

重力波의 宇宙論的 意義*

金 鍾 五

高麗大學校 理工大學 物理學科

I. 서 론

물리학계에서 오랫동안 숙제로 되어 왔던 중력파 (gravitational radiation)의 존재가 「매어리텐드」 대학교의 「조셉 웨버」 교수가 고안한 특수한 정밀 검출기를 사용하여서 확인되었다고 널리 보도 되었다. 이 결과가 확정되려면 다른 물리학자가 측정을 반복하여서 「웨버」 박사의 결과를 다시 얻어야 하지만 아뭏든 이번의 새로운 발견은 「막스웰」이 이론으로 예견한 전자파(電磁波)의 존재를 확인한 「헤르쯔」의 업적에 비유할 만한, 20세기 물리학계의 큰 사건이 아닐 수 없을 것이다. 마침 「웨버」박사가 요번에 사용한 실험장치와 그 장치의 원리를 이미 「피직스 투데이」에 발표하였으니, ⁽¹⁾이 논문을 기초로 중력파가 무엇인가를 더듬어 보기로 한다.

필자는 우주선(宇宙線)에서만 볼 수 있는 고에너지 ($\lesssim 10^{12}$ eV)의 일차우주선이 일으키는 원자핵반응을 연구해 왔다. ⁽²⁾ 고에너지의 원자핵이 우주공간에서 대기 상공까지 날아 오고 있는 것을 알게 되었고 그 우주선의 발생원(發生源)에 관한 여러 학설을 접했다. 우주선의 가속원리는 「펠미」가 제창한 소위 「통계적인 가속」은 지금은 원리적으로 성립이 곤란함을 알게 되었고 역시 항성체(恒星體) 규모의 수축붕괴(收縮崩壞)같은 사건이 이 고에너지 우주선의 발생원의 가장 유력한 후보로 등장하였음을 알았다. 이것은 우주선의 구성성분을 연구해 보면 철(鐵-Fe)의 원자핵이 평균한 우주전체의 원소존재비보다 월등히 많다는 기괴한 사실에서부터 이 수축붕괴에 관한 학설이 서게 되었다. 이러한 수축붕괴가 있

으면 역시 중력파도 발생시키리라는 것을 필자가 여기에 소개하고자 하는 것이다.

특기해야 할 사실은 지금 우주과학의 연구 수단으로 사용된 현대적 방법인 인공위성이나 전파 망원경이 모두 현대공업의 정수(精髓)만 집대성한 것처럼, 현금의 우주론은 어느 모에서는 모든 자연과학의 집대성인 종합과학인 것 같다. 이런 의미에서도 문외한인 필자가 외람한 글을 쓰고 발표한 것을 용서 받고자 한다. 또 필자가 정기적으로 읽고 있는 「피직스 투데이」나 「피지컬 레뷰 레터스」지에도 요사이의 우주천문학적인 뉴스거리로 차있다.

II. 상대성이론과 중력파

「아인슈타인」⁽³⁾이 일반상대성이론을 제창했을 당시는, 상대성이론을 완전히 이해할 수 있는 사람은 온 세계를 통틀어서 몇이 되지 않으리라는 얘기가 나돌았다. 왜냐하면 이 이론에 내포된 개념 자체는 꽤 간단하고 이해하기 쉬웠으나 단지 수학적 표현이 극히 알기 어려웠던 것이다. 상대성이론의 기본 원리는 공변원리(covariance principle)라 한다. 즉 한 사람의 관측결과에 의해서 수립된 자연법칙은 다른 시공간(時空間)에서 임의의 상대운동을 하고 있는 다른 사람의 관측에서도 그 법칙의 수식 표현이 변하지 않고 성립할 경우에만 이 법칙이 자연법칙이 될 수 있게 된다는 것이다. 「리이만」기하학을 사용하여 시공간의 곡률텐서로 표시되는 중력퍼텐셜에 대한 「아인슈타인」의 방정식은 이 공변원리를 만족시킨다. 이 방정식에 의하면 어떤 상대적인가속도 운동을 하고 있는 두 관측자에게도 물리학의 법칙

* 이 글은 1969년 7월 5일 연세대학교에서 열린 천문학회 총회에서 발표한 것임.

이 공변하게(covariant) 표현된다. 유성의 궤도나 광자(光子)의 비행로는 측지선(geodesic line)이 되는 것이다.

다년간 과학자들은 「아인슈타인」이론에 기초를 둔 여러 가지 예언을 시험하려고 노력해 왔다. 그 중에서도 다음 세 가지 관측에서 「아인슈타인」이론은 지지를 받아 왔다.

(a) 적색이행(red shift):

「합블」의 관측에 의한다면 우리에게서 먼 거리에 있는 은하(galaxy)일수록 더 빠른 속도를 가지고 우리에게서 멀어져 가고 있다는 것이다. 「아인슈타인」의 방정식을 기초로 하는 우주론에 따르면, 등방위적(isotropic)이라 가정할 때 우주(universe)는 그 부피 V 가 시간 t 의 변화에 대해서

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = (24\pi G\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

로 주어진다. (4) 윗 식에서 G 는 중력상수이고 ρ 는 밀도(g/cm^3)를 표시한다. 즉 우리가 속해 있는 대우주는 팽창하고 있는 과정에 있으니 우리에게서 멀리 떨어져 있는 은하일수록 더 빨리 퇴거(退去)해 가는 것처럼 보인다고 해서 「합블」의 관측을 쉽게 설명한다. 제(1)식을 기초로 하면, 「합블」상수에서, 전형적으로 대우주의 체적이 영(零)이 되는 우주탄생 시초의 대폭발(big-bang)이 약 10^{10} 년전이었다는 것도 나온다.

(b) 중력장에 의한 빛의 편향:

빛이 태양 언저리를 지나면 강한 중력장에 의해서 그 진로가 편향(偏向)된다는 것이 1919년 이래의 일식 관측에서 확실하여졌다. 「아인슈타인」이론에 의하면 그 때의 편향각 θ 는

$$\theta = \frac{4GM_{\odot}}{Rc^2} \approx 1.75'' \quad (2)$$

로 예언된다는 것이다. 여기서 R 는 태양의 반경이고, M_{\odot} 는 태양의 질량, c 는 광속이다. 측정 결과는 제(2)식과 잘 부합한다.

(c) 수성(水星)의 근일점이동:

태양계에서 태양에 가장 가까운 유성인 수성은 태양을 초점으로 한 타원궤도를 그린다. 그러나 그 장축이 한 세기마다 약 $43''$ 의 각속도로 회전하고 있다는 것이다. 이 근일점 이동의 현상은

「아인슈타인」이론만이 정확하게 예언할 수 있었던 것이다.

그러나 지금 본다면 우습기만 한 얘기지만, 오랫동안 「아인슈타인」이론의 가장 어려운 점은 「아인슈타인」의 방정식이 중력파의 발생에 대한 예언을 할 수 있었으나 실제로는 검출되지 못했다는 데에 있었다. 「아인슈타인」의 방정식은 비선형(非線型)이었기 때문에 그대로는 방정식의 해(解)를 얻기가 매우 어려웠다. 중력파 발생원 근처이거나 질량이 없는 자유공간이거나를 막론하고 구면파(球面波)인 만족스러운 해는 존재하지 않았다. 「아인슈타인」(5)과 「에딩톤」(6)은 처음 「아인슈타인」방정식을 선형화(線型化)해서 중력파 발생을 예견한 것이다. 이 이론에서는 중력파는 가장 낮은 차원(次元)에서 일지라도 사중극자(四重極子)인 복사파가 나오게 된다. 가령 회전각진동수 ω 로 돌고 있는 막대가 방출하는 매초마다의 에너지 즉 일률 P 는

$$P = \frac{32GI^2\omega^6}{5c^5} \quad (3)$$

으로 주어진다. I 는 관성능률이다. 제(3)식은 역시 사중극자인 전자파(電磁波)의 복사율과 같은 형식이다. 만일 하전량(荷電量)의 자승이 q^2 인데 그것을, 그 입자의 무게가 m 일 때, Gm^3 으로 고치기만 하면 사중극자 전자파의 에너지 발생율의 식이 제(3)식이 된다는 것이다.

원자나 분자에서는 광파가 나오기 쉽지만 중력파 발생이 있기 힘든다는 것은 곧 알 수 있다. 전자파를 내는 주인공인 전자(電子)는 두 개의 전자간에 정전장에 의한 힘과 중력장에 의한 힘의 비가

$$\frac{Gm^2}{e^2} = 10^{-43} \quad (4)$$

이기 때문에 중력파는 발생하기 힘들다.

실험실적인 최선의 조건하에 우리가 제조할 수 있는 중력파의 발생 일률은 겨우 10^{-37} 왓트 밖에 되지 못한다. (1) 이것은 우리 일상주변에 실험실 규모의 중력파 발생장치를 만들어 보았자 그 발생하는 에너지가 작기 때문에 검출하지 못한다는 얘기가 된다.

1963년에 「다이슨」이라는 이론물리학자는 먼

저 말한 바 우주선의 발생원도 되는 수축붕괴 과정이 존재한다는 가정 아래 항성(恒星) 규모의 천체에서의 중력과 발생의 가능성을 발표하였다.⁽⁷⁾ 가령 같은 질량 m 를 가진 연성(連星)이 서로 상대속도가 광속에 가까운 운동을 한다고 생각하자. 이때 거리를 $2r$ 라고 잡으면 원심력과 이 두 천체간의 중력으로 된 구심력이 같아야만 원운동이 가능하므로

$$\frac{mc^2}{r} \approx \frac{Gm^2}{(2r)^2} \quad (5)$$

이라는 조건이 나오고, 또 두 별의 속도가 광속에 가깝다면 즉

$$c \approx \omega r \quad (6)$$

이라면, $I = 2mr^2$ 이니까 제(3)식에서

$$\text{일률: } P \rightarrow \frac{2048c^5}{5G} \quad (7)$$

이 된다. 이 식은 벌써 일률이 질량 m 에 무관하다는 것을 알려준다. 더 자세하게 계산해 보면

$$P = 2048 \frac{v^{10}}{5c^5 G} \quad (8)$$

이 된다. 예를 들어서 우리 태양이 한 점으로 수축붕괴해 간다면, 그렇게 특별히 큰 각운동량을 가지고 있는 천체는 아니지만, 가장자리 부근의 물질은 각 운동량 보존에서 거의 광속에 가까운 속도를 가지게 될 것이고 이렇다면 매초 10^{50} 에르그의 에너지가 방출 되는 셈이다. 수축붕괴 과정이 진행해 가면 외부표면 가장자리에 있는 물질은 광속에 가까워져서 이러한 물질의 운동이 중력파를 발생시키리라고 「다이슨」은 제창했다. 먼저도 말했지만 이 수축붕괴의 현상은 또한 우주선(宇宙線)의 발생원도 되리라는 것이다. 다음에는 이런 일이 있을 수 있다는 것을 보기로 하자.

Ⅲ. 중력파의 우주론적 의의

「아인슈타인」이론을 바탕으로 한 우주론은 팽창과정에 있는 우주를 설명하고 「합블」의 관측을 잘 설명한다. 즉 「아인슈타인」이론은 우주론의 기본 입자인 「은하」규모에서의 현상을 자연스럽게 파악하고 설명하지만, 또 중력파의 발생이 항성적인 규모에서 가능함을 보여주는 데에 그 우월함이 있다. 「다이슨」이론에서 가정한 천체의 급격한 수축붕괴(collapse)는 우리가 현재 알

고 있는 구조나 원소 존재비(元素存在比)에 관한 연구에서 존재할 수 있다는 것을 알 수 있다. 여기에는 최근에 전파 망원경에서 알게 된 준항성체(Q.S.O. quasi-stellar objects)나 펄사(pulsar)의 얘기도 끼게 된다.

항성의 질량과 체적이 평형상태를 유지하고 있는 것은 두 가지의 조건이 성립하는 것이 된다. 즉 첫째는 항성 내부의 어느 부분에서나 작용하는 힘이 평형을 이루어야 되고, 둘째는 어느 체적에서나 방출되어 나가는 열에너지는 다른 형태(주로 원자핵력)의 에너지가 발생함으로써 보상되어야만 한다. 처음 조건에서 항성 내의 압력의 그레디언트(gradient)와 중력에 대한 관계식을 얻을 수 있고, 다음 조건에서는 항성 내부에서 일어나고 있는 원자핵 반응의 열과 열의 흐름이 어떻게 관계하는 가를 알 수 있다. 현재의 발달된 원자핵 물리학의 이론적 실험적 지식을 바탕으로 하여 항성 내부의 원자핵 반응이 어떻게 진행되고 있는가를 알 수가 있다. 또 항성 내부의 보이지 않는 핵심부에서 일어나고 있는 원자핵 반응에서 어떻게 우리가 관측할 수 있는 복사선이 나오는가를 전자계산기를 사용하여 정밀하게 계산할 수도 있다. 그러므로 항성의 질량과 어느 초기에서의 항성의 구성 원소를 알면 이 항성의 그 후의 구조를 알 수 있으며 그 진화과정도 이해할 수 있게 되는 것이다. 생성시의 항성은 거의 수소로만 되어 있다고 믿어진다. 지금 수소 폭탄에서 볼 수 있는 것 같은 원자핵의 융합반응에서 수소 넷이 합쳐서 헬륨의 원자핵이 된다. 이 과정에서 대부분의 항성은 체적을 유지하고, 빛을 내보내고 저에너지의 우주선과 자장이 섞인 「플라즈마」를 내뿜고 있는 것이다. 이러한 융합반응 과정으로 고온인 핵심부에서 수소를 자꾸 태워 가서 수소를 다 소모했을 경우에는 항성체는 변질이 되는 것이다. 내부의 온도는 융합반응을 유지할 수 있을 정도로 높으니까 복사로서 계속 에너지는 외부로 나가게 되나 핵반응에서의 에너지 공급이 멎었으니 에너지는 「마이너스」가 되는 것이다. 항성의 내부가 완전기체라고 가정하고 준안정상태가 계속 유지 된다고 가정하면 비리알(virial)정리에서 중력퍼텐셜

에너지 E_g 는 운동(열)에너지 E_{th} 의 두 배가 된다. 총에너지 E 는

$$E = E_g + E_{th} = \frac{1}{2}E_g = -E_{th} \quad (9)$$

라 표시된다. 결국 항성이 원자력에너지가 공급되지 않고 복사에너지를 잃을 때에는 수축하게 되며, 수축하면 $|E_{th}|$ 가 증가하니까 항성 내부에서 온도가 올라가게 된다. 이와 같이 수축해서 더 한층 고온상태가 된 핵심부에서는 더 복잡한 원자핵의 융합반응이 가능해지는 것이다. 수소가 탕진되면 이번에는 헬륨원자핵이 타서 탄소 원자핵등이 되고 다시 탄소핵을 다 태우면 더 무거운 핵이 만들어져 가니 항성 내부에서 소위 원자핵합성(nucleosynthesis)이 이루어지는 것이다. 지금 우리는 현존하는 원자핵 중에서 헬륨보다 무거운 원자핵은 거의 모두가 항성 내부에서 원자핵합성 과정에 의해서 제조된 것이라 보고 있다.

이런 항성의 진화과정의 노년기인 종말점이 있게 되는데 거기에는 대별하여 두 가지 길이 있음이 밝혀졌다. 항성의 대부분의 경력이 되겠지만 항성의 질량 M 이 태양의 질량 M_\odot 보다 크지 못할 경우(즉 $M \lesssim M_\odot$)와, 또 M_\odot 보다 훨씬 큰 경우(즉 $M \gg M_\odot$)로 나누어진다.

(a) $M \lesssim M_\odot$:

태양보다 크지 못한 질량을 가진 항성내부에서는 물리적 조건에 의해 전자가 축퇴(degenerate)된 상태에 있게 된다. 축퇴된 전자에 의해서 체적을 유지하는 압력이 생긴다. 이 압력의 크기는 온도와는 그렇게 밀접한 관계가 있는 것도 아니어서, 수축하는 일도 없이 복사로 에너지를 잃어서 식어 갈 것이다. 항성의 대부분은 이러한 냉각 도상에 있고, 축퇴된 전자기체에 의해서 부피를 유지해서 밀도가 약 10^6 그램/cm³ 이상인 백색왜성(white dwarf)으로 전락한다. 또 이에 앞서 수소를 다 소모해 버린 핵심부는 수축하지만 비교적 희박한 외피(外被)부분은 팽창해서 소위 적색거성(赤色巨星)이 된다. 적색거성의 외피는 비교적 험겁게 구속되어 있어서 작은 교란을 받아도 별의 질량의 일부분이 상실되기 쉽고 이 사실은 분광학적 연구에서도 나타났다.

(b) $M \gg M_\odot$:

항성의 질량이 태양의 질량보다 훨씬 클 때에는 이 항성은 전자기체로 축퇴되지 않고 계속해서 빠른 「템포」로 열융합반응이 지속되어 가서 Fe^{56} (철의 원자핵)을 생산할 때까지 고온이 계속된다. Fe^{56} 이란 원자핵은 초보적인 원자핵 물리의 교과서를 보아도 알지만, 매 핵자(核子)당의 결합에너지의 극대점이 된다. 즉 일단 Fe^{56} 이 형성된 후에는 더 이상 열융합반응에 의해서 질량번호가 더 큰 원자핵 생성을 가져오는 일이 없어진다. 이것은 원자핵 안에 너무 양성자의 수 $Z(\approx \frac{1}{2}A$: 질량번호)가 증가하면 양인 전하 간의 「쿨롱」힘이 커지기 때문인 것이다. 사실상 항성내부에서 온도가 올라가면 철의 원자핵 Fe^{56} 은 오히려 다시 붕괴해서 질량번호가 작은 핵이 될 것이다. 이러한 사실과 또 온도가 증가해서 부피가 작아지면 「중성미자」를 포함하는 과정에 의한 에너지 손실이 광자를 포함하는 과정에 의한 것과 거의 맞서게 되어서 결국 항성 내부의 온도에는 상한(上限)이 있게 된다. 따라서 열에너지도 상한이 있게 된다. 이러한 때 즉 항성 내부가 거의 Fe^{56} 으로 차있고 그 보다 작은 질량번호를 가진 원자핵이 거의 탕진되었을 때에는, 항성이 수축하면서 중력의 에너지가 방출된다. 이 때에는 이미 「비리알」정리가 성립할 정도의 준안정상태가 아닌 전면적인 과격한 수축붕괴 과정이 벌어질 것이다. 초신성(超新星-supernova)의 폭발이 바로 이러한 것이다. 이러한 과정에서 중력의 충격파(衝擊波)도 생기고 코에너지의 우주선의 가속도 이루어지리라 생각된다. 우리가 외부 공간에서 도착하는 우주선 속에 무거운 원자핵 Fe^{56} 이, 우주 내에서의 원소의 평균 존재비와 비교할 때, 한 두 자리 많은 비율로 풍부하다는 것이 우주선의 실험에서 밝혀졌는데 위와 같은 과정의 직접적인 증거라고 본다. 다 타고 남은, 철핵이 풍부한, 항성의 일부가 비산(飛散)해 나간다는 얘기가 된다. 게성운(Crab Nebula)의 예가 이 대표적인 예가 아닌가 한다. 이 폭발 결과는 그 잔재(remnants)와 중성자성(neutron star)이라고 보고 있다. 중성자성은 항성 전체의 밀도가 핵물질의 밀도 정도 또는 그

이상의 높은 것이 된다고 본다. 최근 1968년 이래 빠른 주기(~ 0.033 초)로 그 강도가 변화해 가는 전파나 가시광의 발생원이 발견되어 펄사(pulsar 맥동전파원)라고 한다. 이 중성자성이 바로 펄사라는 설이 믿어져 가고 있다.

근래에 전파 망원경을 사용하여 관측한 결과 전파원을 많이 발견하여 전파은하(radio galaxy)의 분포도를 완성시키고 있는 중이다. 이 중에 강한 전파원이면서 작은 파란 항성체 같은 것을 발견하여 준항성체(quasi-stellar objects Q.S.O.)라 하였다. 이 준항성체의 시직경은 대단히 작아서 어떤 것은 $0.01''$ 정도였다. 분광선을 연구해 보면 대개가 굉장히 큰 적색이행 $Z = \Delta\lambda/\lambda$ 를 보이고 있는 것이 특징이다. 어떤 것은 $Z=2.2$ 인 준항성체가 있다. 시직경이 작고 적색이행이 크니까 「합블」거리로 따져서 먼 데에 있는 우주라는 해석이 요즘에는 압도적으로 믿어져 가고 있다. 먼곳에 있는 우주가 지구까지 강한 에너지를 보내 오고 있으니까, 「콜게이트」는⁽⁸⁾ 준항성체는 초신성 폭발이 잦은 우주라고도 해석하고 있다. 이러한 특수한 우주는 항성이 비교적 밀집해 있어서 서로 충돌해서 응집(凝集)되어서 질량이 태양의 질량 M_{\odot} 보다 훨씬 큰 항성이 비교적 많다는 것이다. 정상적인 우주의 항성의 질량은 거의 다 M_{\odot} 와 비슷한 것이라 지적된다.

IV. 결 론

항성의 질량 M 이 태양의 질량보다 훨씬 클 경우에 초신성 폭발이 있을 수 있고 이러한 수축붕괴의 과정에서 중력의 충격파도 발생할 수 있고 또 고에너지의 우주선도 발생하리라는 것을 약설하였다. 중력파의 검출은 우주공간에서 일어나고 있는 대격변(catastrophe)이 항성 규모의 크기로 일어나고 있다는 얘기도 된다. 외신 보도에서 벌써 분명해진 사실은, 「웨버」박사가 그동안 1월 이래 40회나 50회의 중력파에 의한 진동을 포착했다고 하니, 중력파가 지구에 오는 빈도(頻度)가 너무 크다는 사실이 된다. 우리가 지금까지 관측한 초신성 폭발은 그리 흔한 사실이 아니기 때문에 위에서 말한 중력파 발생의 메카니즘(mechanism)만으로는 중력파의 설명이 어

렵지 않을가 한다. 그러나 하나의 초신성 폭발에서 오랫동안 계속하여 여러번 중력의 충격파가 나올수 있을지도 모른다. 또한 이것이 부정되는 경우 우리 은하계(Milky Way) 내의 신성(nova) 폭발도 중력파를 낸다고 보거나 중성자성도 계속 중력파를 낸다고 보아야 할지 모른다.

이제부터 중력파의 관측을 통한 우주론 연구의 시대가 온 것이다. 중력파의 발견원에 대한 성도도 만들어야 하고 각진동수 ω 에 대한 충격파의 강도의 모습도 알아내야 될 것이다.

중력파의 또 한 의의는 그것이 새로운 에너지원으로서 등장할 가능성이 있다는 것이다. 대우주(universe)내의 에너지원은

- (i) 항성체의 질량
- (ii) 전자파 (가시광 포함)
- (iii) 우주선(宇宙線)
- (iv) 흩어진 자장(微場)「플라즈마」

등의 형태라고 지금까지 알려져 왔는데 이 모두가 각각 거의 같은 정도의 총에너지를 가지고 있는 듯하다. 환언하면 대우주에서는 통계역학의 균배법칙(equipartition law)이 성립하여 각 자유도(自由度)마다 같은 정도의 에너지가 있다는 얘기가 되는 듯하다.

이제

- (v) 중력파

의 형태로 에너지의 자유도가 늘어 났으니 이 중력파의 에너지도 다른 형태의 총에너지 양 정도는 되리라는 해석이 나올 수 있는 듯하다.

References

1. J. Weber, *Physics Today* 21, 34(1968).
2. 김종오, 새물리 8, 21 (1968).
3. A. Einstein, *Ann. d. Phys.* 49, 769 (1916).
4. A. Sandage, *Ap. J.* 133, 355(1961).
5. A. Einstein, *Sitzungs Berichte Pruss. Acad. Wiss.*, p.688 (1916); p.154 (1918).
6. A. S. Eddington, *Proc. Roy. Soc. (London) A* 102, 268 (1923).
7. F. J. Dyson, *Interstellar Communication*, Ch. 12, W. A. Benjamin, New York (1963).
8. S. A. Colgate, *Physics Today* 22, 27 (1969).