고적색이동 은하단들의 고밀도 분광탐사

● 황호성[1], 이성국[2], Raphael Gobat[1], Veronica Strazzullo[3], 박창범[1], 이종철[4], 고종완[4], 임명신[2], 김재우[2], 황정선[5], Benjamin L'Huillier[1], 이광호[2], 손주비[2], 현민희[2]

고등과학원[1], 서울대학교[2], Ludwig-Maximilians-University[3], 한국천문연구원[4], 경희대학교[5]

초 록

본 관측 제안팀은 GMT/GMACS 다천체 분광기를 이용하여 적색이동 구간 1과 2 사이에 있는 20개 은하단에 대해서 체계적인 중분산(R=3000) 분광탐사를 수행하고자 한다. 은하단 은하들의 속도 자료 및 스펙트럼 특징들을 이용해서 고적색이동 은하단들의 질량 분포를 파악하고, 은하단 내에서 은하들이 어떤 환경 효과를 받으면서 진화하는지를 살펴보고자 한다. 측정된 은하단 내 질량 분포를 이론적 예측과 비교하고, 은하단 안팎 은하들의 물리적 특성을 환경 및 적색이동의 함수로 살펴봄으로써, 우주거대구조 형성 모형과 은하 진화 모형을 검증하고자 한다. 또한 은하단 주변의 많은 은하에 대해 체계적인 분광관측 자료를 확보함으로써 고적색이동 은하 연구에 중요한 기초 자료를 제공할 것이다.

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 적색이동 구간 1과 2 사이에 있는 20개 은하단에 대해서 체계적인 분광탐사를 수행하고자 한다. 이 자료를 이용해서 고적색이동 은하단들의 질량 분포를 파악하고, 은하단 내에서 은하들이 어떤 환경 효과를 받으면서 진화하는지를 살펴보고자 한다. 측정된 은하단 내 질량 분포를 이론적 예측과 비교하고, 은하단 안팎 은하들의 물리적 특성을 환경 및 적색이동의 함수로 살펴봄으로써, 우주거대구조 형성 모형과 은하 진화 모형을 검증하고자 한다. 또한 은하단 주변의 많은 은하에 대해 체계적인 분광관측 자료를 확보함으로써 고적색이동 은하 연구에 중요한 기초 자료를 제공할 것이다.

현재 우주론 모형에 따르면, 우주는 작은 은하들이 중력에 의해 서로 이끌리면서 큰 은하를 만들고, 또 은하단 같은 더 큰 구조를 형성하면서 진화해간다. 따라서 시간에 따라 얼마나 무거운 은하단이 얼마나 많이 형성되는지를 아는 것은 우주론 모형을 검증하는 데 중요한 요소가 된다. 특히 은하 생성과 우주거대구조 형성이 활발한 적색이동 1과 2 사이에 있는 은하단을 연구하는 것이 중요하다. 이 적색이동 구간에서 분광관측으로 현재까지 알려진 은하단 개수는 매우 적고(~40개), 한 은하단 내에서 은하단에 속한 것으로 판명된 은하 개수 또한 매우 적다(10-40개).

본 관측 제안팀은 적색이동 구간 1에서 2 사이에 위치한 20개의 은하단에 대해서 체계적인 중분산(R = 3000) 분광관측을 제안하고자 한다. 통계적으로 유의미한 결과를 얻기 위해서 한 은하단당 150여 개 이상의 은하단 은하를 얻고자 한다. GMT/GMACS를 사용하면 적색이동 1.5에 위치한 은하단 중심에서 공변 각거리 ~$7h^{-1}$Mpc 반경까지 탐사할 수 있어서, 은하가 은하단 안팎에서 어떻게 환경 효과를 겪는지도 연구할 수 있다. 이 고적색이동 은하단의 탐사 자료를 가까운 은하단 탐사 자료와 결합하게 되면 은하들의 물리적 특성들이 어떻게 환경 효과를 받으면서 진화하는지를 연구할 수 있게 될 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

Zwicky(1933)가 머리털자리 은하단 연구로부터 암흑물질 존재의 필요성을 처음으로 주장한 이래로, 은하단은 암흑물질의 본질과 우주 구조 형성에서 그 역할을 이해하는 데 유용한 실험실이 되어왔다. 예를 들어 Navarro 등 (1997)은 N-체 모의실험을 통해서 은하나 은하단에 대응되는 헤일로의 반경에 따른 밀도 분포 모양이 보편적이라는 결론을 처음으로 주장했다. 이 보편적인 밀도 분포 모양을 NFW 형태라 부르는데, 질량과 집중도라는 두 가지 변수로 헤일로를 정의할 수 있다. 따라서 NFW 같은 밀도 분포 모양을 관측적으로 얻어진 은하단 또는 은하의 밀도 분포함수와 비교하면 우주론 모형을 검증할 수 있다(Allen 등 2011). 가까운 우주에서 이런 비교 연구는 광범위하게 시도되어왔고(그림 1), 모의실험과 관측 결과가 잘 일치했다(Rines 등 2013). 그러나 은하단과 같은 거대 구조는 시간에 따라서 계속 성장해가기 때문에 과거의, 즉 고적색이동의 은하단에 대해서 모의실험과 관측 결과가 서로 일치하는지 살펴보는 것이 매우 중요하다.

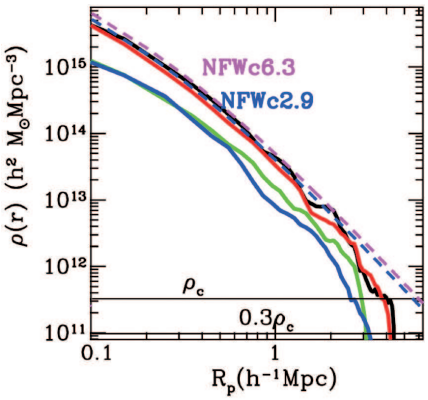

그림 1. z=0.2 근처의 58개 은하단 관측 자료를 바탕으로 만든 은하단 반경에 따른 은하 밀도 분포 형태(Rines 등 2013에서 발췌). 각 실선은 은하단을 질량에 따라 나눈 서로 다른 표본을 의미한다: 검은색(M_{200}~4.95-12.40×$10^{14}h^{-1}M_\odot$), 빨간색(M_{200}~3.33-4.58×$10^{14}h^{-1}M_\odot$), 녹색(M_{200}~1.92-3.10×$10^{14}h^{-1}M_\odot$), 파란색(M_{200}~0.66-1.86×$10^{14}h^{-1}M_\odot$). 보라색 점선은 강한 중력렌즈를 겪는 은하단들의 NFW 형태(Umetsu 등 2011)와 파란색 점선은 약간 중력렌즈를 겪는 은하단들의 NFW 형태(Okabe 등 2010).

은하단은 암흑물질뿐 아니라, 온도가 매우 높은 기체, 그리고 많은 은하들로 구성되어 있다. 각 구성 물질들은 중력적으로 또는 유체 역학적으로 긴밀한 상호작용을 하고 있기 때문에, 은하단은 은하들이 어떻게 주변 환경의 영향을 받아서 진화하는지를 효과적으로 연구할 수 있는 장소이기도 하다. 가까운 우주에서는 은하단에 속한 은하들과 속하지 않은 은하들의 물리적 특성들(형태, 색지수, 별 생성률 등)이 다르다

는 것이 알려져 있다(Park & Hwang 2009). 대표적으로 은하의 별 생성률이 은하단 바깥쪽보다 안쪽이 매우 작다고 알려져 있는데, 이를 별 생성률-밀도 관계라고 한다. 그런데 이 별 생성률의 밀도에 따른 차이가 초기우주, 즉 고적색이동으로 갈수록 줄어들거나 심지어 은하단 같은 고밀도 지역에서 저밀도 지역보다 더 많은 별 생성률을 보이기도 하는데, 이것을 별 생성률-밀도 관계의 역전이라고 한다(Elbaz 등 2007).

이 관계식의 역전이 정확히 언제부터 일어나는지는 아직 알려져 있지 않는데, 이 정보는 은하 진화 모형에 중요한 제한 요소가 된다(그림 2). 또한 은하가 겪는 환경 효과는 은하의 질량에 따라서 그 정도가 달라진다(Zeimann 등 2013). 따라서 어떤 질량의 은하부터 환경에 따른 물리적 특성 차이가 나타나는지, 또 이 차이가 언제부터 시작되는지는 은하 진화 모형 검증에 중요한 요소가 된다. 이와 같은 환경에 따른 은하들의 물리적 특성 차이를 연구하기 위해서는 많은 수의 고적색이동 은하단을 살펴보는 것이 필요하다. 특히 적색이동 1과 2 사이는 은하들이 가장 활발하게 성장해가는 시기이고(Behroozi 등 2013), 은하를 포함하는 은하단 또는 은하군 같은 구조들이 서로 활발한 상호작용 및 병합을 통해서 우주거대구조를 형성해가는 시기이기 때문에 이 시기의 은하단을 살펴보는 것이 매우 중요하다.

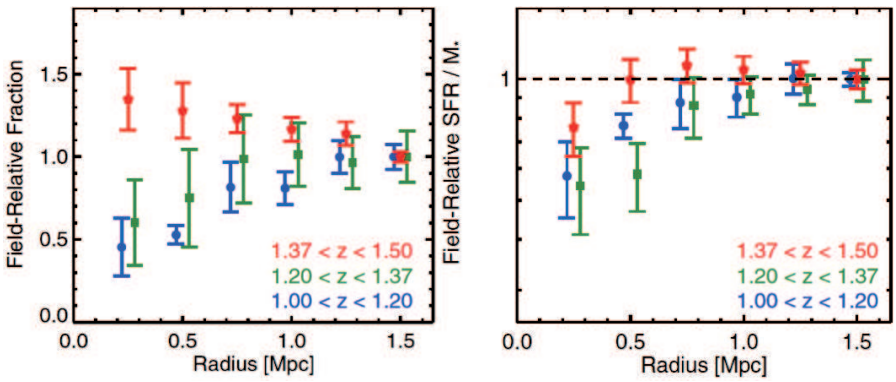

그림 2. (왼쪽) 은하 질량이 $\log(M_{star}/M_{\odot})=10.1$보다 크고 은하단에 속하는 은하들 중에서 은하단 반경에 따른 별 생성 은하들의($L_{IR}\geq10^{11.5}$ $L_{\odot}$) 개수 비율(은하단 밖에서의 값을 1로 표준화하였다, Brodwin 등 2013에서 발췌). 다른 색깔은 다른 적색이동 구간을 의미한다. (오른쪽) 은하 질량이 $\log(M_{star}/M_{\odot})=10.1$보다 크고 은하단에 속하는 은하들의 은하단 반경에 따른 질량당 별 생성률(은하단 밖에서의 값을 1로 표준화하였다). 고적색이동으로 갈수록 은하단 중심에서 별 생성 활동이 활발해짐을 알 수 있다.

적색이동 1과 2 사이의 은하단에 대한 현재까지의 분광 연구는 망원경의 한계로 체계적이지 않았고, 주로 개별적으로 이루어졌다. 따라서 관측된 은하단 은하들의 특성이 어떤 물리적 변수에 의해서 주로 영향을 받는지 알 수가 없다. 또한 분광관측으로 확인된 은하단에 속한 은하들의 개수는 10-40개 정도뿐인데, 주로 은하단 중심에만 몰려 있다. 즉 관측 결과가 은하단 중심에 있는, 본래부터 밝은 은하들에만 주로 의존하고 있어서, 은하단의 특성을 선택적으로 보여주고 있는 상황이다. 따라서 이 시기의 은하단의 물리적 특성을 제대로 이해하기 위해서는 많은 수의 고적색이동 은하단 은하를 체계적으로 넓게 분광탐사하는 것이 꼭 필요하겠다.

2) GMT의 필요성

적색이동 1과 2 사이의 은하들을 분광관측하는 것은 현재 지상의 8-10m급 망원경과 허블 우주망원경을 통해서 주로 가능한데(Gobat 등 2013; Stanford 등 2014), 한 은하단당 중심 부근의 밝은 10-40개의 은하 정도만 관측되어왔다. 본 연구에 GMT를 이용하면 세 가지 장점이 있다. 첫째로 망원경 구경이 증가함에 따라 어두운 은하(z~1-2에 해당하는 $22.5 < I < 24.5$의 은하들)까지 효과적으로 관측함으로써, 한 은하단 내 은하 표본 숫자를 크게(~150개) 늘릴 수 있다. 초기 GMT는 8m급 거울 4장을 이용할 예정인데(최종적으로는 7장), 이는 현재 8m 망원경의 집광력을 4배 높임으로써 같은 노출시간에 현재보다 1.5등급 더 어두운 은하들을 관측할 수 있다.

둘째로 GMACS를 이용한 분광관측이 근적외선까지(1.3μm) 가능해지면, 적색이동 결정에 중요한 스펙트럼의 특징들인 [OII] 3727 방출선이나, Ca H&K 흡수선 또는 4000Å break들을 적색 이동 2에 있는 은하들까지 관측할 수 있다. 즉 적색 이동 2 미만의 모든 은하에 대해 동일한 스펙트럼 특징들을 이용해서 적색이동을 손쉽게 결정할 수 있다.

셋째로 GMACS가 30제곱각분(예: 4×8각분의 mask) 정도의 시야를 갖추게 되면, 이것은 적색이동 1.5에서 공변 각거리 4-7h^{-1}Mpc에 해당한다. 그렇다면 은하들이 은하단 안쪽으로 끌려가고 있는 지역, 즉 은하단의 낙하지역(1-3$R_{vir,cl}$[1])까

1 $R_{vir,cl}$은 은하단의 비리얼 반경을 의미하고, 보통 1.5h^{-1}Mpc에 해당한다.

지 한꺼번에 관측할 수 있어서 은하들이 은하단 중심과 그 이외 지역에서 겪는 환경 의존성을 살펴보는 데 큰 도움이 될 것이다.

3) 국내외 연구 동향

적색이동 0.5 이상 은하단에 대해서 기존의 체계적인 분광관측 탐사 연구를 정리하면 표 1과 같다. 대부분이 적색이동 1.5 미만인 은하단을 관측하고 있고, 그것도 한 은하단당 10-40개의 구성원 은하만을 확보한 상태이다. 따라서 기존 탐사는 주로 은하단 적색이동을 분광학적으로 확인하는 작업에서 그치거나, 여러 은하단에 속한 은하들을 하나로 합쳐서 은하 특성을 분석할 수밖에 없는 한계가 있었다. 특히 GCLASS나 ISCS 같은 탐사는 분광분해능이 매우 작아서 (R < 500) 은하의 속도 측정 오차가 꽤 크다. 따라서 은하들의 속도 자료로부터 얻어지는 은하단의 속도 분산 및 질량 측정 오차 또한 클 수밖에 없었다. 적색이동 1.5 이상에서 분광관측으로 확인된 은하단이 몇 개 존재하긴 하나(예: Gobat 등 2013; Newman 등 2014), 자료가 불균일하고, 체계적인 탐사 연구가 진행되어 있지 않다.

표 1. 기존의 체계적인 고적색이동 은하단 분광탐사

이름	EDisCS	ISCS	GCLASS	MaDCoWS
적색이동 구간	0.5 < z < 1.0	1.0 < z < 1.5	0.8 < z < 1.3	0.7 < z < 1.3
은하단 개수	10	16	10	19
한 은하단당 관측 은하 개수	~45	~30	~130	~30
한 은하단당 구성원 은하 개수	~20	~20	~45	~10
관측 은하 등급 범위	19.5 < I < 23.0	15 < 3.6μm < 18.5	15 < 3.6μm < 21	19.0 < z < 22.5
망원경 기기/분해능(R)	VLT FORS2/R~1000	KECK LRIS/R~900 HST WFC3/R~130	Gemini-N and S GMOS/R~440	KECK DEIMOS/R~2000 Gemini-N GMOS/R~1900
참고문헌	White 등 (2005)	Eisenhardt 등 (2008); Brodwin 등 (2013)	Muzzin 등 (2012)	Stanford 등 (2014)

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

본 연구는 적색이동 구간 1과 2 사이에 위치한 20개 은하단에 대해서 체계적인 분광관측을 수행할 계획이다. 관측할 은하단은 적외선 자료(예: UKIDSS, WISE)나 X-선 탐사 자료(예: eROSITA), 또는 Sunyaev-Zeldovich 효과를 이용한 극초단파 자료 등 다파장 자료를 이용해서 선정할 것이다(예: Kang & Im 2009; Kim 등 2011; Williamson 등 2011). 통계적으로 편향되지 않은 은하단 표본을 얻기 위해서 관측할 은하단의 질량 및 적색이동이 골고루 분포되게 선정할 것이다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 탐사는 다중분광관측이 가능한 GMACS를 이용해 관측하고자 한다. 은하단 내 믿을 만한 질량 분포 모양과 통계적으로 유의미한 은하단 은하들의 표본을 얻기 위해서, 한 은하단에서 최소한 150개의 구성원 은하($3_{Rvir,cl}$ 이내에서)를 얻는 것을 목표로 한다(Rines 등 2013). 은하단 모의실험에 따르면, 100개의 구성원 은하를 가지고 은하단의 질량 분포를 구했을 때 본래 은하단 질량 분포에 대해서 약 20% 정도 일정한 차이를 보이는데, 200개의 구성원 은하를 가지고 질량 분포를 구했을 때는 이 일정한 차이가 사라진다(Serra 등 2011). 관측된 은하들 중에서 은하단 구성원 은하로 판명될 확률을 약 40%라고 가정하면(Muzzin 등 2012), 한 은하단당 380개 정도의 은하를 관측해야 한다. GMACS의 시야를 직경 30제곱각분이라고 하고(예: 4×8각분의 mask), 한 번에 관측할 수 있는 슬릿의 개수가 100개라고 하면, 한 은하단당 4번의 관측을 해야 한다. 한 은하단에서 mask 4개를 적절히 배치해서 은하단 중심으로부터 약 8각분 떨어져 있는 은하들까지 관측한다고 가정하면, 이것은 적색이동 1.5에서 공변 각거리 ~$7h^{-1}$Mpc에 해당한다. 즉 은하단의 낙하지역($1\text{-}3R_{vir,cl}$)까지 충분히 관측하는 것으로써 은하단 중심과 그 이외 지역 은하들의 환경 의존성을 살펴보는 데도 도움이 될 것이다.

은하단의 속도 분산이 수백 km s^{-1} 내외이므로 은하들의 속도 측정은 최소한 100km s^{-1} 이내가 되어야 한다. 따라서 R~1500 이상의 분광분해능이 필요하다. 은하들의 속도 측정과 방출선 및 흡수선 등가폭 측정 등의 분석을 위해서는 픽셀당 신호대잡음비(S/N_pixel, continuum) 10 이상의 스펙트럼이 필요하다. 본 연

구 과제의 주 관측 후보인 적색 이동 1과 2 사이에 있는 은하들의 겉보기등급은 22.5 < I < 24.5인데, 이 신호대잡음비 조건을 만족하기 위해서는 최소 2시간 노출이 필요하다(4장 거울과 타원은하를 가정해서 GMACS 노출시간 계산기로 계산했을 때). 따라서 한 은하단당 8시간 관측이 필요하고, 20개의 은하단의 경우 총 160시간, 약 16일이 필요하다.

적색이동 측정은 각 은하의 스펙트럼을 이미 알려진 천체의 스펙트럼 원형과 비교해서 구할 것이다. 주로 이용하게 될 스펙트럼의 특징들은 UV 파장대의 금속 흡수선들 또는 [OII] 3727 방출선, Ca H&K 흡수선, 4000Å break이다. 분광관측 파장대가 근적외선 1.3μm까지 확장된다면 이런 스펙트럼의 특징들을 적색이동 2에 있는 은하들까지 모두 관측할 수 있어서, 적색이동 2 미만의 모든 은하에 대해 동일한 스펙트럼 특징들을 이용해서 적색이동을 손쉽게 결정할 수 있다.

4. 연구 결과의 기대 성과

은하단의 질량을 시간의 함수로 정확히 측정하는 것은 우주거대구조 형성에서 암흑물질과 암흑에너지의 역할을 이해하는 데에 중요한 역할을 한다. 향후 몇 년 안에 X-선 및 극초단파를 이용한 은하단 찾기 탐사가 본격적으로 실시되면(그림 3), 적색이동 1과 2 사이의 많은 은하단들이 찾아질 것으로 예상되고, 이 고적색이동 은하단들은 우주론과 은하 진화 연구에 중요한 표본이 될 것이다. 본 연구에서는 고적색이동의 은하단 은하들을 분광관측하고, 그 은하들의 운동학적 분석을 통해서 은하단 질량을 측정할 것이다. 기존 연구에서 한 은하단 내 구성원 은하가 10-40개이던 것을 약 150개로 확장함으로써 은하단 질량 측정 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대한다. 또한 처음으로 적색이동 1과 2 사이의 은하단에 대해서 은하단 반경에 따른 질량 분포를 측정하는 것이 가능할 것이다. 이 측정값들을 모의실험의 예측과 비교함으로써 우주론 모형을 검증할 수 있을 것으로 기대한다. 또한 다른 파장대(X-선, 극초단파)에서 측정하는 질량과 비교함으로써 각 질량 측정 방법을 개선하거나 그 차이에 대해 물리적으로 새로운 해석을 이끌어낼 수 있을 것이다.

한편 적색이동 1과 2 사이에서 서로 다른 질량을 갖는 은하단들을 관측함으로

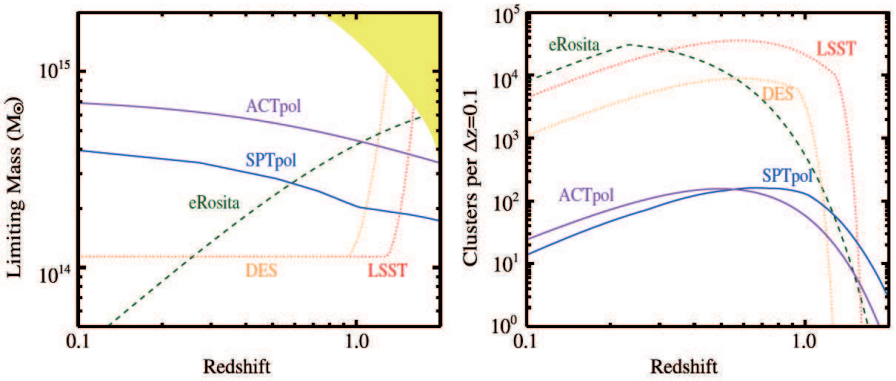

그림 3. 향후 몇 년 안에 실행될 여러 은하단 찾기 탐사의 예상 그림(Weinberg 등 2013에서 발췌). (왼쪽) 적색이동에 따른 은하단 질량 한계. (오른쪽) 적색 이동에 따른 은하단 예상 개수.

써 은하들이 은하단 내에서 겪는 환경 효과를 시간과 은하단 질량의 함수로 살펴볼 수 있을 것이다. 이것은 은하 진화 모형에 중요한 제한조건으로 사용될 수 있는데, 본 연구와 같은 체계적인 탐사에 의해서만 가능하다. 또한 이 체계적인 분광관측 자료는 고적색이동 은하를 연구하는 데 좋은 기초자료를 제공해 줄 것으로 기대한다.

5. 인용문헌

Allen S. W. et al. 2011, ARA&A, 49, 409
Behroozi, P. S. et al. 2013, ApJ, 770, 57
Brodwin, M. et al. 2013, ApJ, 779, 138
Eisenhardt, P. et al. 2008, ApJ, 684, 905
Gobat, R. et al. 2013, ApJ, 776, 9
Kang, E. & Im, M. 2009, ApJ, 691, L33
Kim, J. -W. et al. 2011, MNRAS, 410, 241
Muzzin, A. et al. 2012, ApJ, 746, 188
Navarro, J. F. et al. 1997, ApJ, 490, 493
Newman, A. et al. 2014, ApJ, 788, 51
Okabe, N. et al. 2010, PASJ, 62, 811
Park, C., & Hwang, H. S. 2009, ApJ, 699, 1595
Rines, K. et al. 2013, ApJ, 767, 15

Serra, A. L. et al. 2011, MNRAS, 412, 800
Stanford, S. A. et al. 2014, ApJS, 213, 25
Umetsu, K. et al. 2011, ApJ, 729, 127
White, S. D. M. et al. 2005, A&A, 444, 365
Williamson, R. et al. 2011, ApJ, 738, 139
Weinberg, D. et al. 2013, PhR, 530, 87
Zeimann, G. R. et al. 2013, ApJ, 779, 137
Zwicky, F. 1933, Helv. Phys. Acta 6, 110