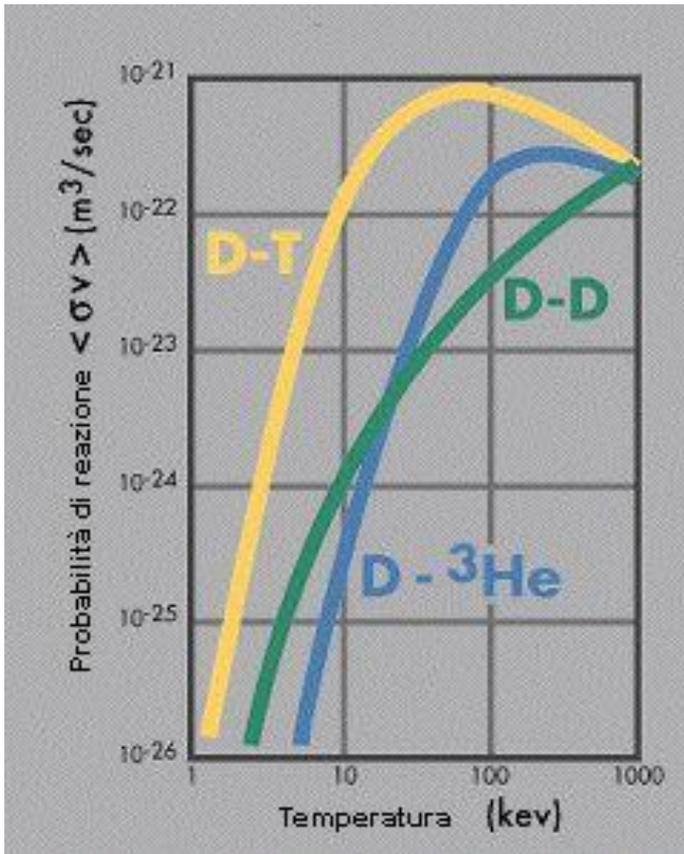
- La meccanica quantistica ci soccorre, può succedere, sia pure molto raramente, che un protone si trovi "magicamente" dall'altro lato della barriera, avendo preso a prestito l'energia mancante: è il cosiddetto **effetto tunnel**.

Di che cosa abbiamo bisogno per fare un reattore a fusione in laboratorio ?



- ❑ Per ottenere energia da fusione sulla Terra dobbiamo partire da isotopi dell'idrogeno che reagiscono più facilmente.
- ❑ La reazione più favorevole è quella in cui si fonde il deuterio con il trizio per dar luogo ad elio ed un neutrone in un plasma a ~ 10 keV.

Di che cosa abbiamo bisogno per fare un reattore a fusione in laboratorio ?

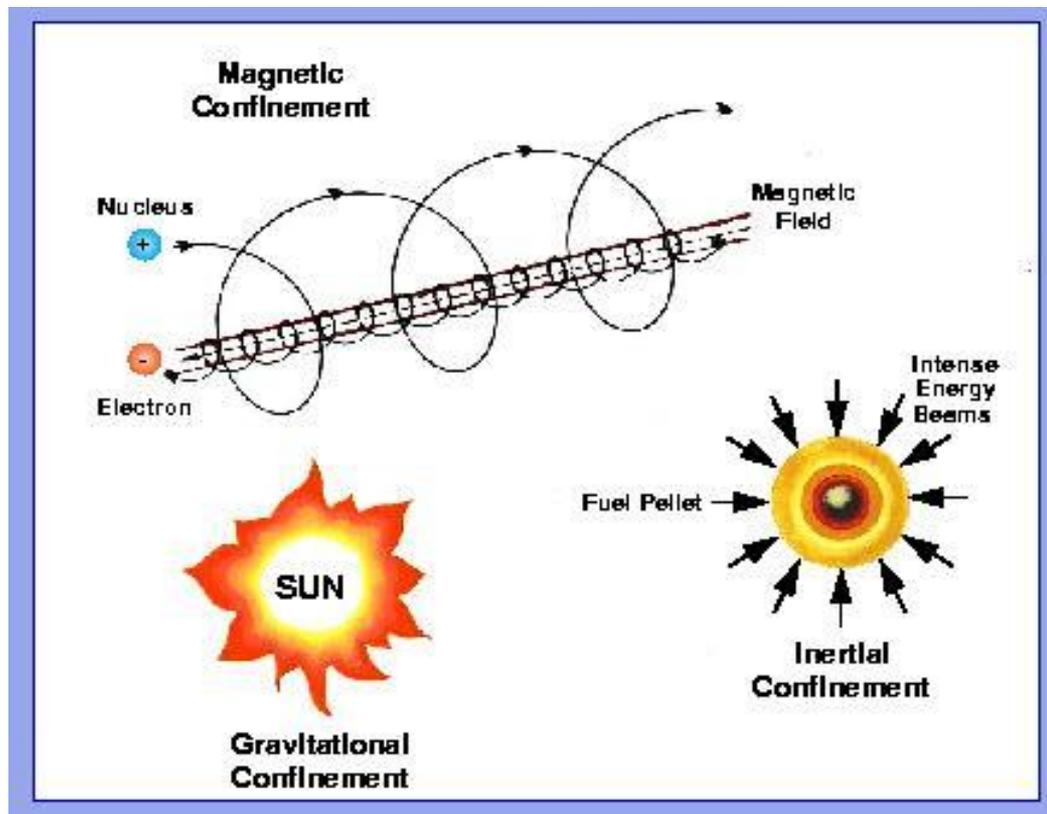


- In un plasma i nuclei sono liberi di incontrarsi e fondere, l'alta temperatura aumenta la probabilità degli incontri. Questo sistema deve essere confinato per un tempo sufficientemente lungo affinché avvengano numerose reazioni.

- La fusione avviene solo se il prodotto di densità (n), temperatura (T) e il tempo di confinamento dell'energia (τ_E) è maggiore di un certo valore.

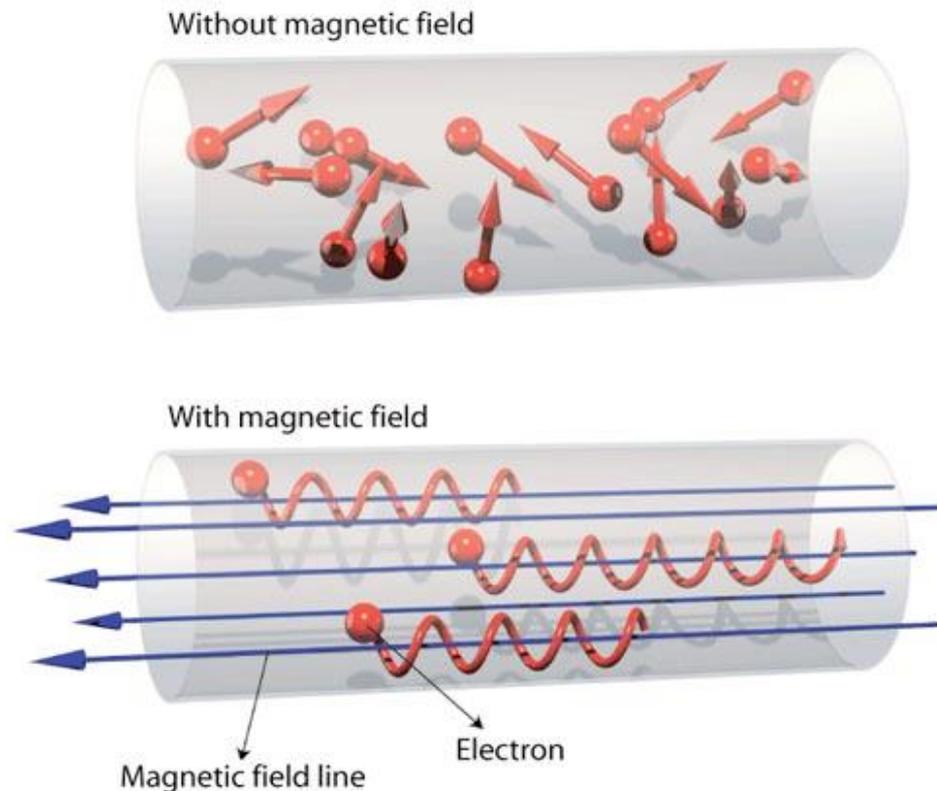
Come si realizzano queste condizioni

- ❑ In laboratorio non possiamo creare intensi campi gravitazionali ... allora dobbiamo usare altre tecniche.
 - ❑ Confinamento magnetico o confinamento inerziale



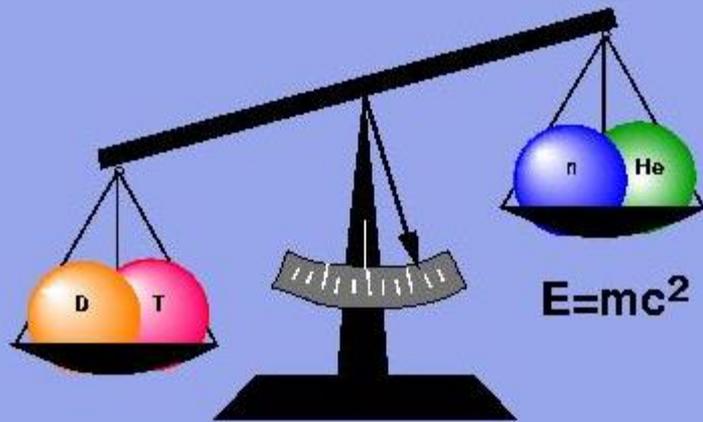
Confinamento magnetico

- Il confinamento magnetico sfrutta il fatto che il plasma è costituito da particelle cariche e che queste sono soggette alla forza di Lorentz





Perché ci interessano le reazioni di fusione nucleare



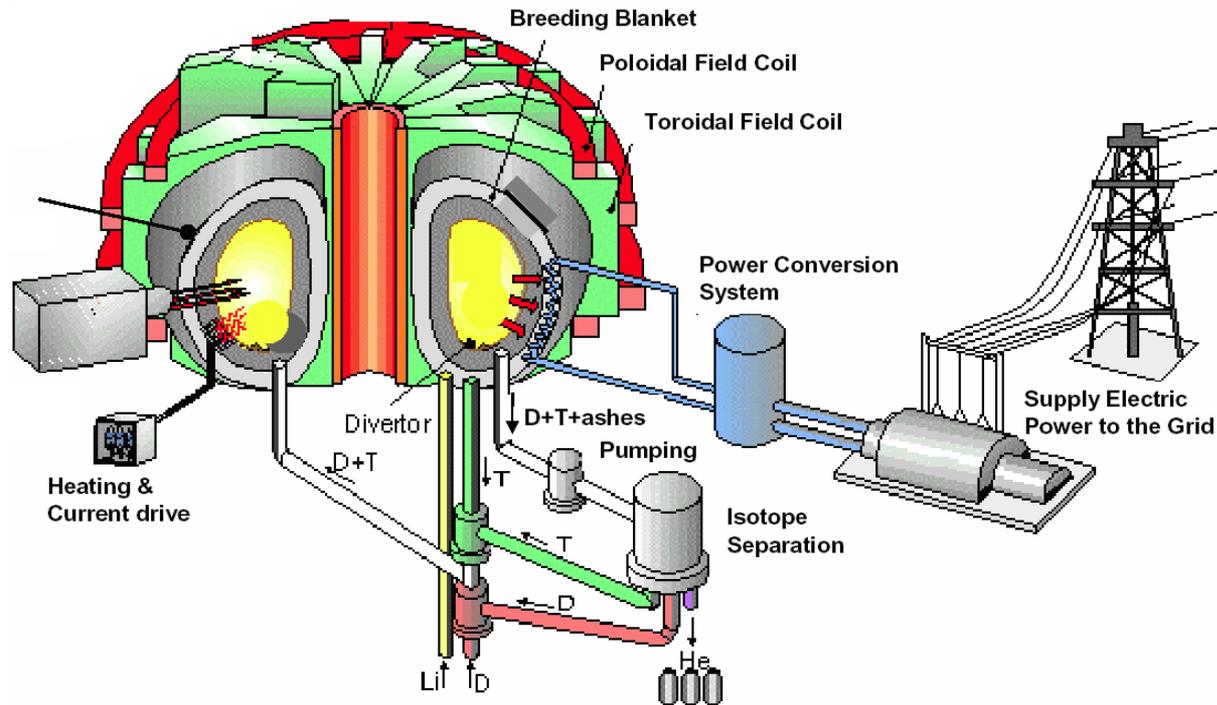
- The fraction of mass “lost” is just 38 parts out of 10,000
- Nevertheless, the fusion energy released from just 1 gram of DT equals the energy from about 2400 gallons of oil

- Dalle reazioni di fusione nucleare come da quelle di fissione si ricava una grande quantità di energia grazie alla trasformazione di massa in energia.
- L'energia ricavata dalle reazioni di fusione nucleare potrà essere trasformata in elettricità in nuove centrali che sostituiranno le centrali elettriche tradizionali.



Centrali elettriche a fusione

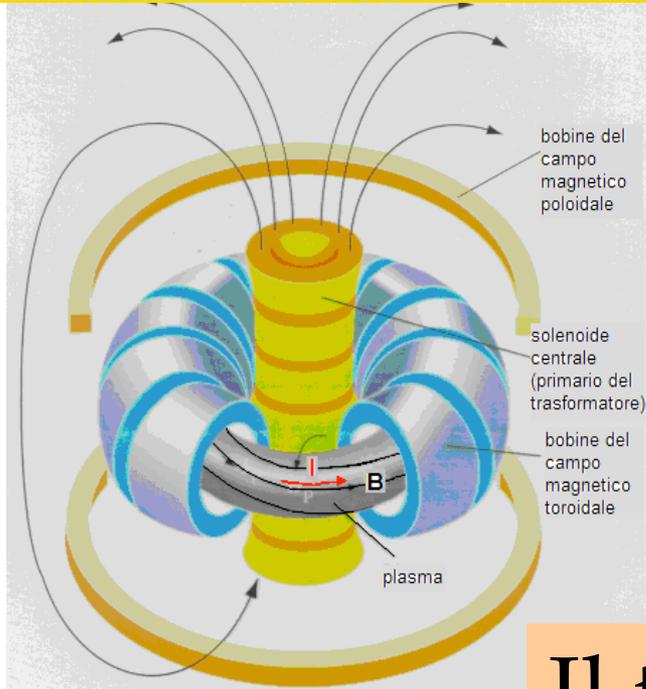
- Nel reattore a fusione le particelle di elio riscaldano il plasma.
- I neutroni trasferiscono la loro energia al mantello di litio del reattore, generando il trizio e tramutando energia in calore, e quindi in energia elettrica.





Vantaggi delle Centrali a fusione

- Intrinsecamente sicure
- Non si producono scorie radioattive
- Non producono gas effetto serra (CO₂)
- Abbondanza e disponibilità dei combustibili
 - Deuterio contenuto nell'acqua
 - Litio abbondante sulla terra e negli oceani
- Producono una quantità enorme di energia
- Si attiveranno soltanto le strutture del Reattore**

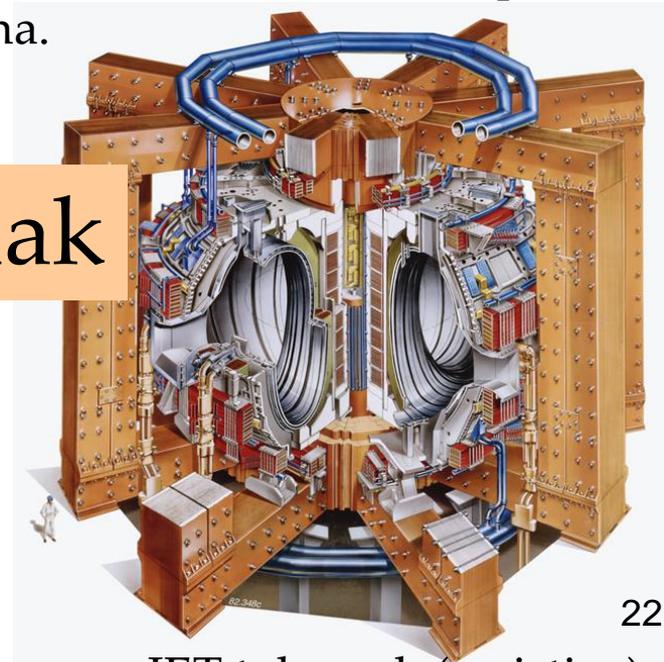


- ❑ La componente toroidale del campo magnetico è prodotta da bobine avvolte attorno all'anello di plasma.
- ❑ Il solenoide centrale induce una corrente che genera il plasma (breakdown) e lo scalda.
- ❑ Altre bobine controllano la posizione del plasma.

Il tokamak



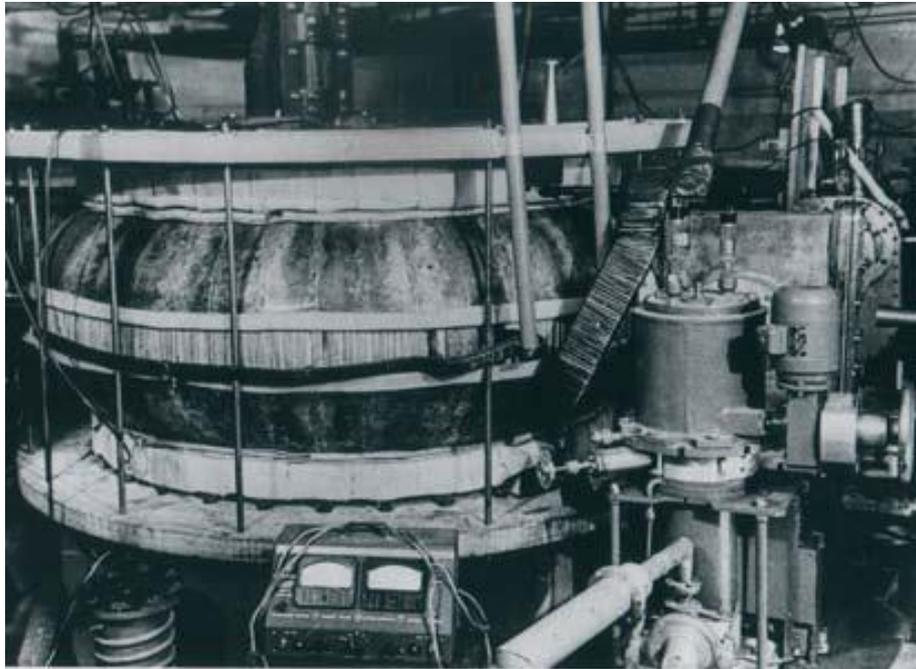
Stellarator . Steady-state configuration



JET tokamak (resistive)



Il tokamak

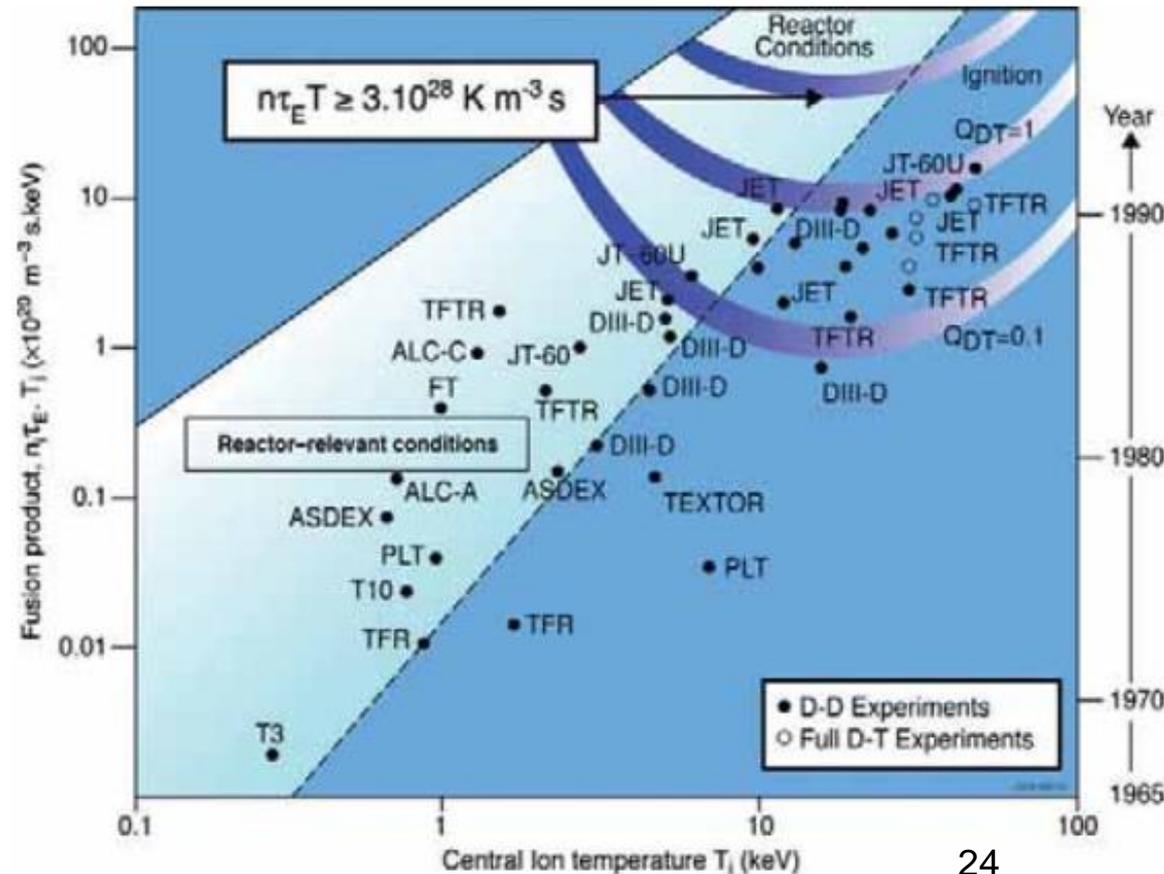


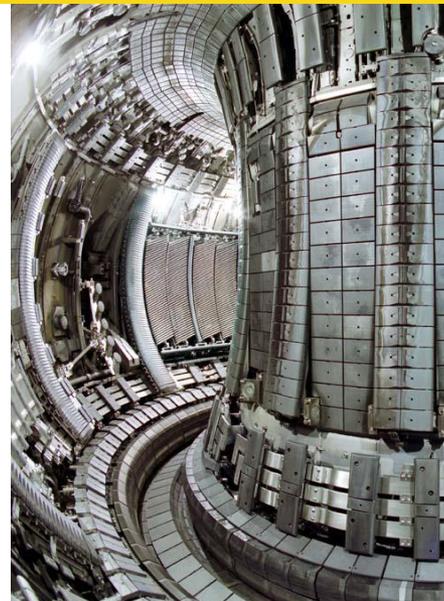
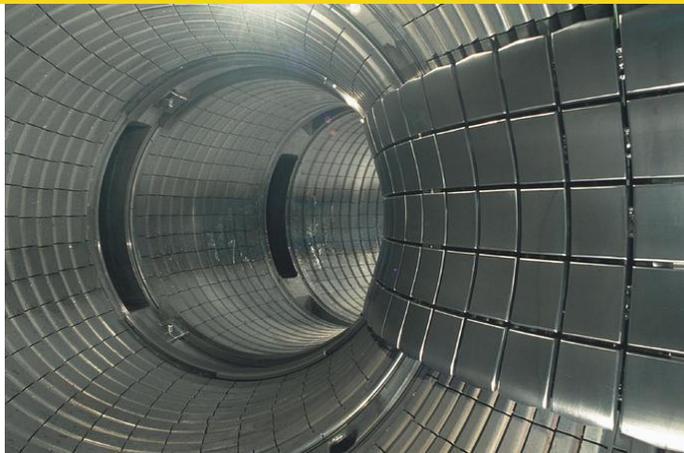
Tokamak T-1; 1958

- ❑ La configurazione magnetica "tokamak" risulta dalle ricerche del 1950 dei fisici russi Andrei Sakhrov e Igor Tamm.
- ❑ Nello stesso periodo, negli Stati Uniti Lyman Spitzer, ai laboratori di Princeton, studiava la configurazione "stellarator".
- ❑ Nel 1968 gli scienziati russi annunciarono di avere raggiunto una temperatura degli elettroni di oltre 1000 eV in un tokamak (1 elettronvolt equivale a 11605 kelvin).
- ❑ Gli scienziati americani, che erano lontani dal raggiungere tali prestazioni, rimasero sospettosi finché i test effettuati con il laser, confermarono i risultati.

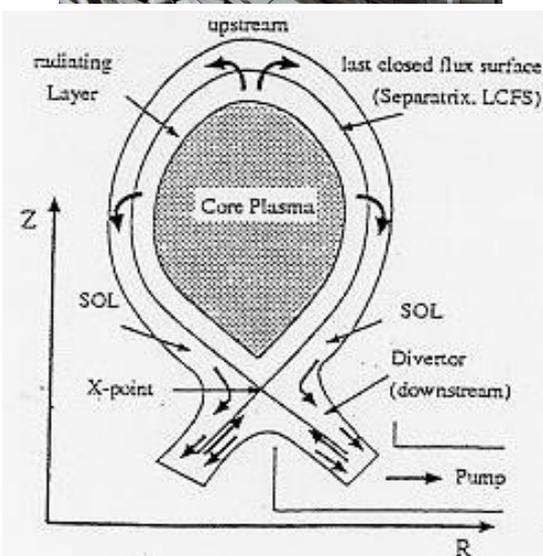
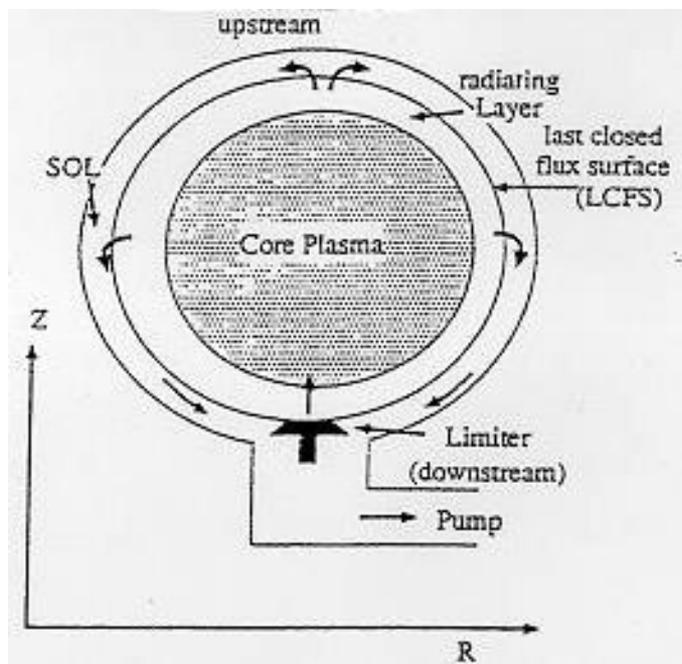
Il tokamak

- I risultati sperimentali secondo il prodotto triplo $n\tau_E T$ sono migliorati di un fattore superiore a 1000 in soli 25 anni.
- Il JET può essere ritenuta la macchina leader nei programmi mondiali della fusione in termini di temperatura ionica T_i e di prodotto triplo $n\tau_E T$.



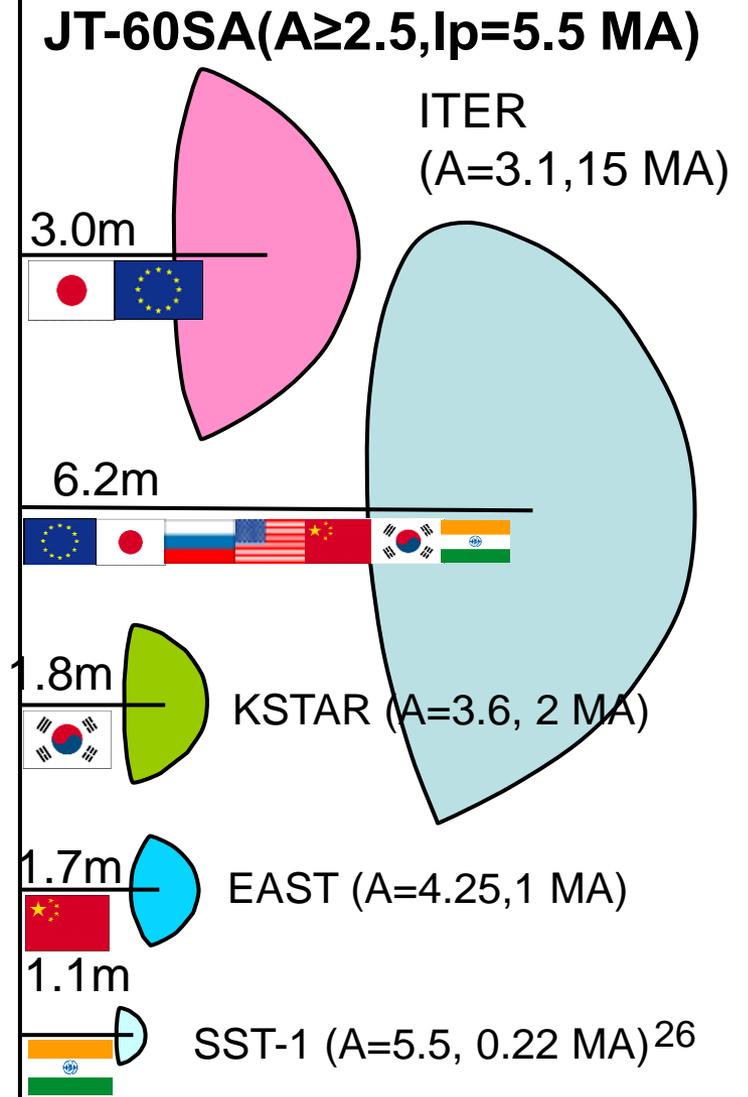
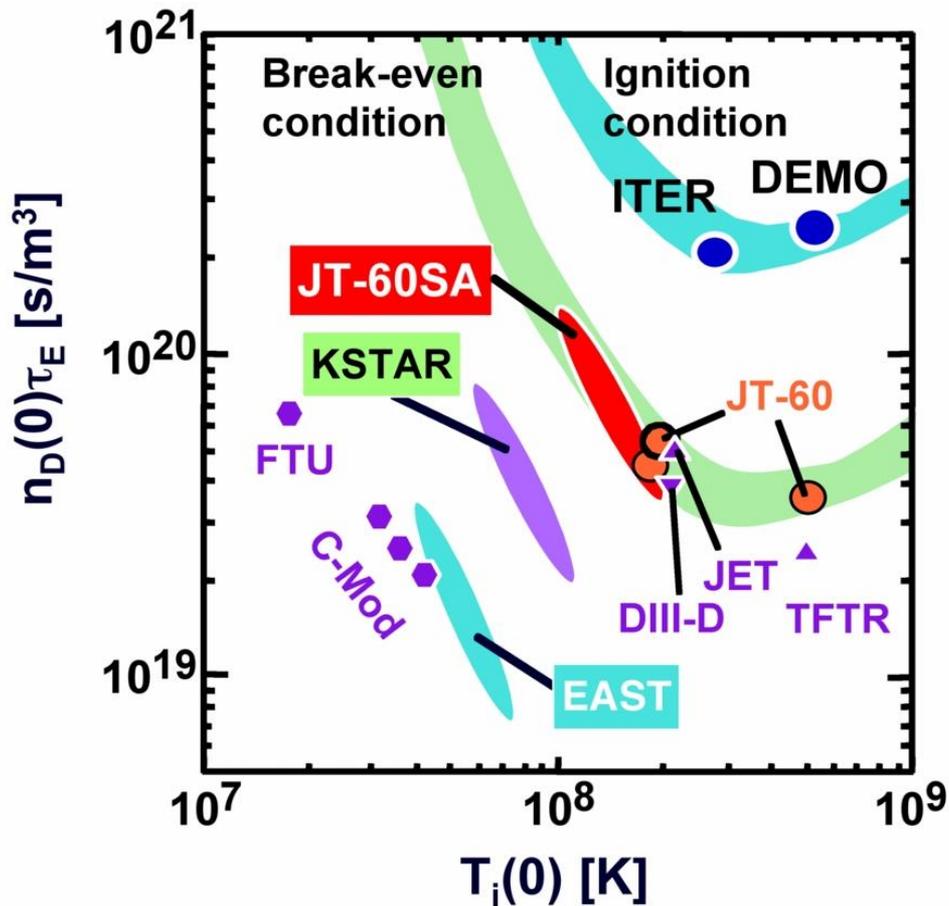


Limiter
&
Divertore



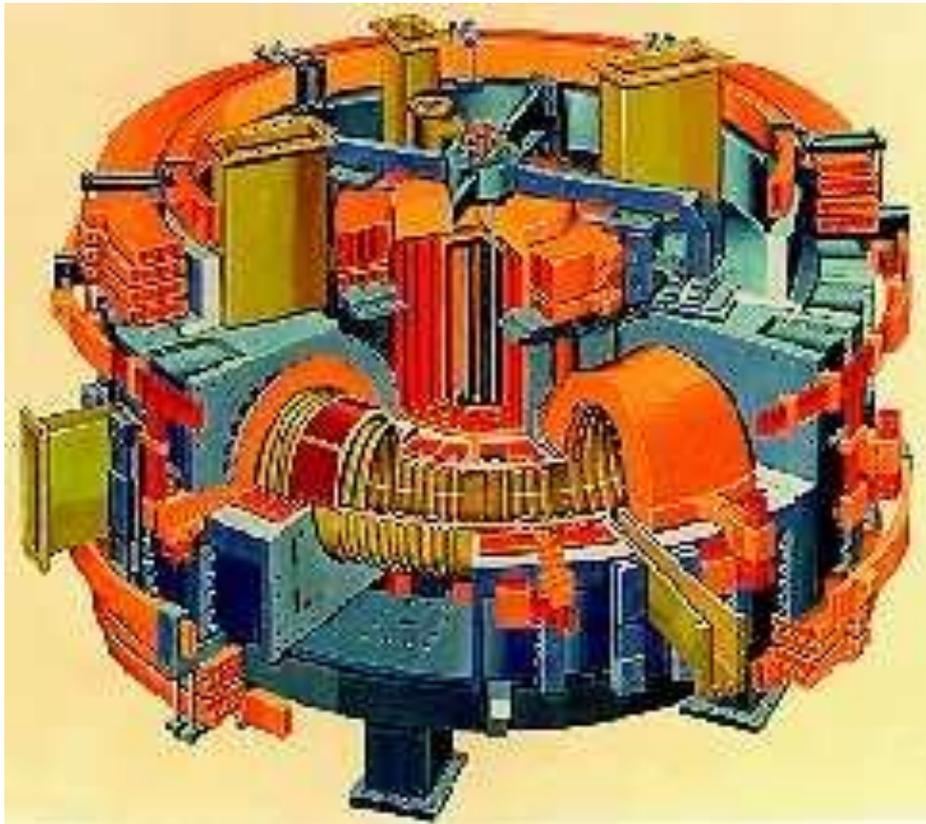


- Analisi comparativa della forma di plasma di Tokamak in relazione ad esperimenti presenti e futuri.





Il tokamak del C.R. Frascati FT

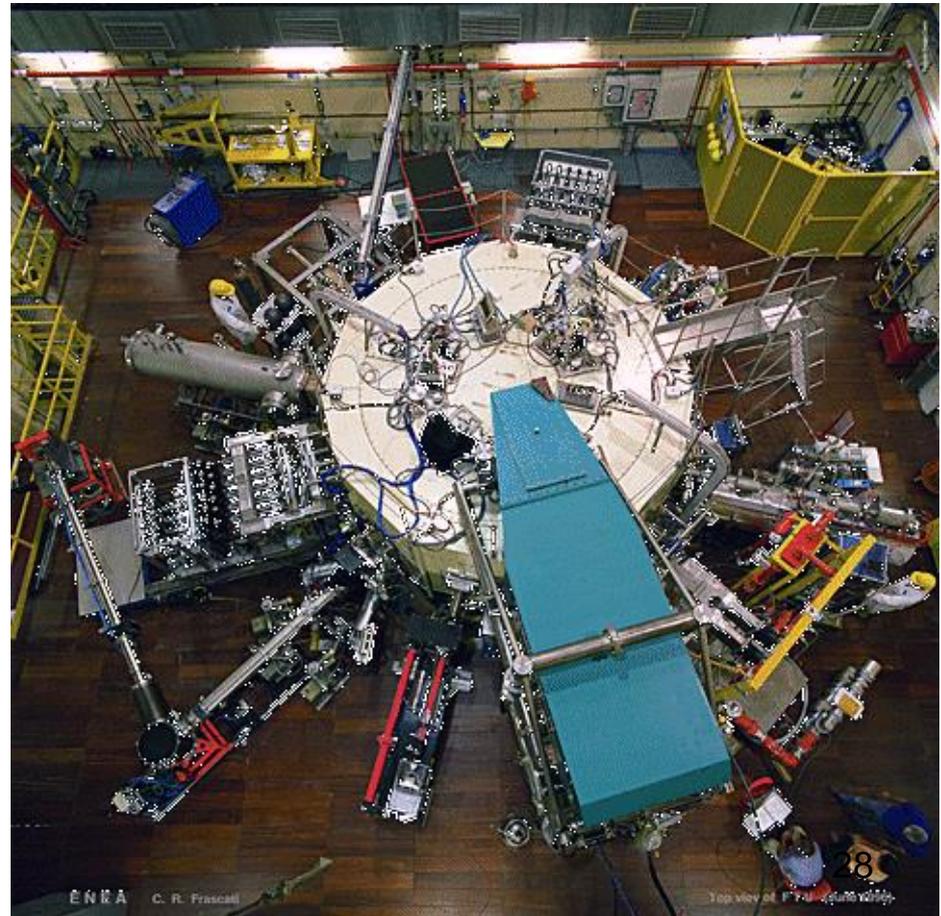


- Nel 1977 entrò in funzione la macchina FT, Frascati Tokamak, un apparato sperimentale di forma toroidale per lo studio della fusione termonucleare controllata caratterizzato dalla compattezza, dall'alto valore del campo magnetico (10 Tesla), da corrente elevata e dal particolare metodo di riscaldamento supplementare del plasma mediante onde elettromagnetiche a radiofrequenza.



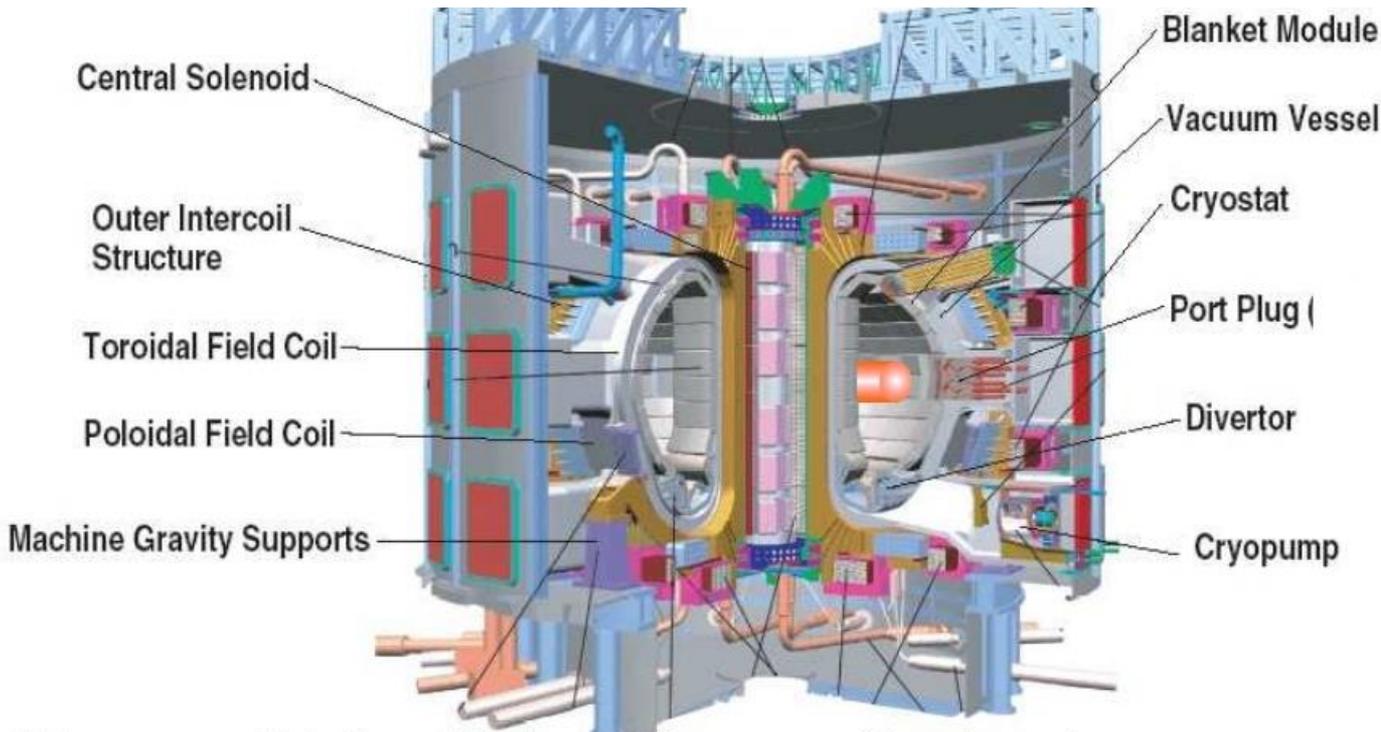
Il tokamak del C.R. Frascati FTU

- Il Tokamak di Frascati FTU è entrato in funzione nel 1989. Il campo magnetico toroidale è di 8T, la corrente di plasma è di 1.6 MA e il raggio maggiore è di 0.93 m. E' corredato di un gran numero di diagnostiche che consentono misure di densità, temperatura, radiazione etc.



Tokamak in costruzione

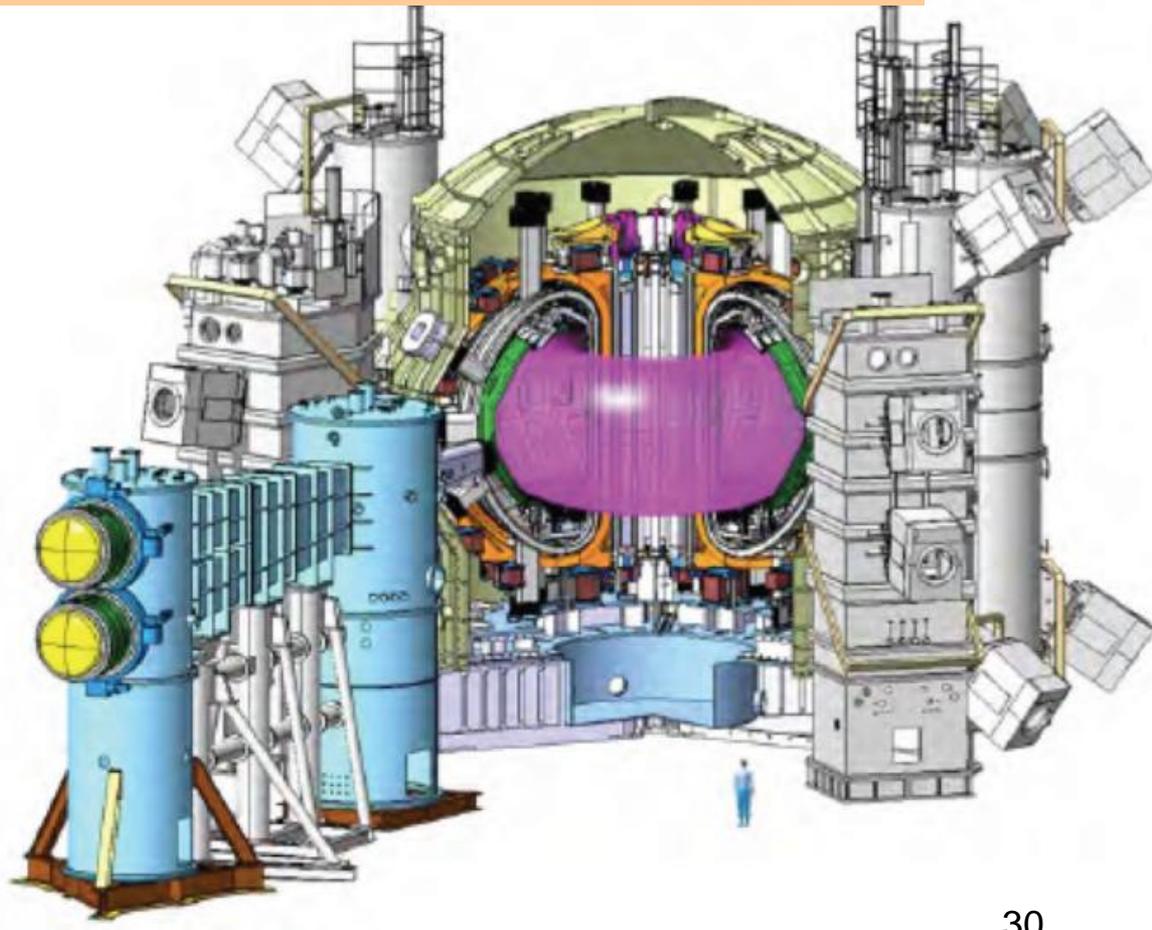
- ITER rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO). I sette membri China, Europa India, Giappone, Corea, Russia e US hanno firmato un accordo nel 2006 per condividere il costo di costruzione e decommissioning.



* The orangey bit in the middle is meant to represent the plasma torus

Tokamak in costruzione

- A margine dei negoziati sul sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato il 'Broader Approach'. L'ENEA partecipa al programma di realizzazione del tokamak JT-60SA.
- La missione di JT-60SA è di contribuire ad accelerare la realizzazione della energia da fusione risolvendo alcuni aspetti di fisica di ITER e Demo.
- Opererà ad alta densità in regimi di modo H, con potenza di riscaldamento fino a 41 MW e bobine superconduttrici.

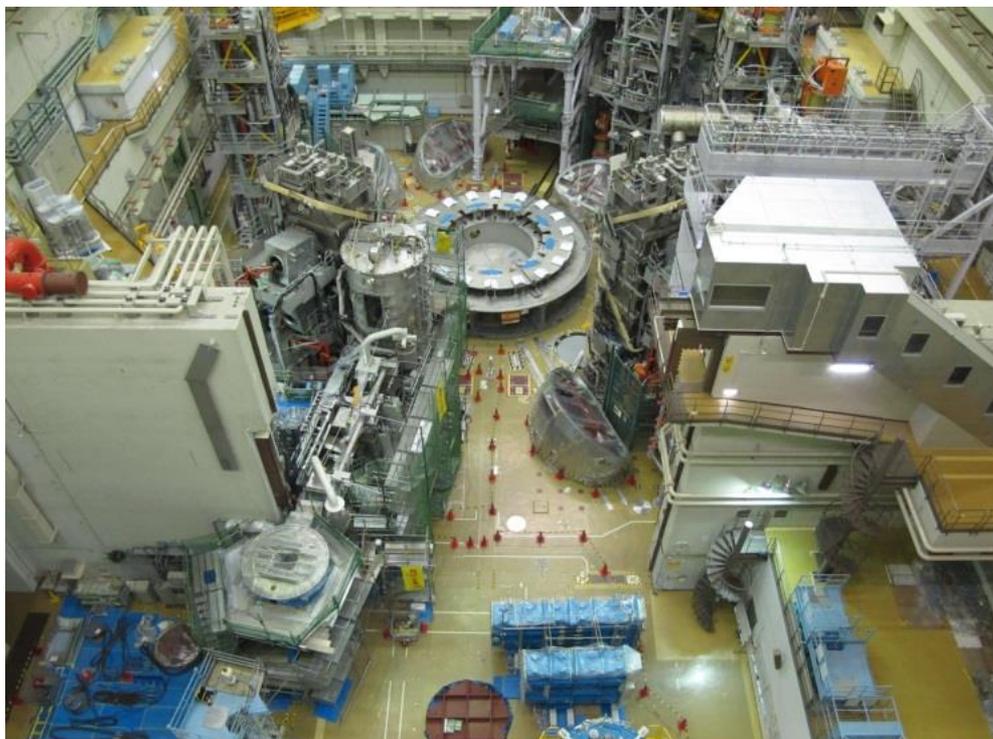


Vista del Tokamak JT-60SA

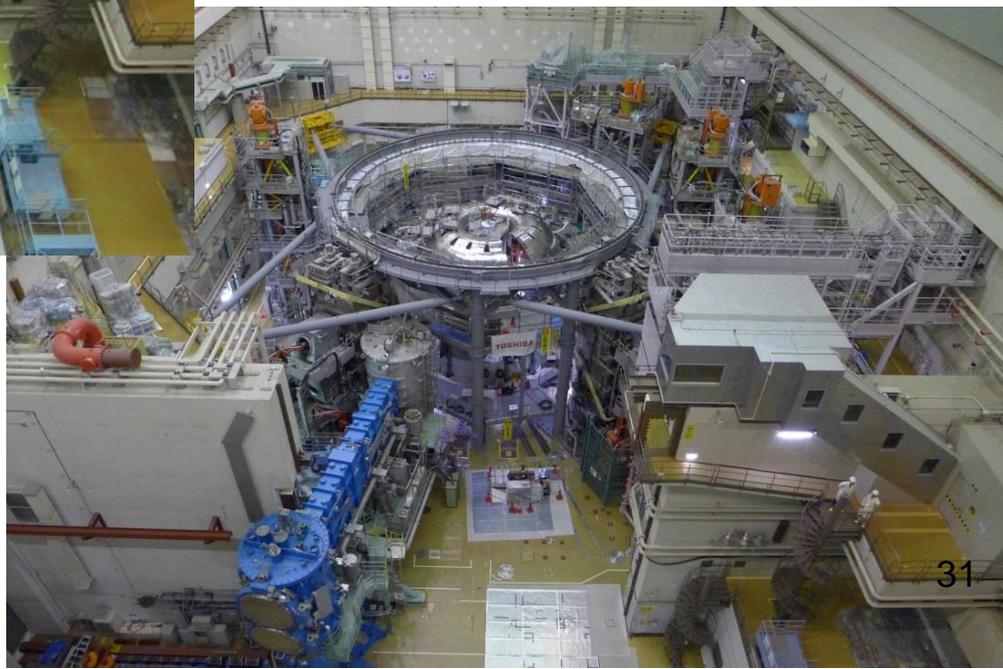


LE VIE DELLA SCIENZA

Tra passato, presente e futuro



- Vista della hall che ospita il reattore Tokamak JT-60SA.





LE VIE DELLA SCIENZA

Tra passato, presente e futuro



Foto di gruppo nella Hall dei laboratori di Naka in occasione del TCM-20



- Foto di gruppo negli stabilimenti di Genova della ASG superconductors S.p.A., in occasione del TCM-23.

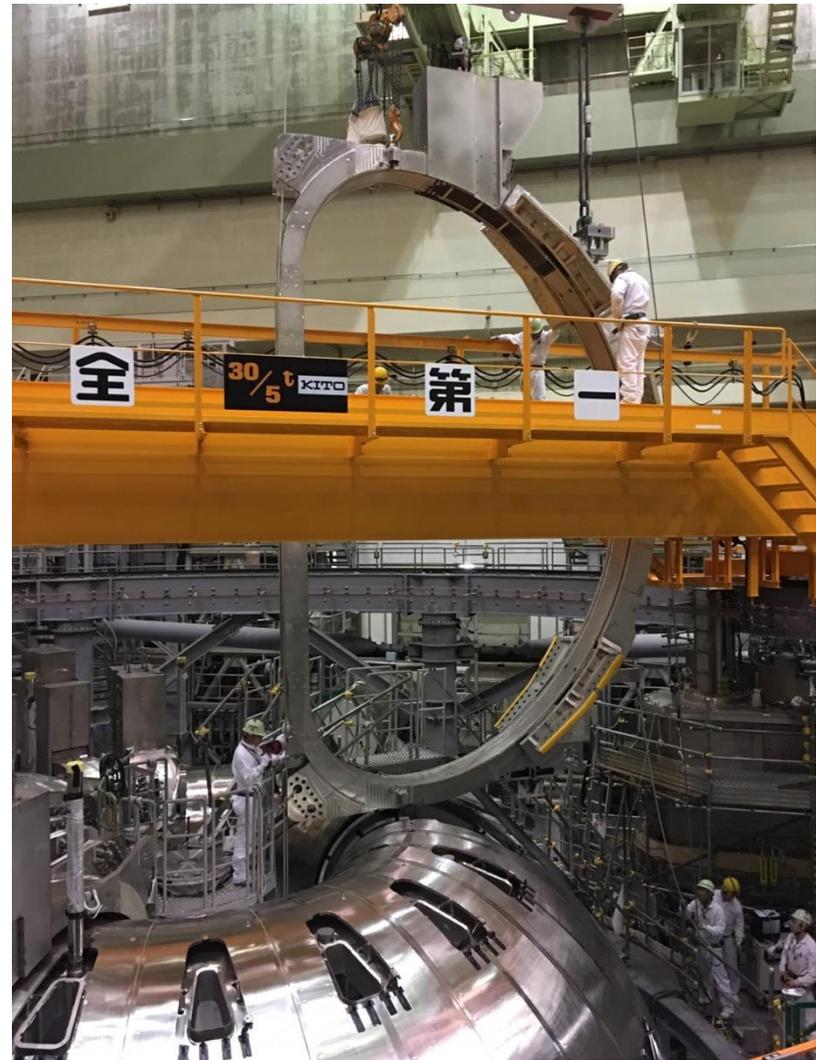
- Primi due moduli toroidali consegnati a Naka:
TFC-01 (Roberta): 15/11/2016;
TFC-03 (Eleonora): 25/1/2017





LE VIE DELLA SCIENZA

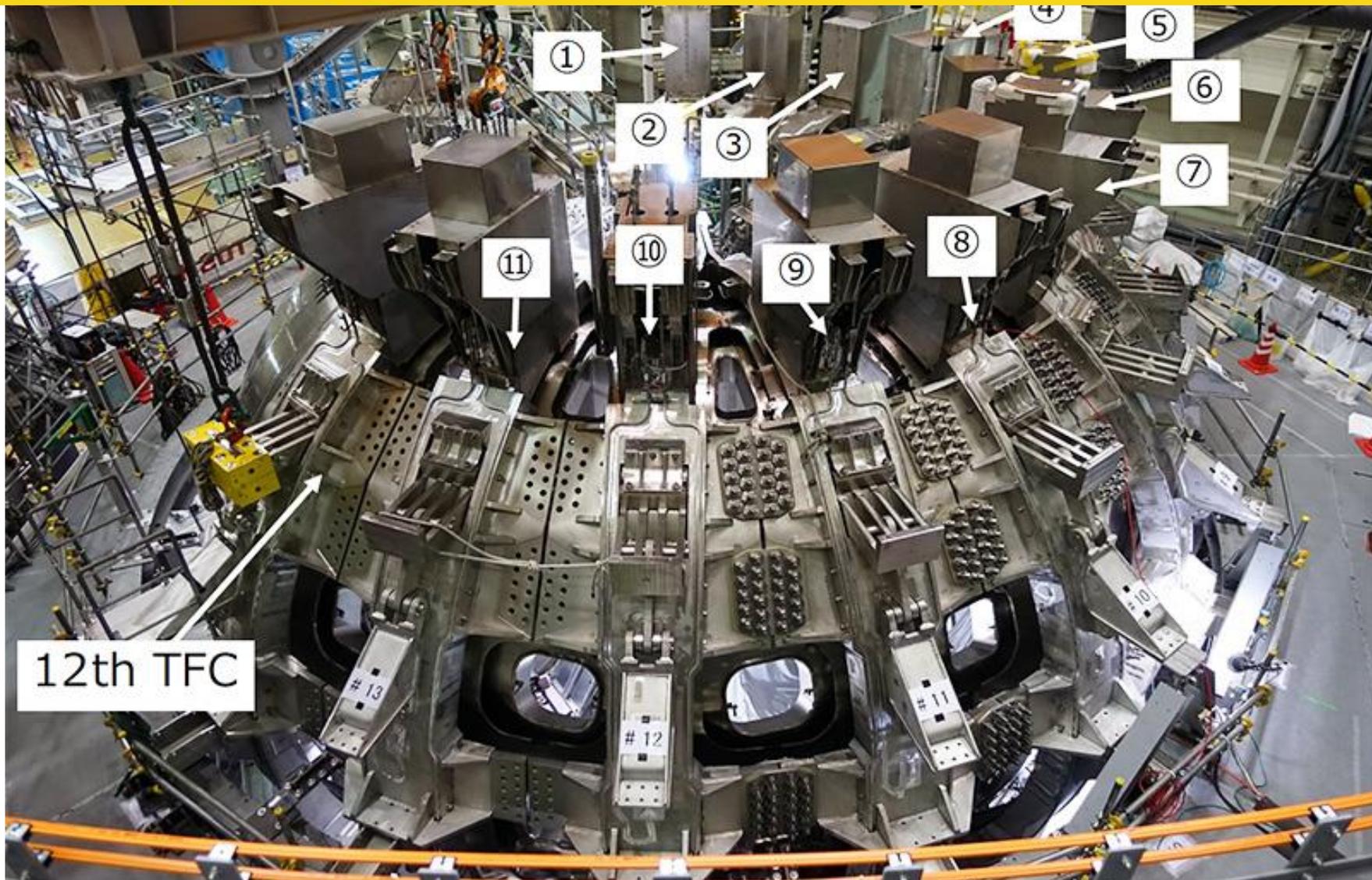
Tra passato, presente e futuro





LE VIE DELLA SCIENZA

Tra passato, presente e futuro





LE VIE DELLA SCIENZA

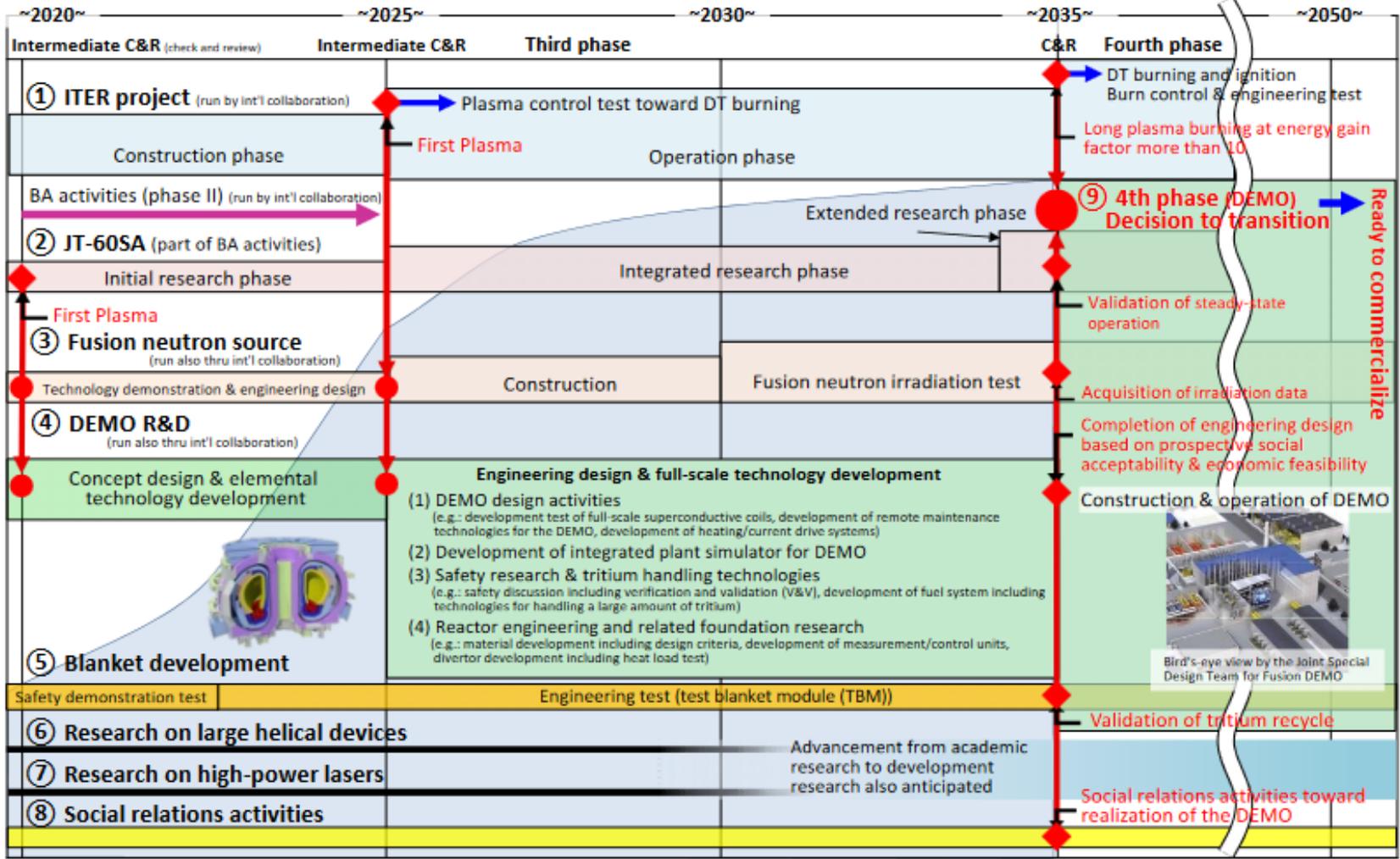
Tra passato, presente e futuro

Legend

- ◆ When to achieve the target
- ⬆ Target to achieve
- When to decide transition to the next phase
- ▭ Figure of activities required

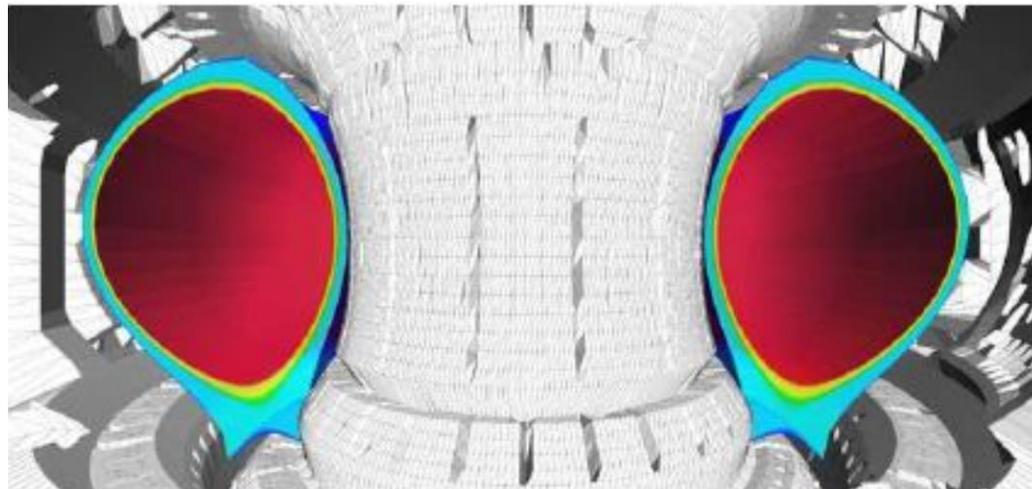
A Roadmap toward Fusion DEMO Reactor

Exhibit



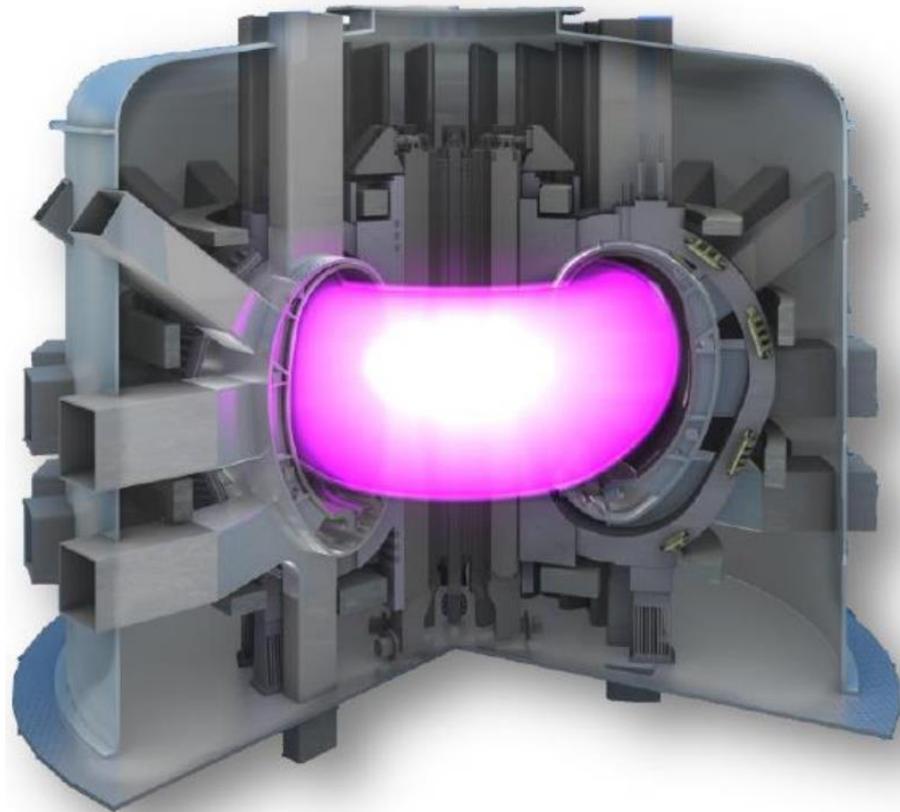
DTT Divertor Tokamak Test

- Una delle principali tappe verso la realizzazione di un reattore a fusione è costituita dallo sviluppo di una soluzione al problema dello smaltimento del calore e delle particelle prodotte dalla reazione di fusione.
- Con la macchina "Divertor Tokamak Test facility" (DTT) sarà possibile provare la fattibilità fisica e tecnologica di vari concetti di divertore in condizioni estrapolabili alle condizioni caratteristiche di DEMO.
- Le scelte progettuali per una macchina in scala ridotta di DEMO devono privilegiare lo studio dei problemi connessi allo "Scrape Off Layer" e alla regione del divertore.



Cortesia di JET-EUROfusion

- ❑ La macchina DTT opererà con: raggio maggiore $R=2.11$ m, campo magnetico toroidale $BT=6$ T, corrente di plasma $I_p=5.5$ MA, potenza addizionale $P_{Tot}=45$ MW.
- ❑ Saranno testati diversi materiali (tungsteno, metalli liquidi) con flussi termici fino a 20 MW/m².
- ❑ La realizzazione durerà circa 7 anni con un costo previsto di circa 500 M€ ed il contributo del "Programma Juncker" da circa 250 miliardi di Euro.
- ❑ Almeno 150 persone coinvolte nelle operazioni (50 % ricercatori e personale qualificato, 50 % personale di supporto).
- ❑ Notevole numero di lavoratori coinvolti nelle fasi di costruzione ed operazione, e spin-off.



DTT Divertor Tokamak Test

Conclusioni

- ❑ La comprensione della fisica dello stato di plasma ci aiuta a comprendere l'evoluzione stellare e la formazione dell'universo
- ❑ Il plasma può avere diversi campi d'impiego come la costruzione di parti di computer e motori interplanetari
- ❑ Gli sforzi sullo studio della fusione hanno visto l'impegno di più generazioni ed hanno prodotto progressi significativi
- ❑ Il sogno della produzione di energia sicura ed economica sembra a portata di mano