

## ニュートリノ天文学

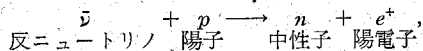
杉本大一郎\*

## §1. まえがき

宇宙からわれわれのところへエネルギーを伝えてくるものは、すべて天文研究の手段になることができる。新しい測定手段が開発されるとともに、これらは天文学の前線にくみ入れられるようになってきた。今までの可視光線による天文学と電波天文学に加えて、赤外線、紫外線、エックス (X) 線、ガンマ ( $\gamma$ ) 線、宇宙線等もそれぞれ〇〇線天文学と呼ばれ、あるものについては研究も進み、あるものは現在開発の途上にある。ニュートリノ天文学もそれらのうちの一例である。観測の方法も、地上から観測するもの他に、ロケット天文学、気球 (バルーン) 天文学などがひらけてきた。ニュートリノ天文学をそのような分類に入れるとすれば、後にのべるように地下天文学ということになるだろう。この解説ではまずニュートリノとは何かをのべ、つぎにニュートリノが星や宇宙線からどのように発生し、また現在どのようにして観測されようとしているかをまとめてみようと思う。

## §2. ニュートリノとは

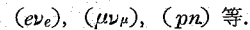
ニュートリノは 1931 年にパウリ (Pauli) によって理論に導入された、電荷をもたない微粒子、すなわち中性微子である。原子核がベータ ( $\beta$ ) 崩壊をして電子を放出するとき、電子のエネルギーは零からある最大値まで連続的に分布している。これだけでは一見エネルギー保存則が満たされていないかに見える。しかしパウリは当時は実験室では検出されない中性の微粒子が電子とともに放出されており、その両方でエネルギー保存則が満たされていると考えたのである。この粒子が実験室で測定されたのは、その後 1953 年になってからである。ライネス (Reines) とコーワン (Cowan) は原子炉から出てくる反ニュートリノを水と CdCl<sub>2</sub> にあてて、逆ベータ崩壊、すなわち



の反応を起させた。このときできる陽電子は、電子 ( $e$ ) と衝突して二個のガンマ線になり、また中性子は百万分の数秒ほどおくれでカドミウムに吸収されてガンマ線を出す。彼等はこれらのガンマ線を測定したのである。

ニュートリノはその後、理論的にも実験的にも研究され、現在では電子と組になる電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ) と

ミュー中間子 ( $\mu$ ) と組になるミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) とがあること、またそれぞれの反粒子、 $\bar{\nu}_e$  と  $\bar{\nu}_\mu$  があり、フェルミ粒子族に、また軽粒子 (lepton) に属することがわかっている。ニュートリノと他の粒子の間の相互作用は弱い相互作用と呼ばれ、ファイマン (Feynman) とゲルマン (GellMann) の理論でつぎのフェルミ粒子の対同志の間でおこり、その結合定数は普遍であると考えられている。すなわち



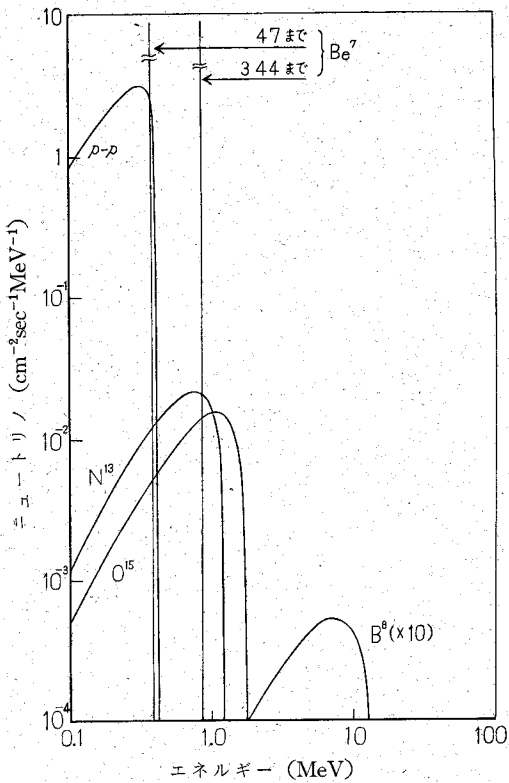
これらのうち ( $\nu_e$ ) と ( $pn$ ) の相互作用はベータ崩壊として、( $\nu_e$ ) と ( $\mu\nu_\mu$ ) の相互作用はミュー中間子の電子崩壊として、また ( $\mu\nu_\mu$ ) と ( $pn$ ) の相互作用は原子核の  $\mu$  捕獲として実験的にたしかめられている。しかし第 5 節で問題となる ( $\nu_e$ ) とそれ自身の相互作用については、現在のところ実験室では測定されていないことに注意しなければならない。

弱い相互作用という名のように、ニュートリノは他の粒子とほとんど相互作用をしない。たとえば太陽の中心で出来たニュートリノが外へ出てくるまでに反応をおこす確率は一億分の一程度である。もし我々の眼でニュートリノがみえるとしたら、星も宇宙も透明であるということになる。宇宙のニュートリノのうちエネルギーの比較的低いものは主として星で作られ、エネルギーの高いものは宇宙線からつくられる。

## §3. 主系列星からのニュートリノの発生

星の光のエネルギー源は高温のもとでの原子核の融合反応、すなわち熱核反応による。星が星間物質から生れたときは水素が主成分である。この星は重力収縮をして中心温度が  $2 \times 10^7$ °K 程になると水素が熱核反応をしてヘリウムになる。この時代の星は主系列星で、その寿命は星の全生涯の中でもっともながい。星の中心部で水素がもえつきると、星のヘリウム核は重力収縮をして中心の温度があがる。この温度が  $1.5 \times 10^8$ °K 位になるとヘリウムが熱核反応をして炭素になる。ヘリウムがもえつきると再び炭素核の重力収縮がはじまり、中心温度が  $6 \times 10^8$ °K になると炭素が熱核反応をして酸素、ネオン、マグネシウム等ができる。このようにして太陽程度より重い星は最後に鉄の中心核ができるまで核反応がすすみ、超新星になると考えられている。太陽程度より軽い星は途中で白色わい星になってしまう。このようなことを星の進化といい、それぞれの段階を水素燃焼時代、ヘリウム燃焼時代、炭素燃焼時代、等々と呼んでいる。

\* 名古屋大学理学部物理学教室  
D. Sugimoto: Neutrino Astronomy



第1図 太陽ニュートリノのエネルギースペクトル

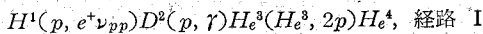
表 1, 太陽からくるニュートリノ

	$\nu_{pp}$	$\nu_{Be}$	$\nu_B$	$\nu_N$	$\nu_O$
平均エネルギー (MeV)	0.26	0.80	7.25	0.71	1.00
地上での数/cm <sup>2</sup> sec	$5.8 \times 10^{10}$	$8.2 \times 10^9$	$1.9 \times 10^7$	$4.8 \times 10^5$	$4.8 \times 10^5$

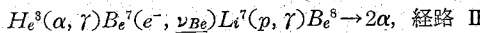
水素燃焼時代に出来るニュートリノはペーター崩壊によるものである。水素がヘリウムになるときの核反応は  $p-p$  チェーンと  $CN$  サイクルによる。核反応を

標的核 (入射粒子, 放出粒子) 残留核,

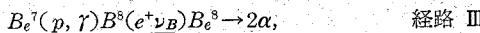
というように表すと、 $p-p$  チェーンは



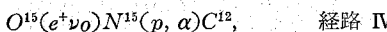
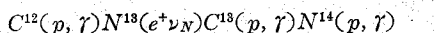
からはじまるが、 $He^3$  がかなりあれば経路 I の  $He^3$  は



の反応をする。このうち温度によって  $Be^7$  は



の分岐を通る。CN サイクルは



の反応をし、最後に残った  $C^{12}$  はまたこの反応を媒介する。すなわち炭素と窒素は触媒であると考えてよい。これらの反応からでてくるニュートリノは上の反応式ではその起源を示すために、元素記号の添字をつけた。これ

らの I ~ IV の経路のうちどれをどの割合で通るかは星の質量によって異なる。太陽より軽い星では経路 I が大部分であり、太陽の質量の2倍程度より重い星では経路 IV が大部分となる。次節にのべる太陽ニュートリノの観測で重要なのは  $\nu_B$  であり、経路 III である。くわしい値は星の内部構造を理論的に計算して求められる。

太陽から出てくるニュートリノについてはくわしい計算がなされている。リーブス (Reeves) によれば、現在の太陽では上記の各経路をそれぞれ 0.55, 0.41,  $7 \times 10^{-4}$ , 0.033 の割合でとおる。各ニュートリノの平均エネルギーと、地球の  $1 \text{ cm}^2$  に1秒間にふりそそぐニュートリノの数をシアーズ (Sears) の計算からとって示せば表1のようになる。ここで eV という単位は電子を1ボルトの電位差で加速したときに得られるエネルギーで MeV はその百万倍のことである。ニュートリノのエネルギー・スペクトルをリーブスからとって図1に示す。縦軸は全体が1になるように規格化されている。太陽は発生する原子核エネルギーの3%をニュートリノとして失っていることになる。

太陽のような過程でできるニュートリノの数は、われわれの銀河全体で1秒間に  $10^{49}$  個程度である。これが地球に到達する割合は  $1 \text{ cm}^2$ , 1秒間につき  $10^4$  個であり、太陽からのものにくらべて非常に少ない。

#### §4. 太陽ニュートリノの観測

太陽ニュートリノを観測するには、そのエネルギーが低いために特別の方法が必要である。それは放射化学的方法と呼ばれ、ポンテコルボ (Pontecorvo) によって指摘された。すなわちニュートリノが原子核と反応して核変換がおこる。生成物は放射性元素になるので、これをある期間平衡値になるまで蓄積し、化学的に分離して放射能を測定するというものである。実際の測定にあたっては適当な元素を選ばなければならない。デイビス (Davis) は低いエネルギー (0.81 MeV 以上) のニュートリノとでも反応し、生成物が不活性ガスで化学的に分離しやすく、廉価なものとして  $CaCl_4$  を選んだ。ニュートリノによる反応は、



である。アルゴンは37日で K 電子捕獲をして X 線を出す。彼はミシガンの地下 700m のところに 4000 l の  $CaCl_4$  をもちこんで観測をしている。昨年12月にテ

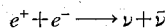
キサスで行われた相対論的天体物理学の研究会での発表によると、上記の反応は 10 日に 3 割の割合で観測された。これにはバックグラウンドが含まれており、前節でのべたシアーズの理論的予想値を確認するには、バックグラウンドを 1/4 にへらさなければならない。このための計画として、1200 m の地下に 40 万リットルをもちこんで今年中に観測することが計画されている、その費用は 2 億円程度だといわれている。

上記の測定では太陽ニュートリノのうち  $B^9$  から出てくるものを観測していることになる。この量、したがって前節の経路 III を通る割合は太陽の中心温度にきわめて敏感であるから、デイビスの観測が成功すれば、われわれは太陽の中心をみたことになるといってよい。太陽から来たものかどうかは、遠日点のときと近日点のときの測定値の差が 7% であるかどうかから判定することができる。

ライネスは  $B^{11}$  とか  $Li^7$  を標的核にして、太陽ニュートリノが逆ベータ崩壊を起させるのを直接に測定し、方向性も、半日周期も観測しようと計画している。

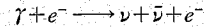
### §5. 進化の進んだ星でできるニュートリノ

星の進化がすすみ炭素燃焼時代になれば、第 2 節でのべた電子とニュートリノとの直接の相互作用によって、星の中心部でニュートリノが作られる。このことは最初ポンテコルボによって 1959 年に指摘されたが、その後チュウ (Chiu) をはじめとする多くの人達の計算 (日本では位田と植原) によって、種々の素過程があきらかにされた。これらのうち、進化した星のエネルギー損失の原因となる重要なものはつぎの三つである。



これは対消滅ニュートリノと呼ばれる。左辺の陽電子は

熱平衡で星の中心部に存在するものである。したがってこの過程は温度が  $10^9$ °K 近くのように高いときに重要となる。

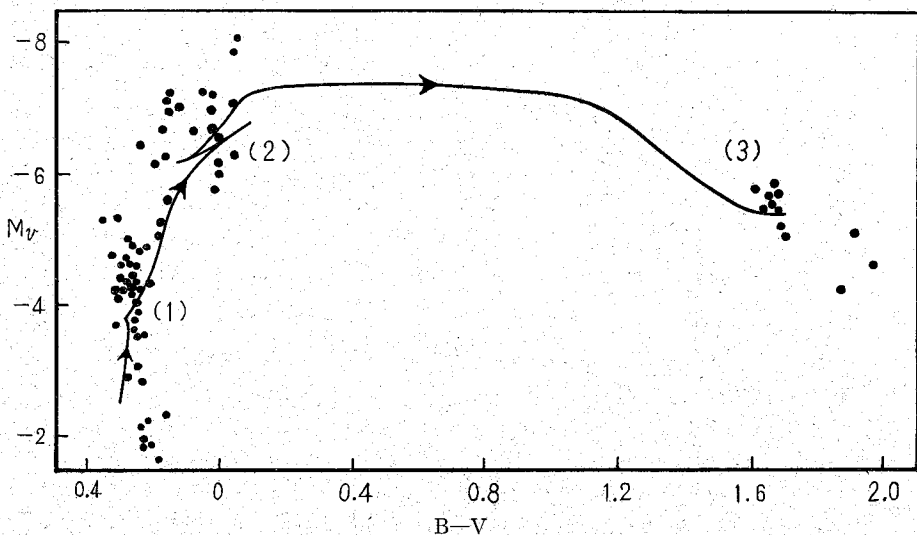


これは光・ニュートリノと呼ばれる。左辺の  $\gamma$  は星の中に存在する光子である。この過程は  $5 \times 10^8$ °K 程度より高い温度であるが、まだ対消滅ニュートリノの過程があまりおこらないときに重要となる。



プラズマ中の電磁波がニュートリノに崩壊するもので、プラズマ・ニュートリノと呼ばれている。密度の高い星の中心部、たとえば白色わい星とか、電子の縮退した中心核をもつ球状星団の赤色巨星とかで重要である。温度は  $10^8$ °K 程度以上であればよい。

第 2 節でのべたように、星の中で作られたニュートリノはそのまま星をつらぬいて外の空間へ出てしまう。ニュートリノのエネルギーは結局は熱核反応で放出されたものであるから、ニュートリノの放出は熱核エネルギーを喰って行われることになる。星の水素燃焼時代にできるニュートリノはせいぜい熱核反応のエネルギーの 6% しかもち去らないから、星の構造と進化には直接の影響を与えない。しかし、進化の進んだ段階での上のべた電子とニュートリノの直接の相互作用によるエネルギー損失は、熱核反応とは直接には関係のない過程であるから温度さえ上げれば、エネルギー損失の速さはいくらでも大きくなる。たとえば炭素燃焼時代にはニュートリノ損失の割合 (ニュートリノ光度) は光によるエネルギー損失の割合 (光度) の 20 倍になり、ネオン燃焼時代と酸素燃焼時代にはそれぞれ千倍および一万倍程度になると計算されている。そしてこれらの時代の星の寿命はそ



第 2 図 15.6  $M_{\odot}$  の星の進化と  $h + \lambda$  ペルセイ

れに反比例してみちかくなる。星が最後に超新星になってその一生を終えるときにはニュートリノ光度は太陽の光度の  $10^{14}$  倍程度にもなる。もしわれわれがニュートリノを直接にみる事ができれば、その進化の生涯を終ろうとしている星が、ニュートリノで輝いて最後の花をかざっているのを点々とみることができただろう。3000 光年より近い星が超新星になれば太陽より明るいだろう。

しかしこれには反論もある。林は 1962 年に太陽質量の 15.6 倍の質量の星、いわゆる重い星の進化を計算した。星の進化は図 2 に示したようにヘルツスプルングラッセル (Herzsprung-Russell) 図の上を星が動くこととして示され、観測と比較される。この図は縦軸に絶対等級を、横軸に色をとったものである。左へいくほど星は青い。図上に散開星団  $h+X$  ペルセイの星を点で示した。星団の星は同時につくられたと考えられ、現在はわずかな質量の差によって進化の各時代にあるものと考えられている。

図で (1) は水素燃焼時代のもの、その少し上方にはなれて一団をなしている A 型の星 (2) はヘリウム燃焼時代であり、赤色超巨星 (3) は炭素燃焼とそれ以後の時代のものであるということが進化の理論からわかる。ニュートリノ損失がないとすればそれぞれの時代の寿命は百万年を単位として (1) 15.7, (2) 1.16, (3) 0.9 である。ニュートリノ損失があれば、(1) と (2) は同じであるが、(3) は 0.04 になる。理論にある不定性を考慮に入れても (3) の上限は 0.17 にしかならない。

星団のヘルツスプルングラッセル図で進化の各時代にある星の数は大ざっぱにいえばその時代の寿命に比例する。ニュートリノ損失の存否によらない水素燃焼時代 (1) とヘリウム燃焼時代 (2) の星の数の比は、理論と観測はよく一致している。これが理論のチェックになる。ヘリウム燃焼時代と炭素燃焼およびそれ以後の時代 (3) とではニュートリノ損失がないときの方がよく合っている。このことは小マゼラン雲中の星団、NGC 330 との比較でも同様である。このことから林は電子とニュートリノの直接の相互作用は第二節でのべた他のフェルミ相互作用の  $1/10$  またはそれ以下であろうといっている。もし  $1/10$  程度ならネオン燃焼時代以後はニュートリノ損失が効くが、もっとずっと小さければ、本節の前半でのべたニュートリノで輝く星のことは書きかえなければならない。ここに天体物理が、天体の供給する特殊な環境をかりて一種の素粒子の実験をする例がみられる。しかし確実な結論を得るためにはやはり実験室でもこの問題の相互作用が測定されねばならない。これは非常に困難であるが、現在ライネスによって原子炉をつかって試みられようとしている。

他の質量の星に対するニュートリノ損失の影響については、現在京都大学と名古屋大学のグループで研究されている。一般に星の進化が進むとその構造が複雑になり計算も煩雑となる。したがって大型かつ高速の電子計算機をつかって星の進化を自動的に解こうという試みがなされている。これは米国でヘニエイ (Henyey) 等によってはじめられ、ヘリウム燃焼時代の計算までは成功している。進化の進んだ星の研究のほとんどがなされている日本では、そこに焦点を合せた自動計算を目標にして開発をしている。

## § 6. 宇宙線から作られるニュートリノとその観測

宇宙線は宇宙で加速されてできる高エネルギーの粒子であり、そのエネルギーは  $10^{20}$  eV に達するものまで観測されている。これらの宇宙線は星間物質の陽子とか、地球大気原子核と衝突してパイ中間子 ( $\pi$ ) とか K 中間子を作る。これらからニュートリノは

$$\pi^{\pm} \longrightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}),$$

の崩壊をつうじてできる。K 中間子も崩壊してニュートリノをつくる。このようにしてできたミュー中間子は

$$\mu^{\pm} \longrightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}),$$

の崩壊で電子ニュートリノを作りうるが、大部分のミュー中間子は崩壊せずに地上へ到達するので電子ニュートリノはミュー・ニュートリノにくらべて少い。宇宙線から作られる高エネルギーニュートリノは、宇宙線中のミュー中間子の観測と、それぞれの発生機構を考慮して、早川らによってくわしく計算された。それによると  $10^{10}$  eV のミュー・ニュートリノは地上で  $1 \text{ cm}^2$ , 1 秒、単位立体角あたり、 $5 \times 10^{-4}$  程度であり、エネルギー・スペクトルは、エネルギーの二乗に逆比例して減少する。ミュー・ニュートリノは  $10^{15}$  eV 以下で、電子ニュートリノは  $10^{13}$  eV 以下では大気中で作られたものの方が多く、星間空間で作られるものはそれ以上のエネルギーにならないと顔を出さない。

これらのニュートリノを観測するのに二つの考え方がある。一つはニュートリノが測定器の中で起す反応を直接に測定する方法である。このためには 1000 トン位の測定器が必要となる。むづかしい実験であるが得られるデータの質はつぎのべる方法よりよい。このための予備実験は小柴によって行なわれている。この場合も太陽ニュートリノのときと同様に、バックグラウンドをさけるために地下へもぐることが必要である。

他の方法は、どうせ地下にもぐらなれば地球を測定器の一部にしようという考えである。すなわちニュートリノが地球の土に衝突して作るミュー中間子をとらえようとするものである。このためには  $100 \text{ m}^2$  程度の大面積の測定器が必要となり、またはじめから宇宙線に含まれている透過度の大きいミュー中間子が来ないほど地下深く

へ入らなければならない。このような観測はライネスによって南阿で、水の深さにして 8400 m の地下坑道で行なわれている。また三宅はインドのコーラ金山のほぼ同じ深さのところでもニュートリノの中間子の上限を得た。さらにアルプスのモン・ブランのトンネルをひろげて観測をしようという計画もある。

### §7. おわりに

前節までにのべたようにして作られたニュートリノは宇宙をさまよっている。それらを考慮に入れた宇宙論的議論が、また宇宙の構造と素粒子の世界の法則との関係の議論がいろいろとなされている。しかしここではあまり範囲が広くなりすぎるので割愛した。

第4節と第6節でのべたように、太陽や宇宙線でつく

られるニュートリノはもうすぐ観測結果が明らかにされるところまでこぎつけられた。遠い星でつくられたものとか、超新星が爆発するときのニュートリノが観測されるようになる日も、いずれ期待できるときがくるであろう。日本ではニュートリノ天文学は昨年、基礎物理学研究所の研究計画にとり入れられ、昨年10月に、原子核物理学、宇宙線物理学、天体物理学者が同研究所に会合し、それまでの研究を発表するとともに、将来の研究について実験、理論を問わずいろいろなアイデアが提出された。天文学の前線は物理学の諸分野と交流しながら益々広がっていく。そこでわれわれは今まで見なかったものを見るようになり、いろいろな新しい知識を供給されることが期待される。

## 地学天文教室

### 天文教材 こんなことが

#### みのわとしゆき

#### 月のかんさつをめぐって

☆月のうごき、「いま三日月が西空にみえています。あと一時間したら月はどちらにうごいているでしょう。」

「はい先生月は西の地平線近くに動いて行きます。」

「半月は南の空にでて西にしずみます。満月は東の空にでて西にしずみます」ここまではスムーズに行くのですが、さて継続観察をつづけて行くうち、教科書の半月は南にでる、満月は東にでるという表現が、うつるとかうごくとか子供達が気づいたときほど困るときはあります。ましてうっかりあしたの今頃同じ時刻に月はどこにいますかなどと発問したら、夕方は東から西にうごく月が、一晩たったら逆に西から東にうごいているという、子供にとつては誠に不思議な現象となって、思考の流れは大きく乱れて授業はつまずきます。指導要領では月は東から西へ動く自転を取扱うことになっていますが、発問を如何に気をつけても詳しくかんさつすればするほど公転の問題が出がちで、小学3年生の月のうごきの単元は苦手の学習の一つです。

☆月のかたち「今西空に沈んだ太陽が、あそこに見える月の右(西)を照らしているから三日月にみえるのです。ほら、満ち欠け図や電灯とボールの実験と同じでしょう。」と実際の月を指さして説明すると始めて知ったように感心する児童、いや先生でさえもそうです。また丁度半月のとき太陽との角度は何度だなどと実際の月をみていってもとてもわからぬのに、それでいてテストの満ち欠け図は実によくわかるのです。もっとも満ち欠けの図の原理的なことは中学に移されたけれど、図と実際の観察の結びつきは天文教材に限ったことではない

けれど、とくに天文の場合は相手が遠くスケールが大きいだけに、その断層を埋める中間的な事を考えねばならないと思います。朝の月は先生と児童がともどもいっしょに月を見ながら授業をすすめるので、是非かんさつしたいものです。1, 2年生などは満月、半月、三日月は別々にあって、かわるがわる出るとほんとは思っているのですから子供というものは厄介なものです。

#### ☆天動説から地動説へ

1年から5年まで太陽、月、星のかんさつを、ありのままにみるというつまり天動説から、6年の最後になって地動説にかわる。この転換をどうしてはるかか。観察の集約から証明的に地動説をもってくる事はできない。なにしろコペルニクスが出現するまで長い間人類が気づかなかったことからしても、この授業の問題はなかなか難しい問題で、動きの相対性や月の自転の観察、科学史の挿入などして知識として教え込むより仕方があるまいと思います。ある人はいう、小学校ではすべて観察本位の天動説で終り、中学に入ってから地動説に転位する……それも一方法かとも思う。学習心理学の面、教材構造化の問題等よりして、この問題はもっと分析探究して教授方法を組立てる必要があると思います。

#### ☆プラネタリウム

「今度学校に理振法でプラネタリウムが買えましてねえ、もうあれさえあれば天文教材は世話なしですよ。」そこで先生はプラネタリウムをぐるぐるまわし一応星座を説明しその単元は終わりである。そして先生は本物の星をみてきなさいなどとほとんどいわない。プラネタリ