

回転模型とは合わないが、強いトロイダル磁場があれば不安定となって一部が浮き上がって来る可能性はあるので、この点での斜回転模型との違いをあまり気にすることはないであろう。

ところが残念なことに星にほんのわずかでもポロイダルな磁場（例へば0.1 Gauss以下）があると、この電池機構はほとんど完全といってもよいくらい働かなくなることがメステル・ロックスパーク（1962年）によって示された。原因は次の二つの作用の結果である。ここで簡単にするために大循環流がない場合を考えてみよう。まず第一はポロイダル磁場があると電流はそれに平行に流れなければならないということである。なぜならばもしそうでないとローレンス力（電流×磁場）にトロイダルな成分が存在し、軸対称な星ではこれと釣り合うべき力がない（粘性力では小さすぎる）。従って星自身の自己調整の結果、最終的には電流がポロイダル磁場と平行になったところでおちつくであろう。このタイムスケールはアルペン波が星のまわりを伝播するのに要する程度であり数値的には  $10^8\sim 10^9$  年でかなり短いと考えてよい。第二にポロイダル磁場にそって回転の角速度は一定でなければならないということである。これは磁場が物質に凍りついていることの結果でフェラー（1932年）の法則として知られている。以上二つのことが原因となって電流は流れないことが示せるのである。この結論は大循環流があっても変わらないことも示されている。

メステル・ロックスパークの結果によって、ピアマン流の電池機構は早期星の磁場の起源としては、始め考えられたほど有効なものではないことになったが、完全にだめだと結論するのはまだ早計であろう。なぜならばピアマンの考えた理想的な場合には、観測される磁場よりかなり強い磁場を作れるのであるから、メステル・ロックスパークが採用した条件や仮定が、多少でもゆるめ

られたり変えられたりすることがあれば、観測される程度の磁場は作れる可能性がまだ残っているからである。例えば加藤・中川（1969年）は輻射圧の影響を考慮した場合、パラメーターの値を都合よくとれば、早期型星に数千ガウスの磁場を作れることを示した。なぜ輻射圧が起電力としてきくかという点、例えば理想化して一荷の電荷をもったイオンと電子およびこれらの結合した原子からなっているガス体に光子が入射した場合を考えてみよう。光子がガス体に吸収される場合、もしその運動量がイオンと電子とに半々の割合で伝えられれば、輻射には起電力の働きはないことになるが、一般にはそうではない。例へばパウンドフリー・トランジションの場合には大体のところ電子は前方に飛び出し、のこったイオンは後方に押されることが知られている（ゾンマーフェルト 1944年など）。

以上はトロイダルな磁場を発生させるピアマンの電池機構の紹介であったが、この他に回転の働きでトロイダルな電流が流れポロイダルな磁場が出来るとする電池機構もいくつか知られている。しかし一般に作られる磁場は非常に弱いようである。最近のものとしては微分回転と粘性の働きで出来るトロイダル電流（ポロイダル磁場）を調べたものがあるが（ブラウン 1968年）、やはり非常に弱い磁場しか出来ない。またごく最近のものとして、動径方向に物質の流れがあるとかかなりのトロイダル電流が流れ早期型星の磁場の説明にも使えるという話（ドゥロヴィチュフスキー 1968年）もあるが、筆者はまだ論文をみてないのでこの話についてはわからない。

全体の結論として云えることは、早期型星の磁場の起源としては化石説で本質的に困難な点はなさそうである。しかし電池機構そのものは理論的にも興味のあるものであり、今後まだ発展する可能性があるかもしれない。

## A型特異星における元素の拡散

尾 崎 洋 二\*

### 1. はじめに

A型特異星およびA型金属線星（以下ではそれぞれAp型星、Am型星と略記する）の起源についての理論の最近の問題は、これらの星で観測される化学組成の異常をどのようにして説明するかということである。これまで

主に考えられてきた仮説は、強い磁場による星の表面での核反応説、あるいは連星系の物質交換で進化した星からすでに核反応を経た物質をかぶったとする説などであったが、最近これらとは全く異なった星の大気および外層で元素の物理的分離を考える説が提案され大変注目されている。これはミッショー（1970）によって最初に提案された星の大気中での元素の拡散仮説で、この理論ではA型特異星の元素の異常は輻射圧を考慮した場合の星の

\* 東京大学 理学部 天文学教室

Yoji Osaki: Diffusion of Elements in Ap and Am Stars

大気における元素の拡散として説明される。すなわち適当な吸収を持たないヘリウム、酸素、ネオンといった元素は輻射圧が効かず重力によって星の大気の底に沈澱して見えなくなり、一方電子配置の複雑な希土類のような重元素は逆に輻射圧が重力に打勝つため大気の上層に押し上げられて、化学組成の異常過多として観測されるというものである。この理論では Ap 型星での強い磁場の存在および Am 型星の遅い自転は、星の大気や外層で元素の拡散が起るために必要な安定性を持たせるのに役立っていると解釈される。筆者は東大大学院の小林氏とこれらの星での元素の拡散の問題を調べているので、我々の得た経験なども混えて、この理論を紹介したい。

## 2. 元素の拡散

よく知られているように重力場の中に混合気体を入れた容器をおき静かに保つと、重い気体分子は底に沈み軽い気体分子は表面に浮ぶ。これは重力分離と呼ばれ、原理的には同じ現象が星の内部でも起こり得る。すなわち星の内部で重力分離が起こったとすると、鉄のような重い元素は星の中心近くに沈み、星の表面近くは一番軽い元素である水素だけから構成されることになる。しかし現実にはこのような重力分離が起るためには、元素の拡散の時間が星の寿命よりも短いことが必要である。この時間 ( $\tau$ ) は、考える元素の原子量を  $A$ 、拡散定数を  $D$ 、拡散の起る領域の大きさを  $L$  とすると、 $\tau \sim L^2/(AD)$  で与えられる。 $L$  として太陽半径を採用して星全体での元素拡散の時間を計算すると、約  $10^{13}$  年という結果を得る。これは宇宙の年齢よりもずっと長く、実際上星全体での元素の重力分離の心配はいらないことになる。ところが拡散の時間を星の大気に限って評価してみると、主系列星の大気の厚さとして約 1000 km という値を採用した場合約  $10^4$  年となり、これは A 型主系列星の寿命にくらべて十分短い。従って星の大気が十分静かに保たれる場合には、星の大気中で元素の拡散は可能だということになる。しかし一般の星の場合、現実には重元素の組成に異常はなく、重力分離の起こったような観測的証拠はない。これは元素の拡散を妨げるような物質の混合が行なわれるため、F 型より晩期の主系列星では表面对流層が存在しそこでは物質がよく混合されており、一方 A 型より早期星の場合には深い表面对流層はないが、星の自転速度が大きく自転によって誘導された子午面循環や星の微分回転によって生ずるシアー乱流などによる物質混合があるため、元素の拡散は起らないと考えられる。ところが Ap 型星の場合には混合を妨げるような強い磁場が存在し、Am 型星の場合には星自身の自転が遅く自転によって生ずる物質混合の影響が小さいので、これら A 型特異星の場合にもっとも元素の拡散が起り易いと

言える。しかし星の大気での元素の拡散速度は  $10^{-8}$  cm/sec 程度であるから、実際にはほんのわずかの運動でも拡散を妨げてしまうであろう。理論的に A 型特異星の大気が元素の拡散を許すほど静かであると証明することは大変困難なことであるが、ここではそれを仮定してみる。そしてこの拡散モデルでどの程度まで観測される元素の組成異常が説明できるかということによって、この仮定の妥当性を調べるのが適当であろう。この立場に立つと、Ap 型星の成長曲線から決められる乱流速度はもちろん実際の乱流速度を表わしているのではなく、単なる分光学上の不一致の程度を表わすパラメーターということになる。

A 型特異星で元素の拡散が起るとした場合、重元素が大気の上層に押し上げられて組成の異常過多として観測されるためには、重力に打勝つだけの十分強い上向きの力が働くことが必要だ。現在まで知られている力の内で、この条件を満たすものとしては輻射圧のみで、たとえばバブコック (1963) の考えた磁場の不均一性による元素の移動は重力に比較して数桁小さい。従って着目する元素が拡散によって浮くか沈むかは、輻射圧による力が重力加速度  $g$  に打勝つかどうかによって決まる。言いかえると考える元素が適当な吸収を持つかどうかによるわけで、このモデルでは元素の電子配置が決定的役割を演じていることになる。

## 3. 輻射圧による力

光がエネルギーと運動量を持ち、物質に吸収されるとその物質に力をおよぼすことはよく知られている。恒星の大気や内部では輻射は大変重要な働きをしている。この点についてエディントン (1930) は彼の有名な内部構造の教科書の中で、輻射がもっとも重要な役割を演じている物体がまさに恒星であることを強調している。さて輻射による力が早期型主系列星の大気での程度であるか当たってみよう。ある元素に着目してその元素の吸収係数を  $\kappa_\nu$ 、輻射流量を  $\phi_\nu$  とすると、その元素 1 個あたりに働く力は

$$F_{\text{rad}} = \frac{1}{c} \int_0^\infty \kappa_\nu \phi_\nu d\nu$$

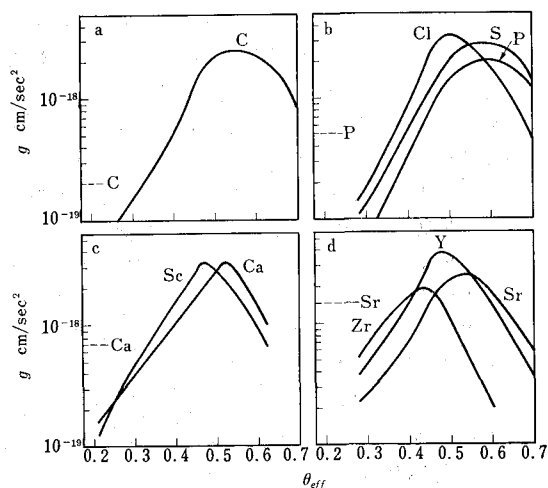
と表わされる。ここで  $c$  は光速である。原子量が 100 程度の元素を考え、A 型星の大気で 4000 Å 程度の波長のところの 1 本の吸収線の輻射圧を上式で評価すると、元素 1g あたりに働く上向きの力としては

$$g_{\text{rad}} \sim 5 \times 10^6 \left( \frac{N_n}{N_{\text{total}}} f_{nm} \right)$$

となる。ここで  $(N_n/N_{\text{total}})$  は元素が着目する吸収線を生ずるエネルギー準位にある比率で、 $f_{nm}$  は吸収線の振動子強度である。早期型主系列星の重力加速度  $g$  は (1

$\sim 2) \times 10^4$  程度であるから、輻射圧による力は重力に対してまだ約2桁程度の余裕を持っていると言える。実際、有効温度1万度の星の光球で電離したストロンチウムの2本の共鳴線 ( $\lambda 4078 \text{ \AA}$  および  $\lambda 4216 \text{ \AA}$ ) に働く輻射圧による上向きの力は  $2 \times 10^5$  程度で明らかに星の重力よりも大きい。このように書いてくると、どの元素でも輻射圧の方が重力よりも大きくて、星が輻射圧のためにばらばらになってしまうことを心配するかもしれないが、実際には星を構成する主成分である水素とヘリウムに働く輻射圧の力は非常に小さく、水素の場合重力の約百分の1程度にしか過ぎない。

これまでのところでは自己吸収の影響は考慮されていなかったが、元々たくさんある元素の場合、たとえ強い共鳴線があったとしても実際には自己吸収のために吸収線は上向きの加速度としては役に立たない。ある元素が早期型主系列星の大気で1本の強い吸収線によって支えられる限界は、その元素の重量で測った存在比が約  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  以下のものに限られる。この条件から元素を2つの群に分類すると、1本の強い吸収線だけでは支えられない元素 (A群) として He, C, N, O, Ne, Si, Ca, Mn, Fe といったものがあり、一方強い吸収線で支えられる可能性のある元素 (B群) として Li, Be, Sr, Y, Zr, Ba, 希土類がこの群に入る。もちろんA群の元素でも元々の存在比がそれほど大きくない元素については沢山の強い線が集まれば十分輻射圧で支えられる可能性があり、またB群の元素でも現実には適当な吸収線がなければ吸収線では支えられないことになる。実際、小林 (1971) の自己吸収も考慮に入れた計算によれば、マンガンの場合A型星の大気で53本の Mn II の吸収線に働く輻射圧は重力よりも大きくなることが示される。

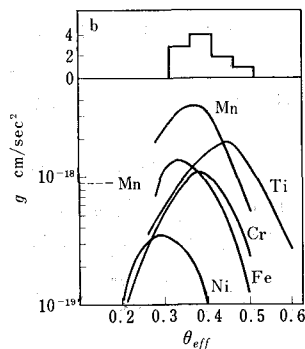


第1図 色々の元素に働く連続吸収による輻射力。  
横軸は有効温度:  $\theta_{\text{eff}} = 5040^\circ \text{K} / T_{\text{eff}}$

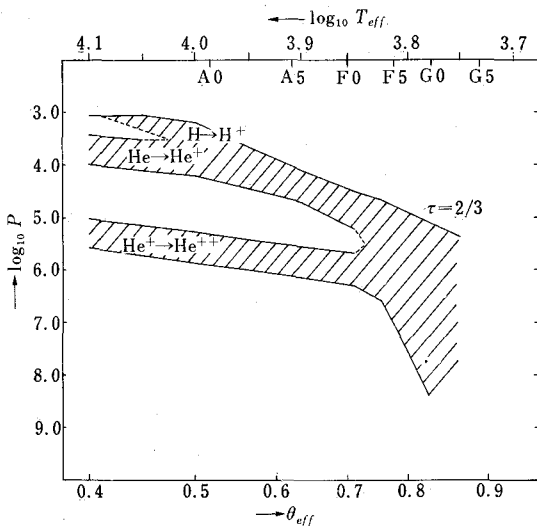
元々の存在比が大き過ぎて吸収線では支えられない元素については、連続吸収が問題になる。早期型星の大気での輻射流はライマン限界よりも短波長側では実際上0である。従って連続吸収で元素が支えられるためには、 $912 \text{ \AA}$  よりも長波長側に適当な吸収を持つことが必要になる。言いかえると元素の電離ポテンシャルが水素の電離ポテンシャル  $13.6 \text{ eV}$  よりも大きい小さいかによって、連続吸収による輻射圧の力が異なってくる。このことからミシヨール (1970) は元素を3つの群に分類した。第1群の元素は電離ポテンシャルが  $10.5 \text{ eV}$  から  $13.6 \text{ eV}$  の範囲に入るもので、これらの元素では低温の Ap 型星の大気で輻射圧による上向きの加速度が重力に打勝つため浮上がる。元素としては C, P, Cl, Ca, Sc, As, Br, Sr, Y, Zr, Xe および希土類などがある。第2群の元素は電離ポテンシャルが  $18 \text{ eV}$  よりも大きいかまたは  $10 \text{ eV}$  よりも小さい元素で、これらについては適当な吸収がないので連続吸収では支えられない。He, Li, B, Ne, Na, Al, K, Ni, Cu, Ga, Se 等といった元素がこの群に入る。第3群としては電離ポテンシャルが  $13.6 \text{ eV}$  から  $18 \text{ eV}$  の元素で、これらの元素では励起状態からの連続吸収が問題になり、個々の元素の電子配置によっては高温の Ap 型星において浮く場合がある。第1図は色々の元素について連続吸収による輻射圧を星の有効温度の函数として示したものである (ミシヨール)。この図の縦軸は元素1個あたりに働く輻射圧を示し、図の点線は対応する元素に働く重力を表す。この図は星の大気の浅い層における輻射圧を示したものであるが、もう少し深い層についての我々の計算では、連続吸収による輻射圧が重力に打勝つ場合は1つもなかった。従ってこの図はもつとも条件のよい場合の輻射圧で、実際のA型特異星の場合には、吸収線の毛布効果などで紫外域の輻射流量が低下して、連続吸収による輻射圧はこれよりも小さいものと考えられる。

#### 4. A型特異星への応用

これまで述べてきた輻射圧を考慮した元素の拡散モデ



第2図 色々の元素に働く連続吸収による輻射力。図の上方のヒストグラムは有効温度の函数としてのマンガンの数を示す。



第3図 主系列星の水素対流層。横軸は有効温度、縦軸は  $\log_{10} P$  (深さを表わす)。斜線の部分が対流不安定層、上限は光球 (光学的深さ =  $2/3$ )。

ルにより、実際のA型特異星の化学組成の異常がどのように説明されるか検討する。Ap型星とAm型星とでは元素の拡散の起る場所およびその情況に差があると考えられるので、ここでは別々に議論する。

#### (a) Ap型星

Ap型星は大別して主要グループとマンガン・グループの2つに分類される。主要グループの星の場合、一般に強い磁場があり大気中で物質混合を抑えるように働くので、元素の拡散は大気中で起こると考えられる。一方マンガン・グループの星の場合、磁場の存在がはっきりしないが、Am型星に較べれば表面温度が高く対流不安定層はたとえあったとしても非常に浅く弱い。ここではマンガン・グループの星についても一応大気中で元素の拡散が起こると仮定する。

Ap型星において異常に少なく観測されるHe, O, Neといった元素は、この拡散モデルではまさに適当な吸収を持たず大気の底に沈んでしまうことが期待される元素である。Ap型星で組成異常過多のもっとも顕著な希土類元素は、元々存在比も小さくそのうえ電子配置が複雑なため吸収線で十分上方に押し上げられるので、拡散モデルではもっとも異常過多になり易い元素と言えり。マンガンについては第2図に示すように観測でマンガン星が現われる有効温度の所で、輻射圧が重力に打ち勝ち浮上する。ミシヨールによればこの拡散モデルでもっとも困難な元素はケイ素(Si)で、ケイ素の組成異常過多はSi IIに十分幅広いオートアイオニゼーションの準位があるとした場合のみ説明がつくという。

#### (b) Am型星

Am型星の場合磁場の存在の強い証拠はなく、むしろ対流に対して不安定な層では現実に混合が起っていると考えた方がよい。従ってAm型星の大きな乱流速度という観測事実はこの星の大気が実際乱流状態になっていることを示し、元素の拡散は水素対流層の底で起っていると考えるのが適当であろう。第3図はA型星附近の有効温度を持つ主系列星の対流不安定層を示したものである。この図からわかるように丁度Am型星に対応する晩期A型から早期F型あたりで表面对流層が浅くなり、水素電離層とヘリウム電離層に分離し、その中間に対流安定な層が出来る。Am型星の化学組成の異常の特徴はカルシウム(Ca)、スカンジウム(Sc)が少ないこと、および鉄属とそれ以上の重元素が過多であることが挙げられる。水素対流層の底の代表的温度として  $T \sim 3$  万度、電子圧として  $P_e \sim 10^{1.8}$  という値を採用すると、カルシウム、スカンジウムの両元素は大部分それぞれCa III, Sc IVの電離状態にある。これは不活性ガスの電子配置(閉殻構造)であるため適当な吸収を持たず、元素の拡散モデルではもっとも沈みやすい元素であると言える。一方鉄属及び重元素は元々の存在比も小さく電子配置も複雑であるため、吸収線による輻射圧が大きく浮上する事が期待される。実際最近のワトソン(1970)の計算によれば水素対流層の底での元素の拡散で、観測から期待されるような元素の組成異常が起ることが示される。

#### 5. 定量化と今後の問題

これまで見てきたように、元素の拡散モデルはAp型星、Am型星で観測される元素の組成異常の主要な点を説明できることがわかった。しかし詳細な点に関しては、まだ説明されなければならない問題が沢山ある。まず最初に指摘しておきたいのは定量化の問題である。これまでの議論は元素の組成について異常過多か異常過少かのいずれかしき論じなかった。しかし色々の特異星の分光観測とその解析からは、個々の元素の正常な組成からのずれの程度まで定量的に決められている。ところが単純な元素の拡散モデルを採用して、元素の拡散による組成異常の程度を評価してみると、ほとんど想像を絶するほど極端な元素の組成異常が得られる。従って実際には元素の拡散に自動制御の効果が働いていること、および星自身が完全に静かであると仮定するのは誤りで、現実にはある程度の物質混合が必要であることが指摘できる。自動制御の効果として有効なのは吸収線の自己吸収で、これは元素の組成存在比を丁度輻射圧と重力が等しくなるようなところに落ち着かせるよう働く。またAm型星で観測される程度の組成異常を説明するためには、星の

中で元素の拡散と星の自転に伴う物質混合とが競合して、ほんのわずかだけ拡散の方が優っているような場合であることが必要である。別の言葉で言えば、Am 型星と正常なA型星との間に本質的に異なる点は何もなく、自転に伴う物質混合が優っているのが正常なA型星で、逆に元素の拡散がほんのわずか優っているのがAm 型星であると言える。コンチ (1970) はA型金属線星についてのレビューの中で、「“Am 型星” という特別の星が存在しているのではなく、“Am 現象” というものがあるのに過ぎず、普通いう所の Am 型星とは“Am 現象” を示す星に過ぎない。」という主張を強調している。上述の元素の拡散モデルによる Am 型星の説明は、コンチの主張に大変よく合致する。その他今後に残された問題としては、Ap 型星について主要グループとマンガン・グループの2つの群における元素の組成異常の差をどのようにして説明するか、あるいはまた Ap 型星の

斑紋と関連してユーロピウムとクロムとが別々に斑紋を作っているように見えるのはなぜかなどといった問題がある。

以上 Ap 型星, Am 型星の起源として、元素の拡散仮説の有望性について強調して来たが、最後にこの拡散モデルだけでは説明が付きそうもない観測事実も存在することを挙げねばならない。その第1は Ap 型星に半減期18年の放射性元素プロメシウムが存在するという最近のアラー・カウレイ (1970) の話がある。もしこの同定が真実であるとすれば、星の表面での核反応で説明する以外に手が無いであろう。その他サージェント・寿岳 (1961) によって調べられた Ap 型星 3 Cen A での  ${}^3\text{He}$  の問題がある。この  ${}^3\text{He}$  を拡散モデルにより  ${}^3\text{He}$  と  ${}^4\text{He}$  の原子量の差だけで選択的に沈澱させることで説明するのは困難であろう。

## 宇宙における高エネルギー核現象

—A 型特異星における軽元素の起源に関連して—

伊 藤 謙 哉\*

### 1. はじめに

宇宙に存在する元素をつくる過程の1つに  $x$  過程と呼ばれているものがある。文字どおり、ふつうの元素合成過程ではその存在量を説明できないところから名づけられたもので、Li, Be, B の軽元素、重水素 D などをつくる過程がそれにあたる。いくつかの早期型特異星の表面で観測されているところの Be,  ${}^3\text{He}$ , D などの起源も一筋縄ではいかず、どうやらこの範疇に属するようである。

一般に宇宙元素の起源にかんしては、バービッジ夫妻、ファウラー、ホイルのいわゆる B<sup>2</sup>FH 理論 (1957年) と、日本における林-早川一派の一連の研究 (1956~63年) によって一応の集大成をみた。合成過程を大きく2つに分けると、1つは星の内部の高温高圧の下でエネルギー生成に伴ってゆっくりと反応が進む核反応であり、1つは超新星爆発時に星の外層部で短時間におこる核反応である。大部分の元素の存在はこれらの熱核反応による合成過程で説明できるが、上述した Li, Be, B や D はいずれも近くの原子核にくらべて結合エネルギーが

小さく、熱核反応でできてもすぐに水素と反応してこわれてしまうのである。ここで  $x$  過程の有力な候補として非熱的な核反応が考えられた。すなわち、これらの元素は、高エネルギーに加速された粒子が重い原子核に衝突した際に生じた核破砕片であろうというわけである。しかし宇宙の寿命の間、星の生涯のなかで果してこのような高速粒子が多量発生する時間があるであろうか。かなり前に早川幸男氏 (1954年) はこの非熱的な反応をはじめて提唱し、星の形成初期に相当に長い間高速粒子の照射があってそこで軽元素がつくられることを指摘した。その後星の初期の段階である T-Tauri 星に Li の多いことが発見され、この過程の存在は現実味を帯びてきた。

一方、林忠四郎氏による星の進化の理論的研究も進み (1961~62年)、太陽質量の星では、生まれてから主系列へと収縮する段階で光度が一時著しく増し、現在の太陽光度の2000倍にも達しうることがわかった。この現象は原始星の flare up と呼ばれており、この時期に星の表面磁場が大きく乱され、磁場が増幅される。このとき荷電粒子の加速がおこり軽元素がつくられる可能性がでてくる。しかし定量的な計算の結果、Li の量は足らず、この不足分は、宇宙論的  $3^\circ\text{K}$  黒体輻射の観測から予想される宇宙初期での生成と、 $\alpha$  粒子が関与する反

\* 立教大学 理学部

Kensai Ito: High-Energy Nuclear Phenomena in the Universe