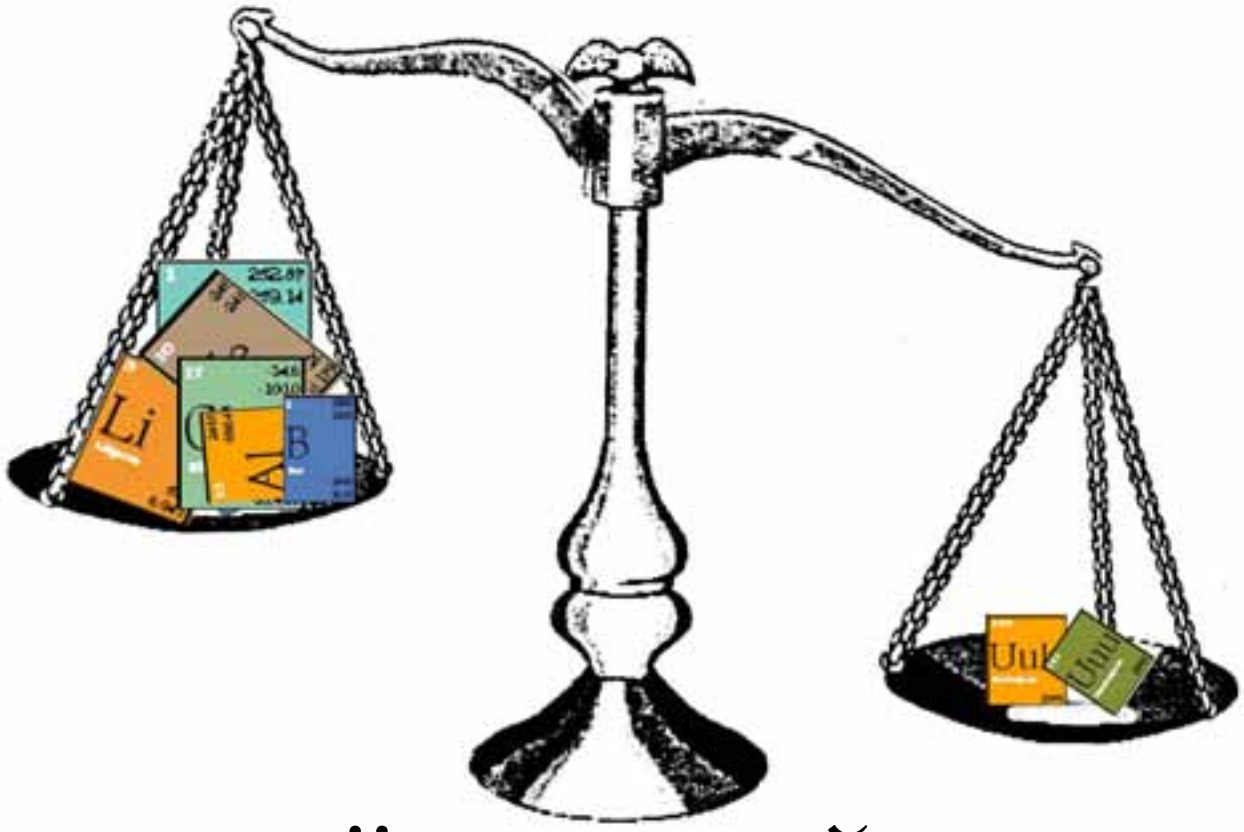




SÜPERAĞIR ELEMENTLER

Elementlerin periyodik tablosu giderek genişliyor. Bir zamanlar yalnızca, hidrojenle başlayıp uranyumla son bulan ve doğal olarak varolan 83 element içeriyordu. Bu elementlerin yarılanma ömürleri, Dünya'nın yaşı olan yaklaşık 4,5 milyar yıl kadardır. Ancak, 1940'lardan bu yana fizikçiler kararlı olmayan elementler üretebiliyorlar. Bunlar saniyenin küçük bir kesrinden, binlerce yıla uzanan sürelerde daha hafif elementlere bozunuyorlar. Geçen yıl, bilinen toplam 114 element vardı. Bu yılın başlarında, iki yeni süper ağır elementin daha sentezi bildirildi.

Ancak fiziğin bu dalı, giderek daha ağır elementler yaratmaktan başka şeyler de yapıyor. Resmen adları bile konmamış bu yeni elementlerin 'davranışlarını' anlamak da çok önemli. Süper ağır elementler, çekirdek fizikçilerinin "sihirli sayılar" ve "kararlılık adaları" gibi kavramları araştırmalarına izin veriyor; bazı çekirdeklerin ötekilerden daha kararlı olduğunu anlamamıza yardımcı oluyorlar. Ayrıca, bu elementler farklı çekirdek modellerine ilişkin öngörülerini sınamada kullanılabildikleri için, sonunda doğanın neden sonlu sayıda element içerdiğini anlamada da bize yardımcı olabilirler.

Elementlerin sayıları

Her fizik öğrencisi, yalnızca bir protonu olan hidrojen dışında, çekirdeğin kabaca aynı sayıda proton ve nötron içerdiğini bilir. Bir element farklı birkaç izotop olarak var olabilir : örneğin karbon-12, altı proton ve altı nötron içerir ve kararlıdır; oysa karbon-14, altı proton ve sekiz nötron içerir, yarılanma ömrü 5730 yıldır. Çekirdeği tanımlamak için farklı sayılar kullanılır: Atom sayısı Z , protonların sayısını verir; kütle sayısıysa, atom sayısı ve nötron sayısının toplamı olan N 'dir.

Ağır elementler aynı zamanda, daha fazla nötron içermeye yatkın gibiler. Örneğin, kurşunun en kararlı izotopunda 82 proton ve 126 nötron vardır. Ancak kararlı bir çekirdeğe bir ya da daha fazla nötron ekler ya da ondan nötron çıkarırsak, çekirdek kararsız duruma geçerek radyoaktif bozunma uğrayabilir.

Çekirdekler farklı yollarla bozunurlar: alfa bozunumunda çekirdek, bir alfa parçası (yani, iki proton ve iki nötron içeren bir helyum çekirdeği) salar; beta bozunumundaysa bir nötron bir protona bozunur ve bu süreçte bir elektron, bir de anti-nötri-

no salar. Bir ağır çekirdek, kendiliğinden parçalanma (fisyon) denen bir reaksiyonla iki parçaya ayrışabilir. Bu, ilk kez 1940'ta Georgy Flerov ve Konstantin Petrzhak tarafından, uranyum-238 çekirdeğinde gözlemlenmişti.

Çekirdek parçalanması Niels Bohr ve John Wheeler'ı, çekirdeği, yapısı olmayan, yüklü bir sıvı damlası olarak ele alan "sıvı damlası" modelini önermeye yöneltti. Damlanın yüzey gerilim kuvveti protonların yol açtığı Coulomb itme kuvvetinden fazla olduğu sürece, bir potansiyel enerji engeli parçalanmayı önler. Ancak, bu engel aşılabılır de: Çekirdeğe yeterince enerji verilmesiyle, ya da çekirdeğin kendisinin 'tünelleme' denilen kaçıışı başarmasıyla.

Atom sayısı 92 olan uranyum-238 çekirdeği için parçalanma sınırı 6 MeV dolayındadır. Bu da 10^{16} (on katrilyon) yıllık bir yarılanma ömrüne yol açar. Ancak, atom sayısı büyüdükçe, potansiyel engel giderek küçülür ve sonunda yok olarak, en ağır çekirdeklerin yaklaşık 10^{-19} saniyede (saniyenin milyar kere milyarda biri) bozunmasına neden olur. Bohr ve Wheeler'e göre atom sayısı 106'ya ulaştığında, potansiyel engel tümüyle ortadan kalkar.

Plütonyum, kúriyum ve kaliforniyum gibi ilk “uranyum-ötesi” (transuranium) elementlerin ömürleri, sıvı-damlası modeliyle öngörülen değerlere çok yakındı. Ne var ki, 1962’de Dubna’daki Ortak Nükleer Araştırma Enstitüsü (Joint Institute for Nuclear Research-JINR) araştırmacıları çok düşük uyarılma enerjileri olan uranyum-ötesi elementlerin birçok izotopunun 10^{-10} - 10^{-2} saniyede kendiliğinden parçalandıklarını keşfettiler. Bu, sıvı-damlası modeliyle öngörülen değerlerle tutarlı değildi. Dahası, model bu “izomerlerin” yarılanma ömürlerindeki farklılıkları da açıklayamıyordu.

Kısa süre sonra araştırmacılar, kendiliğinden parçalanma olasılığının, çekirdeğin iç yapısına bağlı olduğunu keşfettiler. Örneğin, deneysel olarak ölçülen çekirdek içi bağ enerjisi toplamının, sıvı-damlası modelinin öngördüklerinden düzenli biçimde saptığı biliniyordu. Bağlayıcı enerjiler belirli $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ proton sayıları ve $N = 2, 8, 20, 50, 82, 126$ nötron sayıları için en yüksek düzeydeydi: Proton ve nötronların bu ‘sihirli’ numaraları, “kapalı kabuk” olarak adlandırılır ve atom fizikindeki

elektron kabuklarına benzerler.

Bu gözlemler 1960’ların sonunda, çekirdek için yeni bir mikroskopik kuramla sonuçlandı. Bu kuram, çekirdekteki proton ve nötronların kapalı kabuklarının, çekirdeğin kararlı durumunun sıvı-damlası modelinin belirlediği sınırların ötesine (yani 106’dan büyük atom sayılarına) uzanmasına izin verdiğini gösteriyordu. Kabuk etkisinin sihirli $Z = 108$ ve $N = 162$ için özellikle güçlü olduğu, $Z = 114$ ve $N = 184$ için daha da güçlü olduğu görülmüyordu. Bu bölgelerin “kararlılık adaları” olarak adlandırılma nedeni, bu. Gerçekten de, $N = 184$ bölgesindeki süper ağır çekirdeklerin ömürlerinin, kabukların olmadığı duruma göre 30 kat daha uzun olabileceği öngörülmüyor. Deneysel çekirdek fizikçilere verilen mesaj açık: Kuramsal öngörülerini sınamak için süper ağır çekirdekler yapı niteliklerini ölçmeleri gerekiyordu.

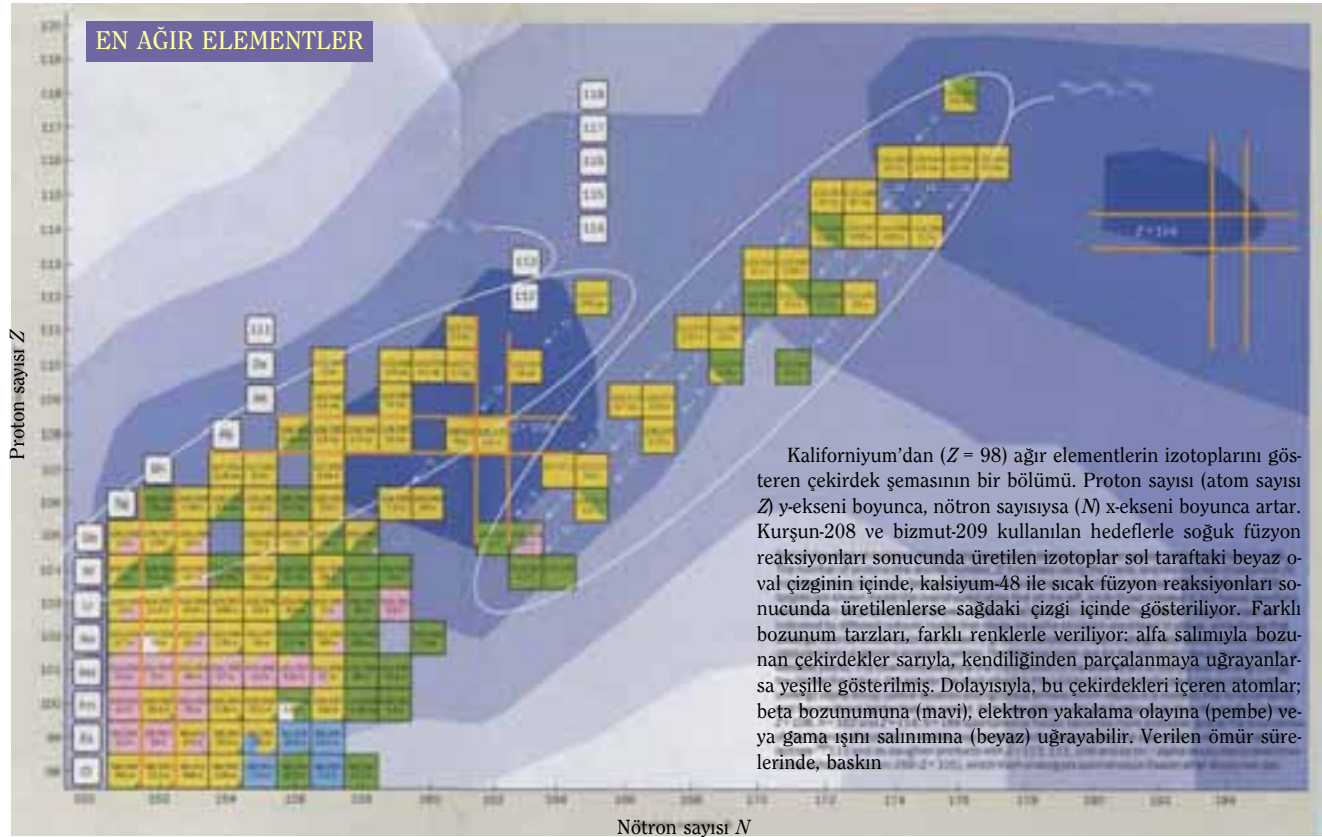
Sentez reaksiyonları

İlk uranyum-ötesi elementlerin sentezleri 1940 ile 1953 yılları arasında Lawren-

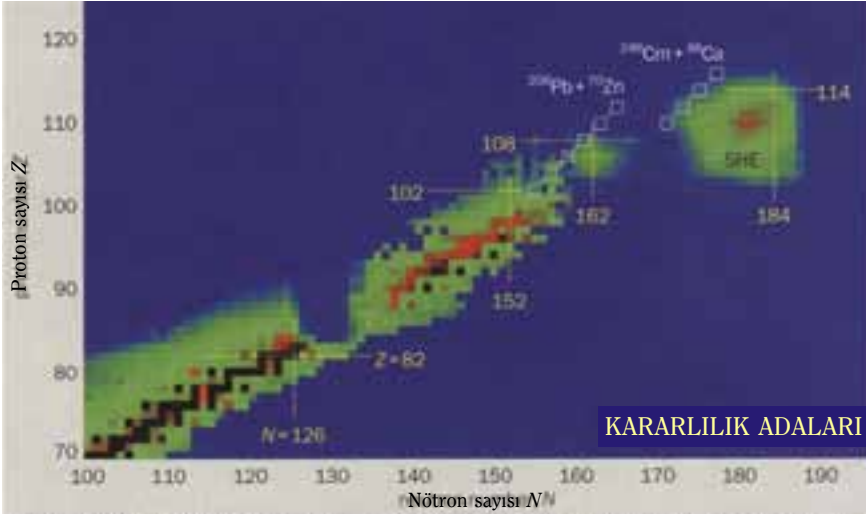
ce Berkeley Laboratuvarı’nda uygulanan nötron yakalama reaksiyonlarıyla gerçekleşti. Çekirdeklerin, yüksek-nötron-akısı üreten reaktörde uzun süre kalarak fazladan nötron kazandıkları bu deneylerde, atom numaraları 100’e (fermiyum) varan yeni elementler keşfedildi. Ancak, daha ağır çekirdekleri bu yöntemle araştırmak olanaksızdı; çünkü, onlar bir sonraki nötronu yakalamadan önce bozunuyorlardı.

Fermiyumdan daha ağır elementler elde etmek için araştırmacılar ağır-iyon reaksiyonlarını denediler. Bu yöntemle, biri ağır-iyon ışını demetinde, öteki hedefte olan iki çekirdek, birleşmeye (füzyona) zorlanıyor ve daha ağır bir “bileşik çekirdek” elde ediliyordu. Ancak, bu yaklaşımın bir sakıncası vardı: iyonların çarpışması, ortaya çıkan bileşik çekirdeğin çok uyarılmış bir durumda bıraktığı için, çekirdeğin hemen parçalanma olasılığı çok yüksekti. Ayrıca uyarılma enerjisi arttıkça, çekirdek kabuklarının kararlılık etkisi hızla azalıyordu.

106’dan büyük atom numaralarının araştırılması ancak 1974’te JINR’da soğuk



bozunma biçimi temel alınmış durumda (a, yılları gösteriyor). Mavi çizgiler, kabuk etkisinin çekirdeğin bağlanma enerjisine katkısını gösteriyor; renk koyulaştıkça kabuk etkisi de artıyor. Kapalı kabukların yakınında (koyu bölgeler) çekirdekler alfa bozunumuna uğruyorlar (sarı kareler ve açık mavi oklar). Bunun sonucu, ana çekirdekten 2 proton ve 2 nötron daha hafif bir yavru çekirdek. Yavru çekirdekler $Z = 108$, $N = 162$ ve $Z = 114$, $N = 184$ sihirli sayılarından uzaklaştıkça, kendiliğinden parçalanma olasılığı artıyor ve “kararlılık adaları”nın sınırlarındaki bir çekirdek, her iki tür bozunuma da uğrayabiliyor. $^{288}115$ izotopunu ve onun $Z = 113$, 111 , 109 , vb. gibi tek-tek olan yavru çekirdekleri için alfa bozunumu, dubnium-268 ($Z = 105$) izotopuna kadar baskın durumdadır. Bu da yaklaşık bir gün sonra kendiliğinden parçalanmaya uğrar.



The Bir çekirdeğin kararlılığı, çekirdek şemasından da anlaşılabilir gibi, içerdiği proton ve nötron sayısı ile yakından ilgilidir. Çekirdeklerin yarılanma ömürleri farklı renklerle gösteriliyor: Siyah kareler yerkabığında varolan kararlı elementleri, koyu mavi bölgelerde çekirdeklerin saniyenin milyonda birinden kısa ömürlü olduğu "kararsızlık denizini" gösteriyor. Kırmızıyla gösterilen çekirdekler, yeşil olanlarına göre daha uzun ömürlü. Klasik çekirdek kuramına göre, proton ve nötron sayısı arttıkça, çekirdeğin kararlılığında azalma eğilimi olur. Ancak mikroskopik kabuk modeline göre de, çekirdekler eğer 'sihirli' sayılarda proton ve nötron içerirlerse, çok daha uzun yaşayabilir ve $N = 162$ ve 184 civarında iki "kararlılık adası"na yol açarlar. Sarı çizgiler, kapalı çekirdek kabuklarına karşılık geliyor; yanlarında da sihirli proton ve nötron sayıları var. Yeni ağır elementlerin sentezlenmesi ve ardından bir dizi alfa bozunumu geçirmeleri, $Z = 112$ ve 116 (beyaz kareler) atom numaralarında olduğu gibi, bizim bu kararlılık adalarına yaklaşmamıza izin veriyor.

füzyon reaksiyonları denen yöntemin keşfiyle mümkün oldu. Bu reaksiyonlarda kurşun ve bismut gibi ağır iyonlar, kütle sayısı 40'tan büyük olan iyonlar fırlatılarak bombalanırlar. Fırlatılan iyonların kinetik enerjisi emilir ve elde edilen bileşim, çok daha az uyarılmış durumda olur.

1990'ların başlarında Darmstadt'taki (Almanya) GSI laboratuvarından Peter Armbruster, Sigurd Hofmann, Gottfried Münzenberg ve çalışma arkadaşları, soğuk füzyon yöntemiyle 107-112 elementlerini sentezlediler. Bu bilgi daha sonra Tokyo'daki RIKEN laboratuvarında Kosuke Morita ve ekibince doğrulandı; onlar da soğuk füzyon reaksiyonuyla 110 ve 111 elementlerini sentezlemişlerdi. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (International Union of Pure and Applied Chemistry-IUPAC) geçen yıl 110 elementine "darmstadtium" adının verilmesine karar verdi. Şimdi GSI ve RIKEN ekiplerinin ikisi de 113 ve daha yukarı elementleri sentezlemeyi planlıyorlar.

Süperagır elementler bölgesini tam olarak araştırmak için soğuk füzyon yönteminin bile sınırlı olduğu görülüyor. Bunun nedeni, ağır çekirdeklerin birleşmeye direnme eğilimi. Bu etki, fırlatılan iyonun elektrik yüküyle artar; yani, yeni element oluşturma olasılığı, bileşik çekirdeğin atom sayısının üssel bir fonksiyonu gibi azalır. Dahası, soğuk füzyon reaksiyonuyla üretilen bileşik çekirdek, görece az sayıda nötron içerir. Örneğin, 112 elementinin çekirdeğinde sonuçta 112 proton ve 165 nötron yer alır; yani, sihirli nötron sayısı $N = 184$ 'den 19 eksiktir.

Nötron sayısı daha büyük olan çekirdekler üretmek için bir yöntem de, reak-

siyonda 20 proton ve 28 nötron içeren ve az bulunan kalsiyum-48 izotopunu kullanmaktır. Bu reaksiyonlarda bileşik çekirdeğin uyarılma enerjisi, yaklaşık 30-40 MeV. Bu miktar kabuk etkilerini bastırabilir, etkiler yine de sonuçta elde edilen süperagır çekirdeğin gözlemlenmesine izin verecek ölçüde güçlüdür. Dahası, etkileşen iki çekirdek arasındaki büyük kütle farkı, birleşme olasılığını artırır.

Bu avantajlara karşın, 1977 ve 1985 yılları arasında kalsiyum-48 iyonları kullanılarak yeni elementler sentezleme girişimleri başarısızlıkla sonuçlandı. Ancak, gelişen deneysel teknikler ve yoğun kalsiyum iyon ışın demetlerinin daha kolay elde edilebilir olması, bu deneylerin duyarlılığını en az üç kat artırdı. Bu da, JINR ve ABD'deki Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı araştırmacılarından oluşan ekibin, süperagır elementler alanını daha derinden araştırmasına izin verdi.

Eğer kuram doğruysa, kararlılık adalarındaki elementlerin kendiliğinden parçalanma yoluyla bozunmamaları, onun yerine alfa bozunumuna uğramaları gerekir. Bu durumda bu elementler geride, belirgin bir deneysel imza bırakacaklardır: Ana çekirdekten iki proton ve iki nötron daha hafif bir yavru çekirdek, ardından da dört proton ve dört nötron daha hafif bir torun, vb. Bu nedenle ana çekirdeğin ürünleri, $Z = 114$ ve $N = 184$ sihirli sayılarından giderek uzaklaşırlar. Kendiliğinden parçalanmanın bozunum sürecine egemen olmaya başladığı sınır aşılınca kadar, bu uzaklaşma devam eder. Sentezlenen ağır çekirdek, bu ne-

denle, uzun bir alfa-bozunum zinciri oluşturmak için $N=184$ nötron kabuğuna olabildiğince yakın olmak zorundadır.

Kalsiyum doğal olarak çokça bulunan bir elementtir; ancak onun yalnızca % 0,19'u nötron bakımından zengin kalsiyum-48 biçimindedir. Bu özel izotopu elde etmek çok zaman gerektirdiği gibi, oldukça da pahalıdır (gramı 200.000 ABD doları civarında). Bu nedenle JINR'daki hızlandırıcı, yüksek ışık yoğunluklarının olabildiğince az kalsiyum-48 kullanılarak elde edilebileceği optimal duruma getirildi.

Ekip, hedef maddesi olarak plütonyum ($Z = 94$), amerikyum (95), küriyum (96) ve kaliforniyumun (98) nötronca zengin izotoplarını kullandı. Bunların hepsinin ömürleri uzundur. Bu izotoplarla kalsiyum-48 arasında gerçekleşen füzyon reaksiyonu bize atom sayıları 114 ile 118, nötron sayıları 172 ile 177 arasında olan elementler elde etme olanağı sunar. Yapay olarak üretilmiş bir element için olası en büyük nötron sayısı bu. Beş yıllık bir sürede 112-116 elementlerini ve 118 elementinin iki atomunu elde etmek için, toplam 14



Yuri Oganessian (yazar; solda oturan) ve meslektaşı Dubna'daki JINR laboratuvarında atom sayıları 118'e ulaşan elementler üreterek periyodik tablonun sınırlarını genişletiyorlar. Sağdaki resim, deneyde kullanılan manyetik ayırıcıyı gösteriyor. Ayırıcının işlevi, elementleri, oluştukları ağır hedeften (sağ altta) bir detektöre yöneltmek.

azaltır. Bu izotoptaki proton (115) ve nötron (173) sayıları tektir ve izotop oluşur oluşmaz daha hafif olan ağır elementlere bozunur. Örneğin, beş alfa parçacığı salındıktan sonra, geride dubnium deneni 105 elementi kalır.

Amerikyumun kullanıldığı hedefte oluşan ağır çekirdek yaklaşık 40 MeV'lik kinetik enerjiye sahiptir ve bir manyetik ayırıcının gaz dolu odasından hızla geçer. Ayırıcı, çekirdeğin bir detektöre yönlendirirken, kalsiyum çekirdeklerini ve istenmeyen başka reaktör ürünlerini yollarından saptırır. 1 mikrosaniye (saniyenin milyonda biri) sonra çekirdek bir detektörün ön tabakasında durdurulur ve 80 mikrosaniye sonra da veri edinme sistemi, çekirdeğin ulaşma zamanı, enerjisi ve koordinatları hakkında bilgi verir.

Araştırmada, detektör böyle bir olaydan 20-30 saniye kadar sonra beş sinyal daha kaydetti; hepsi ağır çekirdeğe en çok 0,5 mm uzaklıktaydı. Ertesi gün, 28,7 saat sonrasına kadar başka bir sinyal kaydedilmedi. O saatte, aynı konumda toplam enerjisi 22 MeV olan iki sinyal daha alındı. Bu, 105 elementinin kendiliğinden parçalanması olayının imzasıydı. Sonuçta elde edilen ve $N = 163$ olan 105 çekirdeği, uzun ömürlü olmasını $N = 162$ 'deki kapalı nötron kabuklarına borçluydu.

Buna benzer toplam üç bozunum zinciri kaydedildi. Her biri aile başına üç nesil içeriyordu; art arda gelen beş alfa bozunumu kendiliğinden parçalanmayla son buluyordu. Her üç durumda da alfa parçacıklarının enerjileri ve salma zamanları arasında güçlü bir uyum vardı. Yani her bozunum zinciri aynı elementin oluşmasına ve bozunumuna karşılık geliyordu. Çift-Z çekirdekli 112, 114 ve 116 elementleri sentezlendiğinde benzer zincirler gözlemlendi; her zincirin son çekirdeğinin ömrü, nötron ve proton sayılarına göre, dakikalardan saatlere uzanıyordu. Nükleer kabuk yapısının varolmaması durumunda bu ağır çekirdeklerin hiçbirinin ömrü, saniyenin on milyar kere milyarda birinden fazla olamazdı.

Genel Tablo

Artık atom sayıları 104 ile 118 arasında olan 29 yeni çekirdeğin özellikleri konusunda bilgiye sahibiz. En ağır çekirdeklerin hepsinin bozunum biçimleri, enerjileri ve ömürleri mikroskopik çekirdek modelinin öngörülerıyla uyumlu ve süper ağır çekirdeklerde bir kararlılık adası için ilk deneysel kanıtları sunuyorlar.

Ne var ki, bu adanın ancak kıyısına ulaşılmış durumda. Atom sayısı büyüdükçe süper ağır çekirdeklerin kararlılığının da hızla arttığı anlaşıldı; ama çekirdeklerin binlerce, bel-

ki de milyonlarca yıl yaşadıkları bölgeden hâlâ çok uzaktayız. Bizi $N = 184$ sihirli sayısına doğru götürecek bol nötronlu çekirdeği yapmayı henüz bilmememiz, sorunlardan biri. Ancak bu sorunu başka şekilde de ele alabiliriz. En uzun ömürlü süper ağır çekirdeğin onlarca milyon yıllık bir yarılanma ömrü varsa, Dünya'da çok az da olsa bulunması gerekir. Zorluk, onu bulmaktır.

Böyle uzun ömürlü bir element için olası bir aday, 180 kadar nötronu olan hassiyumdur ($Z = 108$). 2001 yılında İsviçre, Almanya ve Dubna'daki (Rusya) JINR'dan bir kimya ekibi, kısa ömürlü hassiyum-269 izotopunun kimyasal özelliklerinin, periyodik tabloda aynı sütunda bulunan yoğun metalik osmiyum ($Z = 76$) elementininkilere benzer olduğunu saptadılar. Öyleyse osmiyum örneklerinde çok az miktarda hassiyum izotopu olabirdi. Bu da, ya kendiliğinden parçalanmaya uğrayacak ya da daha hafif yavru çekirdeği parçalanana kadar, art arda alfa ve beta bozunumlarına uğrayacaktı.

Bu yılın sonuna doğru, JINR'dan Yuri Oganessian başkanlığında Fransa'daki araştırmacılarla yapılacak bir deneyle, osmiyum örneğinde bu ender kendiliğinden parçalanma olayları saptanmaya çalışılacak. Modane'da (Fransa), kozmik ışınlardan koruma amacıyla yerin derinliklerinde yapılacak olan deneyde, bir yıl içinde tek bir kendiliğinden parçalanma olayı kaydedilirse, osmiyumun çok çok küçük oranlarda 108 elementi içerdiğini anlayacağız. Bu durumda, kararlılık adasının neredeyse zirvesinde bir süper ağır element bulunmuş olacak; bu da araştırmacıların kabuk modelini sınamayı sürdürmelerini olanaklı kılacak.

O zamana kadar, JINR'da daha da ağır elementler aranmaya devam edilecek. Araştırmacılar şu sıralar, deneyin duyarlılığını geliştirmek ve ışın demetinin yoğunluğunu artırmak için çalışıyorlar. Ne var ki, eğer