

13

파울리 배타 원리

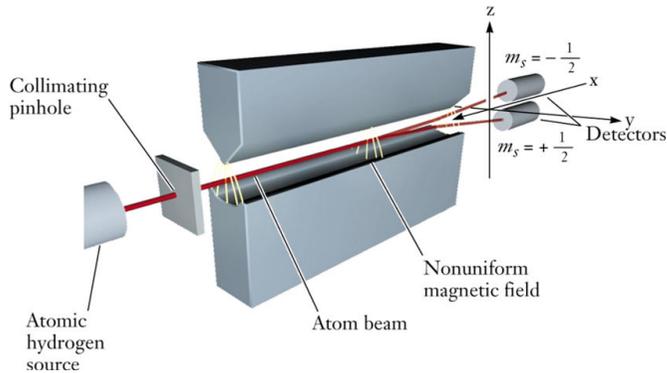
훌륭한 주장은 훌륭한 증명이 수반되어야 한다.

- 칼 세이건 -

■ 비정상 제만 효과 실험

다른 물리적 영향을 받지 않는 고립된 원자는 오로지 주양자수(n)에 의해 에너지 준위가 결정된다. 그러나 다른 물리적 영향을 받으면, 오비탈 양자수, 자기 양자수 등이 나타나며, 아직 설명되지 않은 스핀 양자수(spin quantum number, $s=\pm 1/2$)에 의해 에너지를 결정하게 된다. 정상 제만 효과 이론 및 증명 실험은 보어-쑤머펠트 궤도 이론의 성공적인 뒷받침이 되었다. 슈테른-겔라흐 실험에서 자기장에 의한 제만 효과가 실제로는 더 많은 수로 분리되거나 그 간격이 기대한 것과 달라지는 비정상 제만 효과가 나타났다. 이에 관한 설명을 위해서는 전자의 자전이라는 개념이 필요했으며, 이는 가우드스밋(Samuel Goudsmit, 1902-1978)와 울렌베크(George Uhlenbeck, 1900-1988)가 제안한 전자의 스핀이라는 새로운 개념을 이용하였다.

고 전론에
서는 전자의 공간
적인 구조를 가지
지 않는 점 입자로
이해하고 있었기에
전자의 스핀이라는
이해는 없었다. 이
는 양자역학에 상



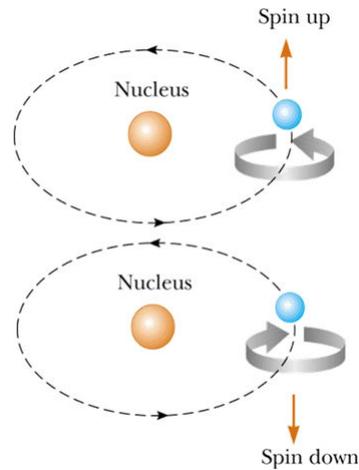
슈테른-겔라흐의 스핀 양자화 관측 실험

대성이론이 결합된 결과물로 추가적인 회전 분리를 해석하기 위해 태양계내 행성의 자전-공전 모델을 차용한 것이다. 스핀은 구체의 자전과 같은 현상을 보일 뿐이지 미시적으로는 입자가 어떤 축을 중심으로 회전하고 있다는 것을 의미하지는 않는다. 즉 편의상 자전이라는 개념을 도입한 것이라고 할 수 있다.

■ 제4의 양자수

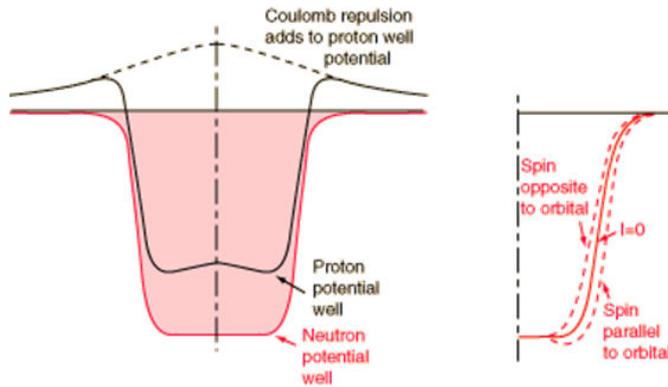
쥘머펠트의 학생인 파울리(Wolfgang Pauli, 1900-1958)는 슈테른-겔라흐의 실험에서 숨어 있는 어떤 회전(rotation) 효과가 비정상 제만을 일으키는 여분의 각운동량을 만들 것이라고 생각했다. 스핀에는 2가지 회전 방향이 존재한다고 보았다. 업스핀(up-spin, \uparrow)은 $s=1/2$ 이며 공전 방향과 일치한 것으로 가정하였고, 다운스핀(down-spin, \downarrow)은 $s=1/2$ 이며 공전과 자전의 방향이 서로 반대이다. 당연히 두 스핀

은 공전-자전 방향의 차이로 인해 약간의 에너지 준위차이가 나타나며, 이로 인해 비정상 제만 효과가 나타나게 된다고 보았다.



[두가지 스핀 종류]

스핀으로 인한 스핀운동량(S)은 $1/2\hbar$ 로서 이 또한 양자조건을 만족시킨다. 두 스핀의 미소한 에너지 차이는 에너지우물(potential well) 모델로 쉽게 표현할 수 있다. 업스핀은 공전방향과 같기 때문에 다운스핀보다 더 적은 에너지를 필요로 하게 되어, 에너지 준위가 더 높게 나타난다. 자기장이 인가되지 않았다면, 자기 양자수와 함께 스핀 양자수는 하나의 에너지 준위로 귀결된다.

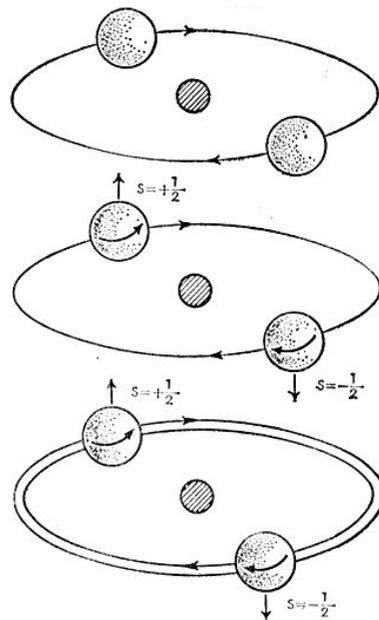


[스핀 양자의 에너지 준위 차이]

초기의 스핀 궤도 모형은 3개 이상의 전자는 동일 궤도상에 있을 수 없다고 보았으나, 추후 동일 궤도 상의 두 전자는 반드시 서로 반대 스핀을 갖는다고 스핀 모형을 수정하였다. 또다시 수정된 파울리 모델에서는 전자의 자기모멘트에 의해서 생기는 두 궤도는 동일하지 않고 각 궤도에는 한 개의 전자만이 허용된다고 설명하였다. 스

핀 양자수를 설명하는 과정에서 그는 파울리 배타원리(exclusion principle)라는 유명한 개념을 이끌어 냈다. 이는 전자궤도의 전자채움(electron filling)의 근본 원리로 이용된다. 이로서 공간의 양자화가 성립하게 되어, 전자가 바닥 상태로 곧장 가지 않고 공간상에 배치되는 이유를 설명할 수 있게 되었다.

한 오비탈의 두 개의 전자를 같은 궤도에 두지 않는 것은 두 입자가 동시에 같은 위치, 같은 시간에 같은 상태로 있을 수 없다는 페르미온



[파울리 스핀의 변천사]

(Fermion)의 성질 때문이다. 페르미(Fermi) 입자라고도 하는 페르미온

| Quantum number | Notation | Range | Remarks | Energy | Note |
|---------------------|----------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|------|
| Principle | n | 1, 2, 3, ... | Radius of orbit | Atomic energy level | |
| Orbital (Azimuthal) | l | 0, 1, 2, ..., (n-1) | Shape of orbit | Angular momentum | |
| Magnetic | m_l, m | 0, $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ | Orientation of orbit | Z component of l | |
| Spin | m_s, s | +1/2 or -1/2 | Rotation of electron | Spin angular momentum | |

[4가지 양자수의 특성 정리]

은 우주를 구성하는 물질로서 전자, 양성자, 중성자, 중간자 등이 이에 해당하며, 스핀 양장수가 반정수(+1/2)인 집단이다. 페르미온 간의 작용력(4대 힘 : 중력, 전자기력, 약력, 강력)에 기여하는 매개입자를 보손(Boson)이라고 하며, 중력자(graviton), 광자(photon), 글루온(gluon) 등이 있다. 보손은 보스(Satyendra Bose, 1894-1974)-아인슈타인의 통계학을 만족시킨다. 힘의 입자는 보손이 되고, 실제 구성하는 입자는 페르미온이 된다. 따라서 입자를 구성하기 위해서는 전자는 페르미온 성질이 적용되는 배타원리에 의해 채워져야 하며, 그들의 힘이 미치기 위해서는 보손 형태로 발생한다고 할 수 있다.

■ 전자배치 원리

오비탈에 전자를 채워가는 원리는 파울리 배타원리를 비롯한 3가지 규칙을 따른다. 첫 번째 쌓임원리(Aufbau, buildng-up principle)라는 것으로, 전자는 하나에 한번씩 낮은 에너지의 오비탈을 먼저 채운다는 것이다. 즉 $1s \rightarrow 2s \rightarrow 2p \rightarrow 3s \rightarrow 3p \rightarrow 4s \rightarrow 3d \rightarrow 4p \rightarrow 5s \rightarrow 4d \rightarrow 5p$ 순서의 낮은 에너지 준위부터 채워 나간다. 두 번째는 파울리 배타원리로, 한 오비탈에는 최대 두 개의 전자만을 채울 수 있으며, 채워진 두 전자의 스핀은 서로 반대 방향이어야 한다는 것이다. 이는 ($\uparrow \downarrow$)로 표시한다. 마지막은 훈트(Friedrich Hund, 1896-1997)의 규칙으로 동일 에너지의 오비탈을 모두 채운 후에는 최대 비공유전자를 만든 후에 반대 스핀 전자를 채운다는 것이다. 즉 산소의 경우, $2p_x, 2p_y, 2p_z$ 에 각

각 1개씩의 업스핀을 모두 채운 다음에 남은 한 개의 전자를 $2p_x$ 에 다운스핀으로 채운다. 전자배치 원리들은 주기율표 완성에 크나큰 기여를 하였다.

| Shell | Subshell | Number of Electrons in Filled Subshell | Number of Electrons in Filled Shell |
|---------------|---------------|--|-------------------------------------|
| K ($n = 1$) | $s(\ell = 0)$ | 2 | 2 |
| L ($n = 2$) | $s(\ell = 0)$ | 2 | 8 |
| | $p(\ell = 1)$ | 6 | |
| M ($n = 3$) | $s(\ell = 0)$ | 2 | 18 |
| | $p(\ell = 1)$ | 6 | |
| | $d(\ell = 2)$ | 10 | |
| N ($n = 4$) | $s(\ell = 0)$ | 2 | 32 |
| | $p(\ell = 1)$ | 6 | |
| | $d(\ell = 2)$ | 10 | |
| | $f(\ell = 3)$ | 14 | |

전자배치

|원자껍질내 채운 전자수|

원리로 원자껍질(shell)을 채우다 보면, 각 껍질이 포함하고 있는 총 전자의 개수가 2, 8, 18, 32로 $2n^2$ 이 됨을 알 수 있다. 이들을 매직넘버(magic number)라고 칭한다.

■ 초기 주기율표

보어의 개념과 파울리 배타원리 등을 이용하여 현재의 주기율표를 완성할 수 있다. 주기율표는 원자들간이 특성상 유사한 것들을 동일 족에 배열한 것으로, 이러한 시도는 1817년 되베르너(Johann Dobereiner, 1780-1849)에 의한 3배열(3화음, triad)에서도 찾을 수 있다. 그는 (Li, Na, K), (Ca, Sr, Ba), (S, Se, Te), (Cl, Br, I) 등 4가지 3화음을 정리하였다.

| Dobereiner's triads | | Known to Mendeleev | | Unknown to Mendeleev | | | | | | |
|---------------------|-------------|--------------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| H 1.01 | | | | | | | | | | |
| He 4.00 | Li 6.94 | Be 9.01 | B 10.8 | C 12.0 | N 14.0 | O 16.0 | F 19.0 | | | |
| Ne 20.2 | Na 23.0 | Mg 24.3 | Al 27.0 | Si 28.1 | P 31.0 | S 32.1 | Cl 35.5 | | | |
| Ar 40.0 | K 39.1 | Ca 40.1 | Sc 45.0 | Ti 47.9 | V 50.9 | Cr 52.0 | Mn 54.9 | Fe 55.9 | Co 58.9 | Ni 58.7 |
| | Cu 63.5 | Zn 65.4 | Ga 69.7 | Ge 72.6 | As 74.9 | Se 79.0 | Br 79.9 | | | |
| Kr 83.8 | Rb 85.5 | Sr 87.6 | Y 88.9 | Zr 91.2 | Nb 92.9 | Mo 95.9 | Tc (99) | Ru 101 | Rh 103 | Pd 106 |
| | Ag 108 | Cd 112 | In 115 | Sn 119 | Sb 122 | Te 128 | I 127 | | | |
| Xe 131 | Ce 133 | Ba 137 | La 139 | Hf 179 | Ta 181 | W 184 | Re 180 | Os 194 | Ir 192 | Pt 195 |
| | Au 197 | Hg 201 | Tl 204 | Pb 207 | Bi 209 | Po (210) | At (210) | | | |
| Rn (222) | Fr (223) | Ra (226) | Ac (227) | Th 232 | Pa (231) | U 238 | | | | |

[도베르너의 3배열과 멘델레예프 전후의 주기율표]

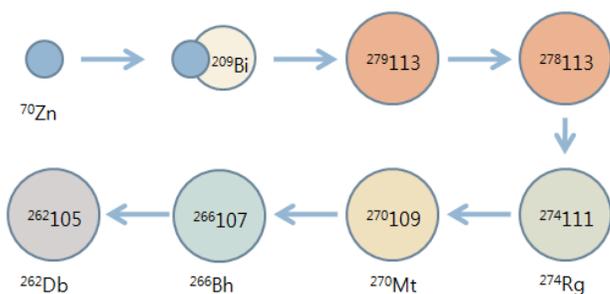
멘델레예프(Dmitri Mendeleev, 1834-1907)는 현대형 주기율표를 만든 최초의 인물로, 당시 발견되지 않았던 18족(8족) 원소들이 빠져 있다는 차이가 있다. 당시의 기술로는 비활성 기체들인 8족 원소들을 발견하기가 쉽지 않았을 것이다. 멘델레예프의 주기율표는 원자량 순서로 배열한 것으로 5쌍의 원자들(Ar-K, Co-Ni, Te-I, Th-Pa, U-Np)이 서로 잘못 배열되어 있었다. 즉 현대 주기율표는 단순히 원자량의 크기로 배열한 것이 아니라 전자의 수로 배열하고 있다.

멘델레예프 이후에 발견된 원소들 중 상당부분은 인공적으로 만들어진 원소로서 현대의 연금술이라고 할 수 있는 입자가속기를 이용한 것들이다. 페르미 국립연구소의 테바트론(Tevatron)이라는 강입자 가속기가 대표적인 시설이다. 원자번호 112~118번(117번 제외)까지는 1996년부터 최근까지 인공으로 제조된 물질로 아직 원자명을 확정되지 않았다. ^{112}Uub 는 우눈븀(ununbium), ^{113}Uut 는 우눈트륨



|강입자 가속기|

(ununtrium) 등과 같이 IUPAC에서는 우
 nun(unun-)는 임시적인 접두사를 붙여서 표
 기하고 있다. 117번 우넨셉튬(^{117}Uus ,
 ununseptium)은 2006년까지 발견되지 않
 은 원소이다. 기존에 존재하는 서로 다른
 금속 성분을 충돌시켜서 만드는 인공적으

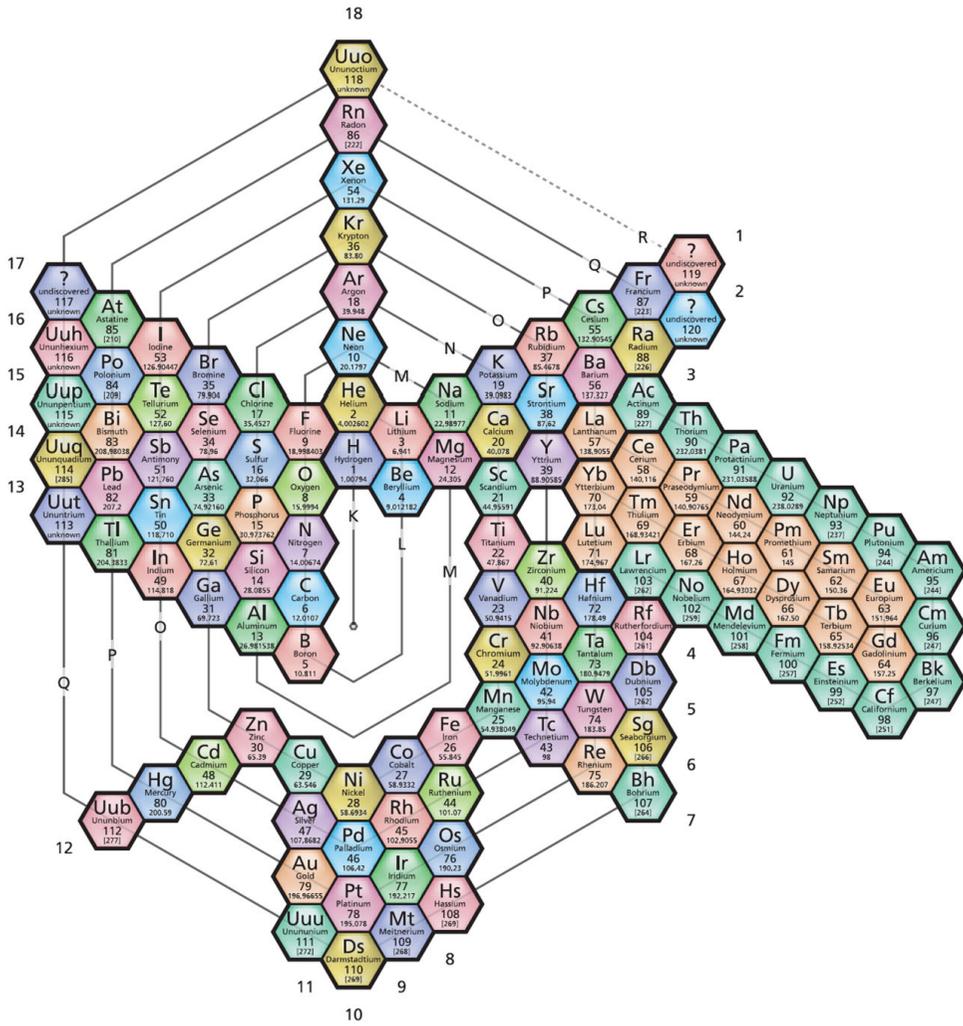


|Zn와 Bi의 충돌로 113번 원소의 합성 과정|

로 합성된 물질들은
 불안정하여 자연상에
 존재하는 시간 자체가
 짧으며, 결국에는 보다
 안정적인 물질로 귀결
 된다.

멘델레예프의 주

기율표에 준하여 만들어진 격자모양의 현대 주기율표 이외에도 다양
 한 형태의 주기율표가 존재한다. 주기율표는 원소의 화학적 특성들의
 유사성에 준하여 배열한 것 뿐이며, 또다른 특징들이 발견되거나 새
 로운 주장이 나타난다면 충분히 바뀔 수 있는 가변성을 지닌 배열판
 이다. 즉 현재의 주기율표가 진리가 아님을 명심해야 한다.



회전체 형태로 나타낸 spiralperiodic.com의 주기율표

■ 등장인물 살펴보기



사무엘 가우드스밋(Samuel Goudsmit, 1902-1978)

독일계 미국의 물리학자이다. 울렌베크와 함께 전자스핀의 개념을 제안한 것으로 유명하다. 맨해튼 프로젝트에 참여하기도 하였다. 전후 노스웨스턴 대학의 교수로 제직하면서 여러 물리학회지의 편집장을 역임하였다. 또한 입트학에도 기여를 하였다.



조지 울렌베크(George Uhlenbeck, 1900-1988)

독일계 미국의 물리학자이다. 가우드스밋과 함께 전자스핀의 개념을 이끌어 냈으며, 이 공로로 1964년 막스 플랑크 메달을 수상하였다. 그의 또다른 업적으로는 유체내 입자의 브라운 운동이 마찰력에 어떻게 영향을 받는지에 관한 연구도 수행하였다.



울프강 파울리(Wolfgang Pauli, 1900-1958)

오스트리아의 이론물리학자이다. 쪼머펠트의 제자였으며, 스핀이론과 전자의 파울리 배타원리로 유명하다. 배타원리에 관한 아인슈타인의 의견으로 1945년 노벨 물리학상을 받는다. 스핀 궤도 모형을 도입하여 비정상 제만 효과의 원인을 규명하기도 하였다.



프레드릭 훈트(Friedrich Hund, 1896-1997)

독일의 물리학자이다. 원자와 분자에 관한 선구적인 업적을 남겼다. 원자내 전자배치의 3대원리인 훈트의 규칙을 만들어 오비탈내 전자배열을 정립하였다. 그는 막스 보른(Born)의 조교였으며, 분자의 스펙트럼을 양자역학적으로 해석하는데 기여하였다.



새텐드라 보스(Satyendra Bose, 1894-1974)

인도의 수리물리학자이다. 1920년대 초반에 보스-아인슈타인 통계학을 이용한 양자역학을 정립하는데 기여를 하였으며, 그의 업적을 길이기 위해 힘의 매개입자를 보손(Boson)이라고 명명하였다. 노벨상을 직접 받는 못했지만 최근까지도 노벨상에 보손의 개념이 등장하고 있다.



요한 되베르너(Johann Dobereiner, 1780-1849)

독일의 화학자이다. 화학원소에 관한 선구적인 주기율 규칙을 찾아난데 큰 기여를 하였다. 3가지 원소들의 묶음인 4개의 triad를 정의하였다. 이는 1, 2, 6, 7족에 해당하는 원소들의 배열이었다. 또한 푸르푸랄(furfural)을 발견하였으며, 백금을 이용한 촉매 연구도 수행하였다.



드미트리 멘델레예프(Dmitri Mendeleev, 1834-1907)

러시아의 화학자이다. 주기율표를 최초로 작성한 사람 중 일인으로 알려져 있다. 1869년 러시아학회에서 주기율표에 관한 논문을 최초로 공식 발표한다. 주기율표에 의해 아직 발견되지 않은 원소들의 성질까지도 예측할 수 있다고 주장하였다. 101번째는 그의 이름을 딴 Md이다.

