

## BAB 12

### FUSI NUKLIR

Dari analisis terhadap energi ikat per nukleon untuk inti ringan yaitu di bawah  $A = 56$  dapat dihitung bahwa penggabungan inti-inti yang lebih ringan menjadi inti yang lebih berat dapat menghasilkan energi sebagai sumber energi alternatif pengganti fisi. Proses penggabungan inti-inti ringan ini menjadi inti yang lebih berat disebut sebagai fusi nuklir.

Sebagai suatu sumber energi fusi memberikan beberapa keuntungan dibandingkan dengan fisi. Fusi melibatkan inti ringan yang mudah diperoleh dan hasil akhir juga inti ringan yang tidak bersifat radioaktif seperti inti berat hasil fisi. Tetapi sebelum dua inti ringan digabungkan, keduanya harus mengatasi gaya tolak Coulomb, sementara fisi dapat terjadi dengan neutron yang tidak memiliki penghalang gaya Coulomb dan dengan partikel energi rendah dapat digunakan. Lagipula penampang reaksi  $U^{235}$  meningkat dengan berkurangnya energi neutron. Pada sisi lain reaksi fisi yang berlangsung menggunakan partikel bermuatan penampang reaksi cenderung berkurang dengan berkurangnya energi.

Misalnya fusi dari dua inti  $^{20}\text{Ne}$  untuk membentuk  $^{40}\text{Ca}$ . Nilai  $Q$  dari reaksi ini sekitar 20,7 Mev, atau sekitar 0,5Mev/nukleon, sebanding dengan energi yang dihasilkan pada fisi. Tetapi sebelum gaya nuklir dari kedua inti tersebut bekerja, kedua inti harus digerakkan cukup dekat sampai distribusi nuklir kedua inti saling tindih. Pada titik dimana kedua permukaan saling menyentuh, energi tolak Coulombnya sekitar 21,2 Mev. Jika dapat dihasilkan suatu reaksi didalam mana dua inti  $^{20}\text{Ne}$  dapat memiliki energi kinetik 21,2 Mev, maka energi final sistem adalah 41,9 Mev.

Mempercepat  $^{20}\text{Ne}$  dengan 21,2 Mev terhadap target  $^{20}\text{Ne}$  sebenarnya tidak ada masalah, tetapi akselerator ion berat ( $^{20}\text{Ne}$  disebut ion berat oleh fisikawan akselerator) menghasilkan berkas sebesar nano sampai mikro ampere. Pada arus sekitar satu mikroampere, bahkan jika setiap partikel dalam berkas yang bereaksi (prospek mungkin hamburan adalah beberapa kali lipat lebih mungkin dibandingkan fusi) output daya akan menjadi sekitar 2 W, hampir tidak cukup bahkan untuk menyalakan laboratorium akselerator.

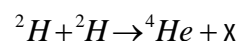
Sebagai pendekatan alternatif adalah dengan cara memanaskan wadah yang berisi gas neon sampai energi termal cukup besar sehingga memiliki probabilitas yang tinggi untuk inti mendekati satu sama lain dan bertumbukkan dengan energi 21,2 Mev. Karena energi termal digunakan untuk mengatasi penghalang Coulomb yang menghalangi terjadinya fusi maka prosesnya disebut sebagai fusi termonuklir. Untuk rata-rata energi kinetik per molekul dari

suatu gas ( $\frac{3}{2}kT$ ) menjadi  $\frac{1}{2}$  dari 21,2 Mev, kita haruslah memiliki  $kT = 7$  Mev. Pada temperatur kamar,  $kT = 0,025$  eV, sehingga dengan demikian fusi membutuhkan temperatur sekitar  $3 \times 10^8$  kali temperatur kamar atau sekitar  $10^{11}$  K.

Meskipun berbagai kelemahan, energi fusi pada saat ini merupakan subjek penelitian yang kuat dan intensif dengan menyempurnakan teknik memanaskan inti yang dapat berfusi dan untuk meningkatkan kepadatan mereka sehingga jumlah reaksi menjadi cukup besar untuk mendapatkan output energi sebanding dengan reaktor fisi (109 W). Tentu saja, fusi juga merupakan sumber energi matahari dan bintang-bintang lainnya dan karena itu bertanggung jawab terhadap evolusi kehidupan di Bumi. Memahami fusi sangat penting untuk memahami produk akhir reaksi bintang, ketika bahan bakar thermonuclear sebagian besar hampir habis dan bintang mungkin melewati fasa nova atau supernova, berakhir sebagai sepotong abu kosmik atau sebagai bintang neutron atau blackhole (lubang hitam). Paling mengerikan, senjata termonuklir adalah kutukan peradaban kita dan ancaman tetap bagi eksistensi kita.

## 12.1 Proses Dasar Fusi

Sebagaimana kita bahas pada sebelumnya fusi tidak semua "alami" proses di Bumi (seperti halnya fisi) karena keterbatasan substansial dikenakan oleh adanya penghalang Coulomb. Setelah mengatasi penghalang, fusi menjadi sangat mungkin, karena dua inti tumpang tindih cepat mencapai keadaan energi minimum. Proses dasar fusi sangat sederhana untuk dipahami dan dijelaskan dibanding proses fisi. Reaksi fusi paling mendasar,  $p + p \rightarrow {}^2\text{He}$  tidak mungkin terjadi, karena ketidakstabilan  ${}^2\text{He}$  (tapi proses alternatif analog dengan peluruhan beta dan menghasilkan  ${}^2\text{H}$  adalah langkah utama pertama dalam fusi matahari). Reaksi dasar yang lain adalah



Dimana  $\gamma$  adalah penting untuk kesetimbangan energi, karena  ${}^4\text{He}$  tidak memiliki tingkat eksitasi. Energi yang dibebaskan (nilai Q) adalah 23,8 MeV yang lebih besar dari energi separarasi neutron dan proton dari  ${}^4\text{He}$ . Reaksi yang sama adalah

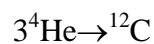


Reaksi ini disebut sebagai reaksi deuterium-deuterium atau reaksi D-D. Tentu saja, lebih stabil produk akhir terbentuk, pelepasan energi dalam reaksi menjadi paling besar. Reaksi yang terbentuk  ${}^4\text{He}$  akan cenderung menunjukkan pelepasan energi yang sangat besar



Reaksi ini disebut sebagai reaksi deuterium-tritium atau reaksi D-T. Jika partikel datang memiliki energi kinetik yang cukup kecil sehingga dapat diabaikan,  ${}^4\text{He}$  dan  $n$  akan berbagi energi 17,6 MeV sesuai dengan konservasi momentum linear, dan neutron yang monoenergetic dengan energi 14,1 MeV akan muncul. Reaksi ini sering dipakai sebagai sumber neutron cepat. Karena besarnya energi yang dibebaskan (dan karena penghalang Coulomb tidak lebih tinggi dibandingkan reaksi D-D), reaksi D-T dipilih untuk digunakan dalam reaktor fusi yang terkendali. Kerugiannya adalah sebagian besar energi diberikan kepada neutron di mana dalam hal ini tidak terlalu mudah untuk diambil. Berbeda dengan fisi dimana hanya sebagian kecil saja energi diberikan kepada neutron, dan energi kinetik yang dimiliki fragmen fisi lebih mudah diambil.

Fusi dari 4 proton membentuk  ${}^4\text{He}$  (dalam beberapa langkah) adalah sumber energi untuk matahari dan bintang-bintang yang sama dengan matahari. Langkah berikutnya setelah bahan bakar hidrogen telah habis, adalah fusi helium. Reaksi yang paling sederhana  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ , tidak teramati sebab  ${}^8\text{Be}$  pecah menjadi dua  ${}^4\text{He}$  lagi hampir secepat pembentukan  ${}^8\text{Be}$  ( $10^{-10}$  s). Sebaliknya yang terjadi adalah reaksi yang lebih kompleks



## 12.2 Karakteristik Fusi

Perhitungan energi yang dibebaskan dalam fusi lebih bersifat langsung jika dibandingkan dengan fisi. Adalah perlu secara sederhana untuk menghitung nilai  $Q$  pada reaksi fusi. Untuk aplikasi sebagian besar fusi, mulai dari reaktor fusi yang terkendali sampai proses fusi di matahari, partikel yang bereaksi memiliki energi dalam range 1 – 10 keV. Energi kinetik awal partikel adalah sedemikian kecil dibandingkan dengan nilai  $Q$  yang beberapa MeV. Energi yang dibebaskan, dan energi total akhir dari partikel yang dihasilkan, kemudian sama dengan nilai  $Q$

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 = Q \quad (12.1)$$

Untuk partikel hasil  $b$  dan  $Y$ . Lagi dengan mengabaikan gerak awal, momentum akhir sama dan berlawanan

$$m_b v_b = m_Y v_Y \quad (12.2)$$

Dengan demikian

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 = \frac{Q}{1 + m_b / m_Y} \quad (12.3)$$

$$\frac{1}{2} m_Y v_Y^2 = \frac{Q}{1 + m_Y / m_b} \quad (12.4)$$

Dari mana kita dapat menghitung distribusi energi pada reaksi fusi dasar.

Konsekwensi dari distribusi tersebut adalah bahwa partikel hasil fusi yang lebih ringan akan membawa energi yang lebih besar. Rasio energi kinetik dari kedua partikel adalah

$$\frac{\frac{1}{2} m_b v_b^2}{\frac{1}{2} m_Y v_Y^2} = \frac{m_Y}{m_b} \quad (12.5)$$

Dalam kasus reaksi D-T neutron hasil memiliki 80% energi. Pada reaksi D-D proton atau neutron hasil memiliki 75% dari energi yang tersedia.

Jika  $R_a$  dan  $R_X$  adalah jari-jari dari partikel yang bereaksi, potensial penghalang Coulombnya adalah

$$V_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X} \quad (12.6)$$

Bila kedua partikel bersentuhan. Pengaruh potensial penghalang Coulomb pada fusi sama dengan pengaruh potensial penghalang Coulomb pada peluruhan. Hasil  $Z_a Z_X$  pada akhirnya akan terlihat pada probabilitas penetrasi eksponensial potensial penghalang, sedemikian sehingga penampang reaksi fusi sangat sensitif terhadap potensial penghalang Coulomb. Dengan demikian probabilitas fusi menurun sangat tajam terhadap  $Z_a Z_X$ , dan potensial penghalang paling rendah pada isotop hidrogen. Untuk reaksi D-T,  $V_C = 0,4$  MeV, tapi meskipun potensial penghalang paling rendah, tapi potensial tersebut masih jauh di atas energi partikel datang khusus dari 1- 10 keV. Tentu saja tidak perlu untuk partikel di atas potensial penghalang, seperti dalam peluruhan alfa, itu adalah probabilitas penetrasi penghalang yang menentukan hasilnya.

### 12.3 Fusi di Matahari

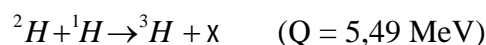
Sebelum membahas bagaimana memperoleh fusi termonuklir di Bumi marilah kita bahas reaksi fusi yang terjadi di matahari sebagai bahan untuk pembahasan bagaimana memperoleh prototype reaktor nuklir yang dapat berlangsung terus menerus. Seperti dapat diketahui dari rekaman fosil di Bumi bahwa energi yang dihasilkan matahari hampir tetap selama lebih dari  $10^9$  tahun.

Proses dasar fusi di matahari dan sebagian besar bintang adalah fusi hidrogen menjadi helium. Hidrogen sejauh ini merupakan bahan yang paling melimpah di jagat raya, lebih dari 90% atom di jagat raya adalah hidrogen dan kurang dari 1% sisanya adalah helium. Helium dibentuk pada masa awal yang merupakan evolusi jagat raya dan bukan sebagai hasil dari proses bintang kemudian. Semua reaksi dari siklus fusi haruslah reaksi dua benda (dua partikel pada keadaan awal) sebab tumbukan simultan dari tiga partikel adalah tidak mungkin. Langkah pertama dari proses fusi haruslah kombinasi dari dua proton membentuk hanya sistem dua inti yang stabil :



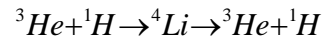
Neutrino  $\nu$  pada langkah akhir menunjukkan suatu proses interaksi lemah yang harus terjadi untuk mengubah sebuah proton menjadi neutron (tidak cukup energi untuk membuat sebuah  $\pi$  meson dengan reaksi  $p \rightarrow n + \pi^+$ ). Penampang untuk proses interaksi lemah amat kecil, untuk membuat sebuah deuterium, penampang fusi dihitung menghasilkan orde  $10^{-33}$  b pada energi keV dan orde  $10^{-23}$  b pada energi MeV. Temperatur pusat matahari sekitar  $15 \times 10^6$  K bersesuaian dengan rata-rata energi proton sekitar 1 keV, tetapi untuk menghitung kecepatan reaksi diperlukan nilai rata-rata  $\langle \sigma v \rangle$  untuk seluruh energi, dan penetrasi yang mudah terhadap potensial penghalang terhadap partikel yang berenergi MeV di ekor energi tinggi distribusi Maxwell-Boltzmann mengkompensasi untuk intensitas rendah di bagian ekor. Laju reaksi adalah tetap sangat kecil, dan bahkan pada kepadatan tinggi di inti matahari (sekitar  $125 \text{ g/cm}^3$  atau  $7,5 \times 10^{25}$  proton /  $\text{cm}^3$ ) laju reaksi hanya sekitar  $5 \times 10^{-18}$  / s per proton. Apa yang membuat matahari memancar adalah sejumlah besar bereaksi proton dalam orde  $10^{56}$ , sehingga laju reaksi total dalam orde  $10^{38}$  /s. Langkah ini di siklus fusi matahari sering disebut "kemacetan" karena itu adalah langkah yang paling lambat dan paling mungkin.

Setelah pembentukan deuterium menjadi sangat mungkin untuk reaksi berikut akan terjadi

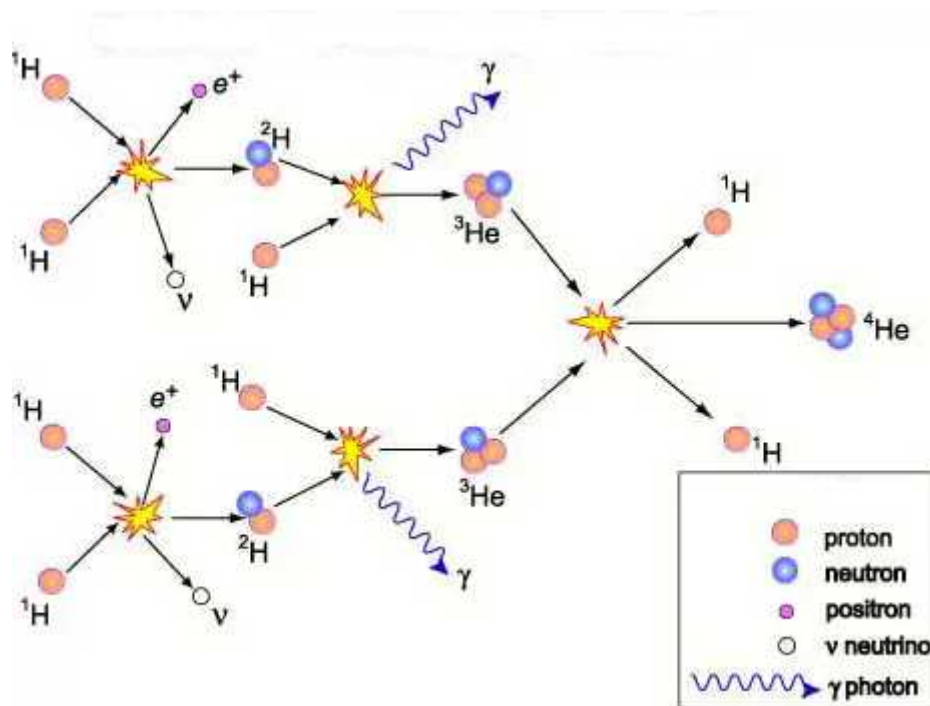
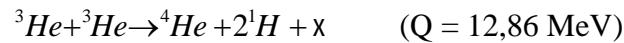


Hal ini sangat tidak mungkin pada saat ini untuk mengamati reaksi D-D karena jumlah kecil deuterium hadir hanya satu deuterium dibentuk untuk setiap  $10^{18}$  proton, dan dengan demikian itu adalah sekitar  $10^{18}$  kali lebih mungkin bahwa deuterium akan bereaksi dengan proton

daripada dengan deuteron lain. Deuteron dengan demikian segera diubah menjadi  ${}^3\text{He}$  hampir secepat mereka terbentuk. Reaksi dari  ${}^3\text{He}$  dengan proton tidak mungkin

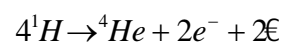


Isotop  ${}^4\text{Li}$  tidak ada sebagai sistem yang terikat, dan pecah segera setelah terbentuk. Hal ini juga tidak mungkin untuk  ${}^3\text{He}$  untuk bereaksi dengan  ${}^2\text{H}$  karena kepadatan  ${}^2\text{H}$  sangat rendah dan karena  ${}^2\text{H}$  dikonversikan ke  ${}^3\text{He}$  sangat cepat. Nasib  ${}^3\text{He}$  demikian mengembara sampai menemukan  ${}^3\text{He}$  lain dan menghasilkan reaksi



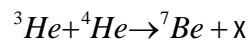
Gambar 12.1 Siklus proton-proton (Sumber :Tri L. Astraatmadja <http://langitselatan.com/2010/10/19>)

Proses lengkap ditunjukkan secara skematik pada Gambar 12.1, dan dikenal sebagai siklus proton-proton. Reaksi bersihnya adalah konversi dari empat proton menjadi helium

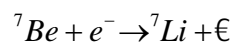


Untuk menemukan total nilai Q, kita harus ingat bahwa kita telah membahas reaksi dengan partikel nuklir. Mari menambahkan empat elektron untuk setiap sisi dari proses ini, memberikan empat atom H netral di sebelah kiri, dan atom He netral di sebelah kanan dengan dua elektron tambahan untuk memusnahkan positron. Proses net demikian  $4{}^1\text{H}$

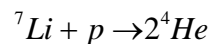
→<sup>4</sup>He, dengan nilai Q adalah 26,7 MeV. Energi dikonversi ke radiasi matahari per siklus sedikit kurang, untuk neutrino muncul langsung dari inti tanpa memberikan kontribusi bagi pemanasan fotosfer, wilayah luar matahari di mana energi yang dilepaskan dalam reaksi nuklir diubah menjadi cahaya. Sebuah alternatif untuk <sup>3</sup>He adalah menemukan sebuah partikel α:



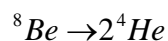
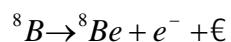
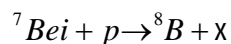
diikuti oleh



dan



atau mungkin dengan urutan

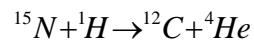
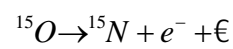
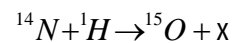
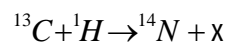
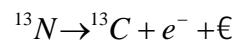
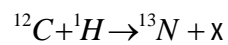


Reaksi bersih dengan nilai bersih Q adalah sama untuk tiga jalur yang mungkin ini. Mana yang benar-benar dipilih tergantung pada komposisi bintang dan pada suhu. Dalam kasus matahari, kita dapat menguji alternatif ini dengan mengamati neutrino. Dalam kasus pertama, kita mendapatkan distribusi kontinu neutrino dengan energi maksimum 0,42 MeV. Dalam kasus kedua, penangkapan elektron <sup>7</sup>Be memberikan neutrino monoenergetic 0.862 MeV, sedangkan peluruhan <sup>8</sup>B memberikan distribusi neutrino kontinu dengan titik akhir dari 14 MeV. Untuk mengamati neutrino ini, Davis bersama pembantunya telah menemukan percobaan yang sangat sensitif. Untuk menunjukkan bahwa penangkapan  $\bar{\nu}$  oleh neutron tidak mungkin terjadi, percobaan terkait dilakukan oleh Davis dan rekan kerjanya. Mereka menggunakan tangki besar CCl<sub>4</sub> dalam upaya untuk mengamati reaksi  $\bar{\nu} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$  dengan menggunakan reaktor antineutron. Dengan membersihkan tangki secara berkala dan mencari keberadaan radioaktif <sup>37</sup>Ar yang telah di hapus. Davis mampu menyimpulkan bahwa reaksi tidak diamati, menunjukkan bahwa  $\nu$  dan  $\bar{\nu}$  sebenarnya partikel yang berbeda.

Setelah bertahun-tahun percobaan, Davis telah mengamati hanya kecil (sepertiga atau kurang) dari jumlah yang diharapkan dari neutrino dari matahari. Pengamatan neutrino memberi kita jendela untuk mengetahui bagian dalam matahari secara mendalam, sedangkan cahaya tampak yang mencapai kita dari matahari adalah karakteristik permukaannya dan

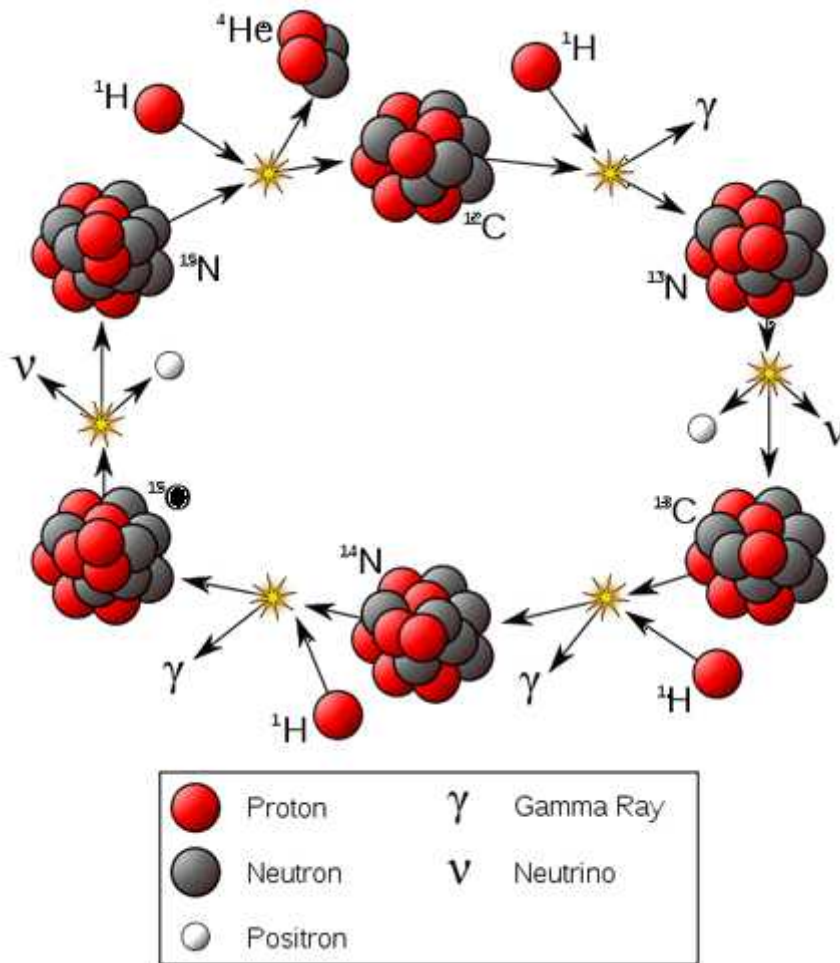
sinar  $\gamma$  hasil dari reaksi di inti yang dipancarkan banyak ribuan kali dalam perjalanan mereka ke permukaan. Ini juga membutuhkan mungkin jutaan tahun untuk radiasi untuk mencapai permukaan, sehingga cahaya yang kita lihat hasil hari ini dari proses yang terjadi di matahari yang terjadi jutaan tahun yang lalu. Neutrino, di sisi lain, datang kepada kita langsung dari inti dengan kecepatan cahaya. Oleh karena itu sangat penting untuk mencoba memahami mengapa hasil eksperimen Davis tidak sesuai dengan teori dan merancang percobaan lain yang sensitif terhadap komponen lain dari spektrum neutrino.

Jika selain hidrogen dan helium ada unsur yang lebih berat hadir dalam interior bintang, sebuah seri yang berbeda dari reaksi fusi dapat terjadi. Salah satu seri tersebut adalah siklus karbon atau siklus CNO



Siklus ini dapat dilihat seperti Gambar 12.2.





Gambar 12.2 Daur karbon (Sumber :Tri L. Astraatmadja <http://langitselatan.com/2010/10/19>)

Dalam hal ini  $^{12}\text{C}$  yang tidak diciptakan atau dihancurkan, tetapi bertindak sebagai katalis untuk membantu dalam proses fusi. Proses bersih adalah  $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^- + 2\nu$ , persis seperti dalam siklus proton-proton, dan nilai  $Q$  adalah sama. Siklus karbon dapat terjadi lebih cepat dari siklus proton-proton karena tidak memiliki proses analog dengan hambatan deuterium. Namun, hambatan Coulomb adalah 6 atau 7 kali lebih tinggi untuk reaksi proton dengan karbon dan nitrogen daripada reaksi proton-proton. Dengan demikian siklus karbon akan dominan pada suhu yang lebih tinggi, di mana energi panas tambahan diperlukan untuk meningkatkan probabilitas untuk menembus penghalang Coulomb.

Radiasi matahari rata-rata mencapai bumi adalah sekitar  $1,4 \times 10^3 \text{ W / m}^2$ , yang (jika terdistribusi secara merata dalam ruang) berarti total output matahari adalah sekitar  $4 \times 10^{26} \text{ W}$ . Setiap reaksi fusi menghasilkan sekitar  $25 \text{ MeV}$ , dan dengan demikian harus terjadi sekitar  $10^{38}$  fusi reaksi per detik, mengkonsumsi  $4 \times 10^{38}$  proton per detik. Pada tingkat ini, matahari dapat diharapkan untuk terus membakar bahan bakar hidrogen selama  $10^{10}$  tahun.

Setelah sebuah bintang telah habis bahan bakar hidrogen, reaksi fusi helium dapat berlangsung, dengan  $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$  pada suhu yang lebih tinggi diperlukan untuk menembus penghalang Coulomb. Reaksi lain yang melibatkan fusi inti ringan dan penangkapan partikel  $\alpha$  dapat terus melepaskan energi, sampai proses berakhir pada  $^{56}\text{Fe}$ , di mana tidak ada lagi kemampuan energi dalam menggabungkan inti. Cara relatif sederhana ini tidak hanya membantu untuk menjelaskan beberapa dari banyak kategori bintang yang kita amati, tetapi juga memberi kita sarana untuk memahami kelimpahan relatif dari berbagai jenis atom (atom Z-genap ringan tercipta melalui tangkapan  $\alpha$  berturut-turut oleh  $^{13}\text{C}$  jauh lebih berlimpah disamping atom tetangga Z-ganjil, hampir segala sesuatu di atas Fe kurang banyak daripada di bawah Fe).

#### 12.4 Reaktor Fusi Terkendali

Inti dari mengendalikan reaksi fusi dan pengambilan energi yang dapat digunakan adalah dengan memanaskan bahan bakar termonuklir pada suhu orde  $10^8$  K (rata-rata energi kinetik partikel 10 keV) sekaligus mempertahankan kepadatan cukup tinggi untuk waktu yang cukup lama bahwa tingkat reaksi fusi akan cukup besar untuk menghasilkan daya yang diinginkan. Pada suhu ini, atom akan terionisasi (untuk hidrogen hanya 13,6 eV diperlukan untuk melepaskan elektron), dan bahan bakar adalah campuran panas awan ion positif dan elektron negatif tetapi secara keseluruhan elektrik netral. Keadaan seperti ini disebut plasma, dan persamaan dinamis yang mengatur perilaku plasma berada di luar lingkup teks ini. Sifat elektrostatik plasma menentukan skala panjang disebut panjang Debye

$$L_D = \left( \frac{4fV_0}{e^2} \frac{kT}{4fn} \right)^{1/2} \quad (12.7)$$

di mana  $n$  adalah rata-rata kerapatan ion atau elektron (yang tentu saja akan tergantung pada fluktuasi lokal yang cukup pada skala mikroskopis). Menggunakan kepadatan zat padat ( $10^{28} \text{ m}^{-3}$ ) sebagai faktor skala kasar, panjang Debye untuk plasma 10-keV adalah dalam orde  $10^{-8}$  m dan jumlah partikel dalam volume plasma dimensi satu panjang Debye adalah sekitar  $10^4$ . Untuk plasma yang lebih jarang dengan kepadatan hanya  $10^{22} / \text{m}^3$ , panjang Debye adalah  $10^{-5}$  m dan jumlah partikel dalam volume dimensi satu panjang Debye adalah  $10^7$ .

Dalam salah satu dari dua ekstrem kasus, ada dua sifat dasar, ukuran fisik dari plasma yang bereaksi jauh lebih besar dari panjang Debye dalam dimensi, dan ada banyak partikel dalam volume yang khas. Ini adalah dua sifat yang memungkinkan penggunaan persamaan plasma untuk menggambarkan bahan bakar termonuklir panas. Masalah utama adalah jelas

untuk membatasi plasma untuk bahan bakar panas untuk bertukar energi dengan dinding wadah secara bersamaan mendinginkan bahan bakar dan mencairkan wadah. Saat ini ada dua skema dalam penyelidikan untuk membatasi bahan bakar termonuklir: kurungan magnetik dan kurungan inersia. Dalam kurungan magnetik, plasma dibatasi oleh medan magnet yang dirancang dengan hati-hati. Dalam kurungan inersia, pelet padat tiba-tiba dipanaskan dan dikompresi oleh diserang secara bersamaan dari berbagai arah dengan berkas foton atau partikel yang padat.

Membatasi plasma adalah tentu saja tidak mutlak, akan banyak cara untuk plasma untuk kehilangan energi. Mekanisme primer Bremsstrahlung, di mana hamburan Coulomb dari dua partikel menghasilkan percepatan yang pada gilirannya menimbulkan emisi radiasi. Percepatan terbesar yang dialami oleh partikel ringan (elektron), tetapi karena elektron dan ion berada dalam kesetimbangan termal, kehilangan oleh elektron dirasakan juga oleh ion, yang kemudian kurang energik dan kurang berhasil dalam menembus penghalang Coulomb. Daya yang dipancarkan oleh elektron yang mengalami percepatan  $a$  adalah

$$P = \frac{e^2 a^2}{6f v_0 c^3} \quad (12.8)$$

Jika elektron berada pada jarak  $r$  dari ion muatan  $Z$ , percepatannya adalah

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{Z e^2}{4f v_0 m_e r^2} \quad (12.9)$$

Jika  $\tau$  adalah waktu karakteristik selama ion dan elektron berinteraksi, maka jumlah ion ditemui pada jarak  $r$  adalah  $(n)(v_e \tau)(2\pi r dr)$ , dimana  $n$  adalah kepadatan ion positif. Dengan demikian

$$dP = \frac{e^2 n}{6f v_0 c^3} \frac{Z^2 e^4 v_e \tau (2\pi r dr)}{(4f v_0)^2 m_e^2 r^4} \quad (12.10)$$

di mana kita mengambil  $dP$  menjadi kontribusi terhadap daya total dari elektron yang tersebar di parameter dampak antara  $r$  dan  $r + dr$ . Karakteristik waktu interaksi  $\tau$  dapat diperkirakan sebagai  $r / v_e$  dan dengan demikian

$$dP = \frac{4f e^6 Z^2 n}{3(4f v_0)^3 m_e^2 c^3} \frac{dr}{r^2} \quad (12.11)$$

Mengintegrasikan dari  $r_{\min}$  ke  $r_{\max}$  memberikan daya total yang dipancarkan oleh elektron tunggal, dan mengalikan hasilnya dengan kepadatan  $n$  elektron memberikan daya per satuan

volume dipancarkan oleh plasma. Kita dapat mengambil  $r \sim \infty$  dan  $r_{\min}$  itu tergođa untuk mencoba jarak pendekatan terdekat, yang untuk 10 keV elektron ternyata menjadi 144 Z fm. Jika kita menghitung ketidakpastian mekanika kuantum dalam posisi elektron, mengambil  $\Delta p \sim p = 100 \text{ keV}/c$ , maka  $\Delta x$  adalah dalam orde 2000 fm. Sehingga kita tidak dapat menentukan  $r_{\min}$  setepat 144Z fm, dan kita harus mengambil sebagai estimasi lebih baik  $r_{\min} = h/m_e v_e$ . Ambil integrasi, daya per satuan volume yang terpancar dalam bremsstrahlung menjadi

$$P_{br} = \frac{4f n n_e e^6 Z^2 v_e}{3(4f v_0)^3 m_e^2 c^3} \quad (12.12)$$

Melanjutkan perkiraan, kita ambil  $v_e$  kecepatan sesuai dengan energi kinetik rata-rata dari Maxwell-Boltzmann  $v_e = \sqrt{3kT/m_e}$ . Mengevaluasi semua koefisien numerik, estimasi akhir adalah

$$P_{br} = 0,5 \times 10^{-36} Z^2 n n_e (kT)^{1/2} \text{ W/m}^3 \quad (12.13)$$

di mana kT adalah dalam keV. Laju reaksi untuk reaksi fusi adalah  $n_1 n_2 \langle \dagger v \rangle$ , di mana  $n_1$  dan  $n_2$  adalah densitas dari dua jenis ion fusi, jika hanya ada satu jenis ion, seperti pada fusi D-D,  $n_1 n_2$  produk harus diganti dengan  $\frac{1}{2} n^2$ , dimana faktor  $\frac{1}{2}$  adalah koreksi terhadap penghitungan ganda terhadap reaksi.

Kita melihat bahwa ada suhu dimana output fusi akan melebihi kerugian bremsstrahlung, yang dalam orde 4 keV untuk reaksi D-T dan 40 keV untuk reaksi D-D. Hal ini menunjukkan keunggulan dari reaksi D-T untuk bahan bakar. Perhatikan juga bahwa kerugian bremsstrahlung meningkat dengan  $Z^2$ , oleh karena itu reaksi fusi menggunakan inti selain hidrogen memiliki kerugian substansial bremsstrahlung yang lebih besar serta laju reaksi umumnya lebih kecil di wilayah keV, karena hambatan potensial Coulomb.

Oleh karena itu kita memilih untuk mengoperasikan reaktor fusi pada suhu di mana keuntungan daya dari fusi melebihi kerugian bremsstrahlung. Kerugian radiasi lainnya, termasuk radiasi sinkrotron dari partikel bermuatan yang mengorbit sekitar garis-garis medan magnet, juga dapat diabaikan. Reaktor fusi akan memiliki keuntungan energi bersih jika energi yang dilepaskan dalam reaksi fusi melebihi kerugian radiasi dan investasi energi awal dalam pemanasan plasma untuk suhu operasi. Jika kita beroperasi pada suhu di atas 4 keV, bahkan pada 10 keV, keuntungan fusi D-T lebih besar dari kerugian radiasi, dan kita dapat

mengabaikan kerugian energi radiasi. Energi yang dilepaskan per satuan volume dari reaksi fusi dalam plasma adalah

$$E_f = \frac{1}{4}n^2\langle\tau v\rangle Q\ddagger \quad (12.14)$$

di mana kita mengasumsikan bahwa kepadatan D dan T masing-masing sama dengan  $n$  (sehingga total  $n$  sama dengan  $n_e$ ),  $Q$  adalah energi yang dilepaskan per reaksi (17,6 MeV untuk DT), dan  $\tau$  adalah lamanya waktu plasma dibatasi sehingga reaksi dapat terjadi. Perhatikan bahwa Persamaan (12.35) adalah bentuk: reaksi per satuan waktu (laju reaksi) per satuan volume kali energi yang dibebaskan per waktu reaksi selama reaksi berlangsung.

Energi panas per satuan volume yang dibutuhkan untuk menaikkan ion dan elektron suhu  $T$  adalah  $\frac{3}{2}nkT$  (untuk ion) dan  $\frac{3}{2}n_e kT$  (untuk elektron). Dengan  $n = n_e$ , energi termal adalah

$$E_{th} = 3nkT \quad (12.15)$$

Mari kita meninjau urutan fusi. Kita menyediakan energi sebesar  $E_{th}$  untuk memanaskan plasma, maka jika kita mampu membatasi untuk waktu  $\tau$  kita dapat mengekstrak energi fusi  $E_f$ .

Reaktor akan memperlihatkan keuntungan jika  $E_f > E_{th}$

$$\frac{1}{4}n^2\langle\tau v\rangle Q\ddagger > 3nkT \quad (12.16)$$

atau

$$n\ddagger > \frac{12kT}{\langle\tau v\rangle Q} \quad (12.17)$$

Untuk suhu operasi 10 keV untuk reaksi D-T,  $\langle\tau v\rangle \sim 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$  dan dengan demikian  $n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$ . Ini perkiraan produk minimum yang diperlukan kepadatan ion dan kurungan waktu yang disebut kriteria Lawson dan merupakan tujuan desainer reaktor. Ini akan, tentu saja, berbeda untuk suhu operasi yang berbeda dan untuk bahan bakar yang berbeda. Untuk reaksi D-D, bahwa 10 keV terlalu rendah suhu operasi (kerugian bremsstrahlung terlalu besar). Beroperasi pada  $kT = 100 \text{ keV}$  memberikan  $\langle\tau v\rangle \approx 0,5 \times 10^{-22}$  dan dengan demikian  $n\tau > 10^{22} \text{ s/m}^3$ .

Oleh karena itu kita perlu peningkatan seratus kali lipat dalam kepadatan ion atau waktu kurungan atau beberapa kombinasi dari kedua energi gain dalam reaktor D-D.

Mari kita beralih sekarang ke pemeriksaan jenis reaktor dasar dan melihat seberapa dekat mereka dapat memenuhi kriteria Lawson. Kurungan magnetik yang paling sederhana adalah medan magnet serbasama–spiral partikel bermuatan dalam arah medan magnet, seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 14.8. Hal ini cukup untuk membatasi partikel hanya dalam dua arah. Untuk mencegah hilangnya partikel sepanjang sumbu, ada dua solusi yang ditampilkan: kita dapat membentuk torus, sehingga menjaga spiral dalam sebuah cincin, atau kita dapat membentuk kepadatan tinggi garis medan magnet yang memantulkan partikel kembali ke daerah medan rendah dan karenanya dikenal sebagai cermin magnetik. Dalam setiap penampang toroidal nyata, medan lemah di jari-jari yang lebih besar, dan dengan demikian sebagai sebuah partikel spiral, pada medan yang lebih rendah memungkinkan spiral menjadi lebih besar dan memungkinkan partikel berada di dinding luar. Untuk mengurangi efek ini, diberikan komponen medan magnet sepanjang permukaan toroid, ini disebut bidang poloidal. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan satu set kumparan eksternal, atau dengan melewatkan arus sepanjang sumbu toroida melalui plasma itu sendiri. Arus ini melayani tujuan ganda, yaitu pemanasan plasma dan mengurung partikel. Desain dasar disebut tokamak sebuah akronim Rusia untuk perangkat.

Tokamak pada saat ini merupakan salah satu dari dua calon yang paling menjanjikan untuk desain dasar reaktor tenaga fusi. Dalam aktual fasilitas perkembangan tokamak, medan poloidal disediakan tidak oleh satu set kumparan eksternal (yang digunakan dalam perangkat yang berbeda, yang dikenal sebagai stellerator), tetapi oleh arus induksi dalam plasma sendiri oleh satu set gulungan eksternal yang berfungsi pada dasarnya sebagai transformer primer. Pemanasan ohmic akibat arus (yang berorde beberapa MA) juga membantu untuk memanaskan plasma. Penggunaan transformer membutuhkan tokamak untuk beroperasi dalam mode pulsa, yang merupakan keterbatasan mendasar pada operasi perangkat; pulsa arus di generasi tokamak sekarang memiliki durasi dalam orde 1 s.

Pemanasan tambahan harus disediakan untuk menaikkan suhu plasma dalam orde 10-100 keV. Dua metode yang sedang diselidiki adalah pemanasan frekuensi radio (rf) dan injeksi berkas netral (NBI). Gelombang rf diradiasikan ke dalam plasma mendorong elektron dan menyebabkan arus toroidal yang memanaskan plasma. Dalam teknik NBI, sinar ion H atau D dipercepat untuk energi 10-100 keV dan kemudian dinetralisir (misalnya, dengan reaksi pertukaran-muatan melewati sel H netral atau atom D). Atom netral dapat lulus tanpa menyimpang melalui medan magnet dari tokamak dan masuk ke plasma, di mana mereka dengan cepat kehilangan energi untuk plasma melalui hamburan Coulomb dari ion dan elektron.

Sistem pemanas tambahan puluhan MW akan diperlukan untuk mencapai panas yang diperlukan untuk mempertahankan reaksi. Partikel  $\alpha$  yang bermuatan dikurung pada plasma dengan medan magnet dan akhirnya kehilangan energi untuk plasma melalui tabrakan.

## **PERTANYAAN DAN SOAL-SOAL**

1. Jelaskan sumber energi untuk matahari dan bintang-bintang yang sama dengan matahari.
2. Jelaskan proses dasar fusi di matahari dan sebagian besar bintang
3. Jelaskan proses lengkap siklus proton-proton
4. Jelaskan tentang siklus karbon atau siklus CNO
5. Apa syaratnya agar reaktor fusi memiliki keuntungan energi bersih