

Mengenal Fisika Nuklir


Imam Fachruddin

(Departemen Fisika, Universitas Indonesia)

Daftar Pustaka:

- P. E. Hodgson, E. Gadioli, E. Gadioli Erba, **Introductory Nuclear Physics** (Oxford U. P., New York, 2000)
- J. M. Blatt & V. F. Weisskopf, **Theoretical Nuclear Physics** (Dover Publications, Inc., New York, 1991)
- W. E. Meyerhof, **Elements of Nuclear Physics** (McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989)

Isi

-
- pendahuluan
 - sifat-sifat inti
 - ketidakstabilan inti
 - radioaktivitas
 - model inti
 - gaya nuklir / interaksi kuat
 - fisika partikel
 - astrofisika nuklir 
 - akselerator dan detektor
 - reaktor nuklir
-

Astrofisika Nuklir

Obyek dalam astrofisika nuklir yaitu, produksi energi dan penciptaan unsur-unsur di alam (**nukleosintesis**) yang berlangsung di bintang.

Berdasarkan proses pembentukannya terdapat dua jenis bintang yaitu, **bintang generasi pertama** dan **bintang generasi kedua**.

Bintang Generasi Pertama

Bintang generasi pertama terbentuk akibat **keruntuhan gravitasi** (**gravitational collapse**) awan hidrogen dan helium-4. Akibat tarikan gravitasi maka ukuran atau radius awan tersebut mengecil. Mengecilnya ukuran awan itu mengakibatkan energi potensial gravitasi berkurang dan energi kinetik atom-atomnya meningkat, karena energi tetap. Kenaikan energi kinetik menyebabkan kenaikan temperatur awan itu. Suhu (energi kinetik) yang tinggi memungkinkan terjadinya reaksi fusi hidrogen menjadi helium-4, yang akhirnya menghasilkan energi. Reaksi itu menimbulkan tekanan yang melawan tarikan gravitasi. Jika massa awan itu melampaui suatu massa kritis, tekanan yang dihasilkan mampu mengimbangi tarikan gravitasi, maka jadilah awan itu sebuah bintang. Melalui reaksi yang menghasilkan energi itu tercipta juga unsur-unsur yang ditemui di alam, dengan $A \leq 60$.

Massa bintang menentukan temperatur T di dalamnya dan juga energi serta unsur yang diproduksinya.

suhu	contoh	produksi partikel
$10^7 \text{ K} \leq T \leq 5 \times 10^7 \text{ K}$	matahari	He^4
$10^8 \text{ K} \leq T \leq 2 \times 10^8 \text{ K}$	bintang raksasa merah	$\text{C}^{12}, \text{O}^{16}, \text{Ne}^{20}$
$T \leq 10^9 \text{ K}$		$\text{Mg}^{24}, \text{Si}^{28}, \text{S}^{32}, \text{Ar}^{36}, \text{Ca}^{40}$
$2 \times 10^9 \text{ K} \leq T \leq 5 \times 10^9 \text{ K}$		sampai Fe^{56}

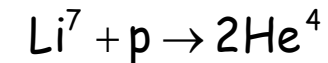
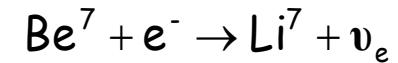
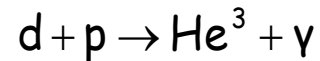
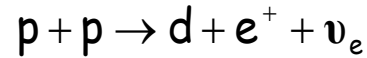
Untuk temperatur yang lebih tinggi tidak lagi terjadi nukleosintesis, karena setelah itu ($A \approx 60$) energi ikat rata-rata per nukleon (atau fraksi ikat) mengecil (ingat grafik fraksi ikat terhadap nomor massa).

Unsur-unsur yang tercipta di bintang itu disebar ke jagad raya melalui emisi yang lambat maupun emisi yang cepat akibat ledakan **supernova**.

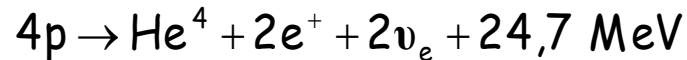
Produksi energi dan nukleosintesis:

Pada pembentukan bintang, ketika tercapai suhu kurang lebih 10^7 K mulai terjadi reaksi fusi atom hidrogen menjadi helium-4. Proses ini disebut **siklus proton**.

siklus proton:

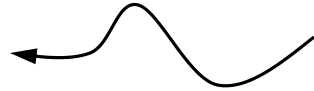
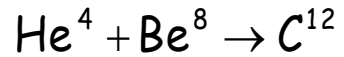
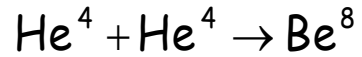


reaksi total:



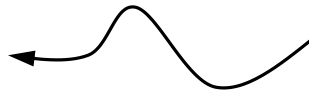
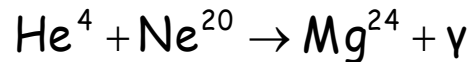
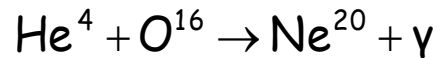
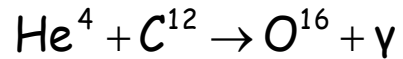
Setelah pada siklus proton itu atom H habis terbakar (terkonsumsi), maka tarikan gravitasi tidak lagi terimbangi, terjadi keruntuhan gravitasi, bintang mengecil, energi kinetik atom-atom meningkat, suhu meningkat sampai 10^8 K. Pada suhu ini mulai terjadi reaksi fusi atom helium-4. Reaksi ini meningkatkan tekanan sehingga ukuran bintang membesar. Bintang menjadi yang disebut si raksasa merah.

Proses pembakaran (konsumsi) helium-4:



Kedua reaksi harus seimbang, karena Be^8 juga meluruh menjadi He^4 . Reaksi yang pertama memerlukan energi (**endoterm**), namun yang kedua mengeluarkan energi (**eksoterm**).

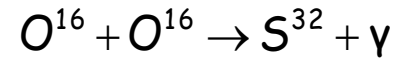
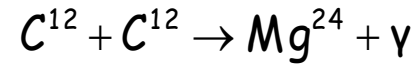
Reaksi berikutnya yang terjadi:



semuanya eksoterm

Setelah atom helium-4 habis terbakar, maka terjadi lagi keruntuhan gravitasi, suhu meningkat sampai 10^9 K. Pada suhu ini mulai terjadi reaksi fusi atom karbon-12 dan oksigen-16. Reaksi ini meningkatkan tekanan sehingga ukuran bintang membesar.

Contoh proses pembakaran karbon-12 dan oksigen-16:



Setelah karbon-12 dan oksigen-16 habis terbakar, maka terjadi lagi keruntuhan gravitasi, suhu meningkat sampai 5×10^9 K, reaksi fusi atom-atom yang lebih berat terjadi, sampai tercipta unsur dengan nomor massa kurang lebih 60.

Bergantung pada massa awalnya, tidak semua bintang menjalani semua siklus reaksi fusi di atas, dari mulai memproduksi helium-4 hasil reaksi fusi proton sampai memproduksi atom dengan $A \approx 60$. Bisa saja bintang itu kehabisan bahan bakar sebelum sampai pada siklus terakhir ($T \approx 5 \times 10^9$ K memproduksi unsur dengan $A \approx 60$).

Bintang yang lebih besar akan menjalani siklus reaksi fusi lebih cepat dari bintang yang lebih kecil, karena gravitasi yang lebih kuat dan temperatur yang lebih tinggi membuat proses pembakaran berlangsung lebih cepat.

Apa yang terjadi jika sebuah bintang kehabisan bahan bakar, baik sebelum maupun setelah mencapai siklus reaksi fusi terakhir?

Evolusi sebuah bintang:

Telah ditunjukkan tahap-tahap perjalanan bintang dari awal pembentukannya, kemudian menjalani siklus reaksi fusi dan sampai pada tahap produksi unsur dengan $A \approx 60$. Dalam perjalanan itu, bergantung pada sampai tahap mana bintang itu hidup, tercipta lapisan-lapisan pada bintang: lapisan terluar terdiri dari atom-atom hidrogen, berikutnya helium, oksigen, karbon, lalu silikon dan sulfur, terakhir di lapisan paling (inti) dalam besi. Kini disampaikan yang terjadi apabila sebuah bintang kehabisan bahan bakar.

bintang kecil:

Ketika reaksi fusi berhenti karena kehabisan bahan bakar, inti besi belum terbentuk dan bagian terluar bintang terlepas melalui ledakan. Akibat larangan Pauli, elektron-elektron yang ada di bintang yang tersisa memberikan tekanan keluar yang menahan tarikan gravitasi. Maka bergantung pada massanya, dapat terbentuk **bintang kerdil yang pucat (white dwarf)**. Ada suatu besaran yang disebut **massa Chandrasekhar**, yang nilainya bergantung pada rasio elektron-nukleon; jika massa white dwarf kurang dari atau sama dengan massa Chandrasekhar, maka white dwarf itu stabil.

bintang besar (massanya \geq massa matahari ($\approx 2 \times 10^{30}$ kg)):

Ketika reaksi fusi berhenti, inti besi tetap terus terbentuk melalui reaksi di lapisan luar (terdiri dari silikon). Akibatnya, massa inti menjadi terlalu besar dan tarikan gravitasi lebih kuat dari tolakan elektron. Maka, bintang runtuh, suhu menjadi naik dan unsur besi terurai menjadi nukleon-nukleon. Nukleon menyerap energi elektron, sementara jumlah elektron juga berkurang karena ditangkap oleh proton, menghasilkan netron. Akibatnya, tekanan keluar semakin turun, sehingga bintang terus runtuh dan kerapatan intinya tinggi. Akhirnya, inti bintang terdiri dari hanya netron, yang mampu menahan pengerutan bintang (ada resistansi).

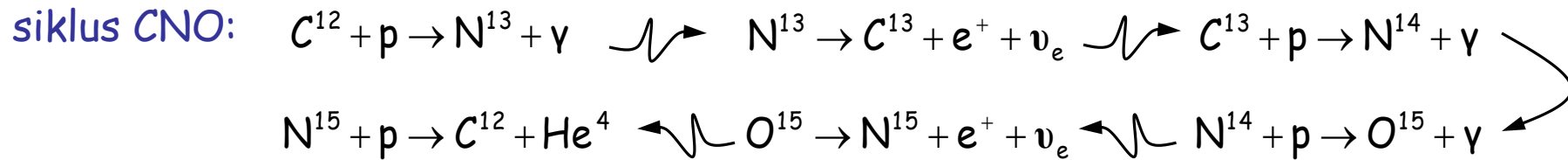
Resistansi terhadap pengerutan bintang ini menimbulkan gelombang kejut. Gelombang kejut merambat dari inti ke permukaan, memakan waktu beberapa hari, menimbulkan ledakan bagian luar bintang. Semua materi bintang, yang berada di luar radius tertentu (**bifurcation point**), terhambur lepas. Ledakan ini disebut supernova, yang menyebabkan kecerahan bintang itu melebihi kecerahan seluruh galaksi. Yang tersisa yaitu **bintang netron**.

Jika massa awal bintang 20 kali massa matahari, maka bintang netron terus runtuh dan menjadi **black hole**.

Bintang Generasi Kedua

Sisa-sisa bintang mati mengandung unsur-unsur berat. Dari sisa-sisa ini dapat terbentuk bintang baru, yang disebut bintang generasi kedua. Selain unsur-unsur berat, bintang generasi kedua juga terdiri dari atom-atom hidrogen dan helium-4.

Berbeda dari yang berlangsung di bintang generasi pertama, proses fusi empat proton menjadi helium-4 bukan melalui siklus proton, melainkan **siklus CNO**.



Perhatikan pada siklus CNO itu karbon-12 berperan sebagai katalisator, bahwa pada akhir reaksi karbon-12 didapatkan kembali.

Di bintang generasi kedua nukleosintesis melibatkan reaksi yang lebih kompleks. Proses yang dominan yaitu penangkapan neutron oleh inti-inti yang ada dan peluruhan beta. Di sini unsur-unsur yang lebih berat (sampai $A > 200$) dapat terbentuk.