

Uzayın Keşfinde Anahtar Teknoloji

Plazma Roketleri

Burak Karadağ [Uzay Mühendisi - Japonya Uzay Keşif Ajansı (JAXA)

ABD ve SSCB (Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği) arasında uzay yarışını başlatan *Sputnik 1* adlı uydunun 4 Ekim 1957’de uzaya fırlatılmasının üzerinden yarım yüzyıldan fazla bir süre geçmesine rağmen kimyasal roket motorlarında o günden bugüne kayda değer bir gelişme görülmedi. Popüler adıyla plazma roketleri -genel adıyla elektrikli iticiler- ise sağladıkları avantajlar ile uzayın keşfinde giderek daha da etkin bir rol oynamaya ve kimyasal roket motorlarının yerini almaya başlıyor. Bunun sebebi bir uzay aracını aynı hızlara kimyasal roket motorlarında kullanılan yakıtın sadece onda biriyle çıkarabilmeleri.

Örneğin NASA’nın Asteroit Vesta ve cüce gezegen Ceres’i gözlemleyen *Dawn* adlı uzay aracında elektrikli itici yerine geleneksel kimyasal roket motoru tercih edilseydi yakıtı yetmeyeceği için *Dawn* iki gök cisminden sadece birine gidebilecekti.

“Profesör Oberth birçok önerisinde haklı çıktı. Eğer bir gün Mars’a elektrik gücüyle uçarsak buna hiç şaşırمام.”

Wernher von Braun, 1947



Akishiro Ikehita

Bir asteroitten örnek toplamayı başaran ilk uzay aracı *Hayabusa*. Hayabusa Japonca "gökdoğan" demek.



ISAS/JAXA

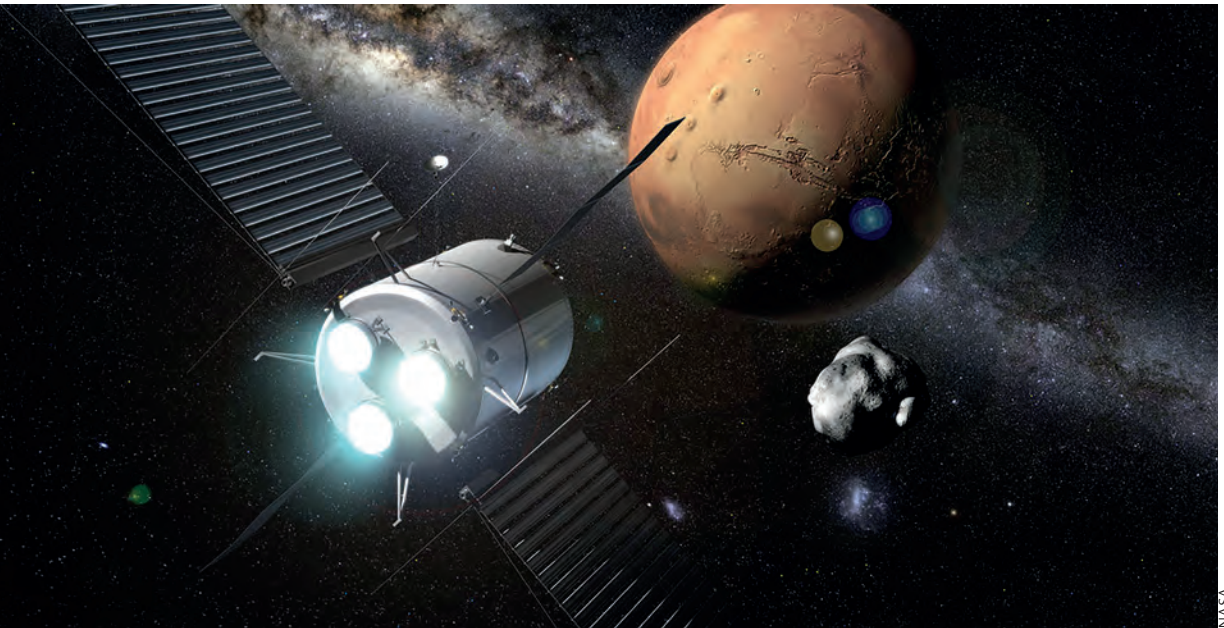
Asteroit Itokawa. Japon roket biliminin öncüsü Hideo Itokawa'nın ismi verilen asteroitin boyutları 540m x 270m x 210m.

Elektrikli itkide amaç güneş panelleri veya bir nükleer reaktör vasıtasıyla elde edilen elektrik enerjisini kullanarak maddenin dördüncü hali olan plazmayı elektrik ve manyetik alan altında aşırı derece yüksek hızlarda dışarı atmak ve böylelikle itki elde etmektir. Bu atış (çıkış) hızı egzoz hızı diye de ifade edilir. Böylelikle bir uzay aracının görevini yerine getirebilmesi için depolaması gereken yakıt miktarı kimyasal yakıt kullanan geleneksel roket motorlarına kıyasla önemli ölçüde azaltılabilir. Mesela bir çeşit elektrikli itici olan Hall iticileri kimyasal roket motorlarınının 10 katı hatta daha yüksek egzoz hızına (~50 km/s) ulaşabilir. Bu da ihtiyaç duyulan yakıt miktarının elektrikli iticiler sayesinde yüzde doksandan fazla azaltılabileceği anlamına geliyor. Yani aynı miktarda yakıtla Mars'a dokuz kat daha fazla kargo taşınabilir. Bir başka örnek vermek gerekirse, sadece kimyasal roket motoru olan toplam beş tonluk bir iletişim uydusunun yaklaşık üç tonunu yakıt oluşturur. Aynı uydunun elektrikli itici kullanması halinde ihtiyaç duyacağı yakıt kütlesi sadece 300 kg olurdu. Bir cisim uzaya göndermenin maliyetinin kilogram başına 5000-20.000 dolar arasında değiştiğini göz önüne alırsak elektrikli itici kullanmanın fırlatma maliyetlerini epeyce düşürdüğünü tahmin edebiliriz.

Görev kapasitesini artırmak (örneğin fazladan ölçüm aleti koymak), fırlatma kütlesini ve dolayısıyla masrafı önemli ölçüde düşürmek için daha verimli olan elektrikli iticiler tercih edilir. Ayrıca belirli bir yakıt kütlesiyle daha fazla yörüngesel manevra sağlayarak uzay aracının faydalı ömrü uzatılabilir. İstenen görevleri yerine getirmeye yetecek kadar, yani yüzlerce ton kimyasal yakıtın uzaya fırlatılmasının mümkün olmadığı Dawn gibi bazı derin uzay görevlerinde ise elektrikli iticiler olmazsa olmaz niteliktedir.

2015'te Boeing ilk defa tümüyle elektrikli itici kullanan bir ticari uyduyu yörüngeye oturttuğunda tıpkı bugün otomobillerde olduğu gibi uydular da da elektrik kullanımının giderek yaygınlaşacağını sinyali vermiş oldu. Bunun yanı sıra uzun vadede Mars'ın kolonileştirilmesi çabaları ve asteroitlere karşı giderek artan ilgi (örneğin NASA'nın bir asteroiti yakalayıp Ay'ın yörüngesine sokarak incelemeyi planladığı Asteroit Yönlendirme Görevi) ileri uzay teknolojilerinden biri olarak kabul edilen elektrikli itki sistemlerinin stratejik önemi işaret ediyor.

Plazma roketleri kullanılan bir Mars görevinin konsept tasarımı





Hayabusa'nın devamı Hayabusa 2 adlı uydun Tanegashima Uzay Merkezinde H-IIA roketine yüklenirken. Sağ tarafta uydunun dört adet ızgaralı iyon motoru görülüyor.

Bir Cisim Uzayda Nasıl Hareket Eder?

Newton'un hareket yasalarından üçüncüsü olan ve klasik mekaniğin temelini oluşturan etki-tepki ilkesi, her etkiye karşı eşit ve ters yönde bir tepki olduğunu ifade eder. Tüm cisimler esasında bu ilkeye göre hareket eder. Bir cismin bir yüzey üzerinde hareket edebilmesi için ise ayrıca sürtünme kuvvetine ihtiyaç vardır. (Eğer yüzeyler arasında harekete karşı koyan sürtünme kuvveti olmasaydı yürümeye çalışırken sanki buz üstündeymiş gibi kayıp devamlı düşerdik. Yahut kalem elimizden kayar, kâğıt üzerinde herhangi bir iz bırakmazdı.) Örneğin bir otomobil motoru tekerlekleri döndürerek yola geriye doğru bir kuvvet uyguladığı

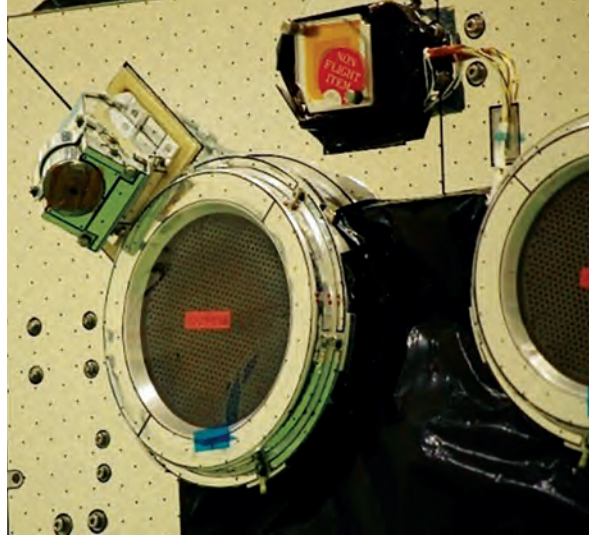
zaman yol ile tekerlekler arasındaki sürtünme kuvveti de ileriye doğru etki ederek tekerleklerin kaymasını engeller ve etki-tepki kuvvetiyle otomobil ileriye doğru hareket eder. Benzer şekilde geminin pervanesi suyu, uçağın pervanesi veya motoru ise havayı iterek ilerler. Uzay ortamında yani boşlukta ise sürtünme olmadığından etki-tepki kuvvetiyle hareket edebilmek için dışarı kütle atılması gerekir.

Şimdi bir an için uzayda olduğunuzu ve elinizde içi kum doldurulmuş bir top olduğunu hayal edin. Topun kütlelerinin 1 kg, uzay giysisizle beraber sizin kütleinizin de 100 kg olduğunu varsayalım. Eğer topa saniyede 1 km hıza ulaşacak şekilde vurursanız etki-tepki yasası sizin bedeninizin de eşit büyüklükte bir kuvvete maruz kalacağını ve zıt yönde hareket edeceğinizi söylüyor.

Newton'un ikinci yasası sizin ağırlığınız topun ağırlığının yüz katı olduğu için hızınızın topun hızının yüzde biri kadar (0,01 km/s, bu hız değişimine literatürde delta-v denir ve uzay araçlarının yörünge planlamalarında kullanılır) olacağını hesap ediyor. Newton'un birinci yasası ise başka bir dış kuvvet etki etmezse veya elinizde atacak ikinci bir top yoksa 1 km/s'lik hızınızı koruyacağınızı ve sonsuza kadar uzayda sürükleneceğinizi söylüyor. Eğer uzayda daha yüksek hızda sürüklenmek istiyorsanız temelde iki seçeneğiniz var. Ya aynı ivmeyle daha çok sayıda topa vurmalsınız ya da aynı topu daha büyük bir ivmeyle atmalısınız. İşte kimyasal roketler birinci seçeneğe göre, elektrikli iticiler ise ikinci seçeneğe göre hareket eder. Elektrikli iticiler topu daha yüksek atış (egzoz) hızına ulaştırdıkları için daha verimlidir ve daha az top kullandıkları için yakıt tasarrufu sağlarlar. Yani verimliliğin ölçüsü egzoz hızıdır.

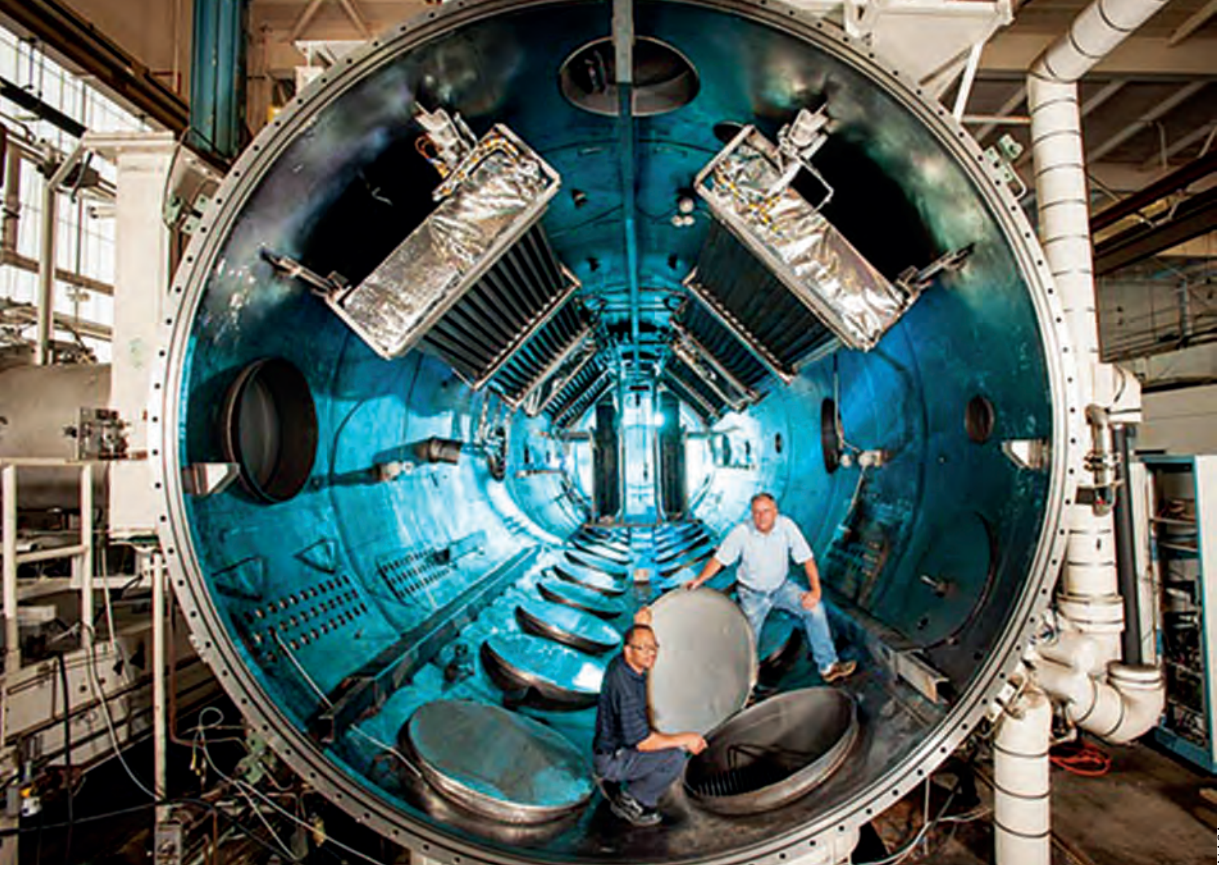
Kimyasal Yakıtlı Roket Motorları Nasıl Çalışır?

Kimyasal yakıtlı roket motorlarında kullanılan katı veya sıvı (örneğin hayli tehlikeli hidrazin) bir yakıtın moleküler bağlarında depolanmış potansiyel enerji, yanma odasında kinetik enerjiye çevrilir. Oluşan yüksek sıcaklıktaki basınçlı gazlar bir lüle yardımıyla genişletilerek egzoz gazı olarak atılır ve etki-tepki ilkesine göre itki elde edilir. Kimyasal roket motorları ile hayli yüksek mertebelerde (kilonewton) itki elde edilebilirken yakıtın moleküler yapısı sonlu bir potansiyel enerjiye sahip olduğundan ve yanma odası duvarlarının dayanabileceği sıcaklık sınırlı olduğundan yanma süreci ile ulaşılabilecek egzoz hızı (~4 km/s) sınırlıdır. Kimyasal roket motorları bu yüzden daha çok yakıtta ihtiyaç duyar. Örneğin bir uzay aracının alçak Dünya yörüngesinden (160-2000 km) Mars'a seyahat etmesi için hızında meydana gelmesi gereken değişim (delta-v) yaklaşık olarak 4,5 km/s'dir.



Hayabusa 2 adlı uydunun iyon motorları

Roket denklemi, eğer kimyasal yakıt kullanılırsa uzay aracının kütlesinin üçte ikisinin yakıt olması gerektiğini söylüyor. Daha uzak gezegenler için planlanan görevlerde (örneğin ~35-70 km/s delta-v gerektiren) ise yakıt oranı yüzde 99,9'un üzerine çıkıyor ve uzay aracına konulacak donanım ve faydalı yüke hiç yer kalmadığı için kimyasal yakıtlı roketler kullanışsız hale geliyor. Elektrikli iticilerde ise egzoz hızı bir güç kaynağının plazmaya uyguladığı voltaja bağlıdır ve bu da kuramsal olarak sınırsızdır. Ancak uygulamada uzay aracının sahip olduğu sınırlı elektrik güç kaynağı nedeniyle elektrikli iticiler hayli düşük seviyede (milinewton), ancak bir bozuk parayı havaya kaldıracak kadar itki üretir. Yerçekiminden kaçmak büyük miktarda itki gerektirdiğinden bir uyduyu uzaya fırlatma amacıyla kullanılamazlar ve uzay gibi vakumlu ortamlarda çalışmaları uygundur. Ancak kimyasal yakıtlı roket motorlarının çalışması dakikalarla ölçülürken, elektrikli iticiler düşük seviyedeki itkiyi telafi etmek için çok daha uzun süre, binlerce saat çalıştırılır. Kimyasal yakıtlı roketlere kıyasla yavaş fakat devamlı itki sağladıkları için sonunda aynı miktarda yakıtla uzay aracına daha çok hız kazandırabilirler. Böylece Dawn örneğinde olduğu gibi bir uzay aracı aynı miktarda veya daha az yakıtla daha uzak yerlere gidebilir.



Elektrikli iticilerin yer testlerinin yapıldığı bir vakum çemberi

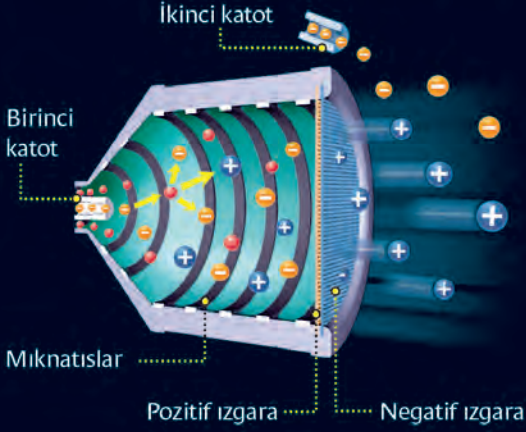
Peki Elektrikli İtici Nasıl Çalışır?

Elektrikli iticiler de aynı temel etki-tepki ilkesine göre çalışır ama itki üretmek için gaz yerine plazma atılır. Elektrikli iticiler plazma oluşturma ve plazmayı hızlandırma yöntemlerine göre kendi içinde elektrotermal, elektrostatik, elektromanyetik olarak üç genel kategoriye ayrılır. Farklı çeşitleri olmasına karşın yüksek performansları ve teknoloji olgunluk seviyeleri nedeniyle ızgaralı iyon motorları ve Hall-etkisi iticileri (veya kısaca Hall iticileri) en çok kullanılan elektrikli itki sistemleridir. Izgaralı iyon motorları ve Hall iticileri elektrostatik kategorisine dahildir ve üzerinde en çok araştırma yapılan iticilerdir. Burada sadece ızgaralı iyon motorlarının ve Hall iticilerinin çalışma detaylarından kısaca bahsedeceğiz.

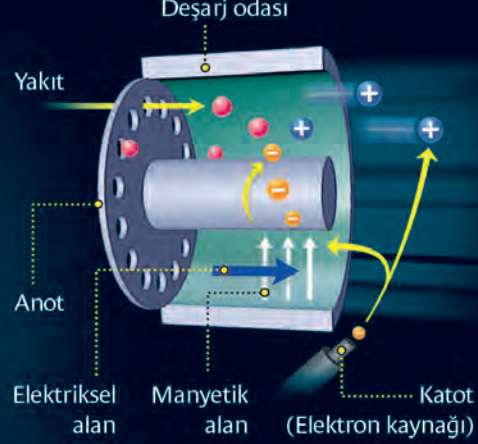
Izgaralı iyon motorlarında patlama riski olmayan, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz (örneğin ksenon) deşarj odasında katottan çıkan elektronlar ile bombardıman edilir. Elektronlar ile çarpışan gaz molekülleri iyonize olarak plazma haline dönüşür. Bu arada güçlü mıknatısların oluşturduğu manyetik alan elektronların deşarj odası duvarlarına ulaşmasını engeller ve deşarj odasında kalma sürelerini ve gaz molekülleri ile çarpışma olasılıklarını artırır. Pozitif yüklü iyonlar pozitif potansiyelli ızgaradaki binlerce küçük delikten geçerek plazmadan ayrışır ve 1-10 kV'luk potansiyel fark altında elektrostatik etkiyle negatif potansiyelli ızgaraya doğru hızlanarak dışarıya atılır. Böylece oluşan iyon ışınları ile itki üretilmiş olur.

Izgaralı iyon motoru şeması

● Elektron ● Soygaz yakıt ● + Pozitif iyon



Hall iticisi şeması

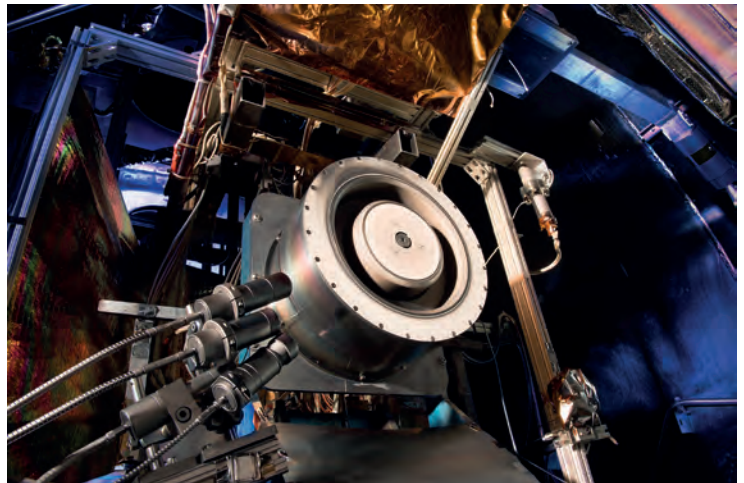


İkinci katot ise ışın içindeki pozitif iyonlara eşit sayıda elektron göndererek ışının elektriksel olarak nötr kalmasını sağlar. Aksi halde uzay aracı negatif yüklenir ve atılan bazı pozitif yüklü iyonlar geri dönerek itkinin azalmasına ve uzay aracında deformasyona sebep olur.

Hall iticileri ise yapısal olarak ızgaralı iyon motorlarından daha basit -örneğin sadece bir tane katot/elektron tabancası vardır ve ızgarasızdır- olmalarına karşın plazma fiziği açısından daha karmaşıklardır. Hall iticilerinde yakıt olarak ızgaralı iyon motorlarında olduğu gibi çoğunlukla ksenon gibi bir soy gaz kullanılır. Katottan gönderilen elektronlar radyal manyetik alan içinde hapsedilir ve eksenel elektriksel alana ve radyal manyetik alana dik yönde sürüklenerek iticiye adını veren Hall akımını oluşturur. Halkalı anot üzerindeki deliklerden gönderilen gaz molekülleri Hall akımını oluşturan elektronlarla çarpışarak plazmaya dönüşür. Bu plazmaya anot vasıtasıyla voltaj (100V-1 kV) uygulanarak pozitif iyonlar hızlandırılır ve böylece itki üretilmiş olur. Hızlandırılan pozitif iyonlar katottan çıkan elektronların bir kısmını çekerek elektriksel olarak nötr kalır.

Izgaralı iyon motorları, daha fazla voltaj uygulanabildiğinden Hall iticilere göre biraz daha yüksek egzoz hızına ulaşabilirler, yani yakıt tasarrufu daha fazladır. Fakat bir birim alanda anot ile katot arasında akabilecek elektron veya pozitif iyon akımı sınırlı olduğundan -buna uzay yük limiti denir- ızgaralı iyon motorlarında elde edilebilecek pozitif iyon akımı ve dolayısıyla da itki sınırlıdır.

NASA JPL'nin Hall iticilerinden biri. Bu tasarımda katot merkeze alınmış. Solda silindirik şeklindeki plazma ölçüm uçları yan yana dizilmiş.

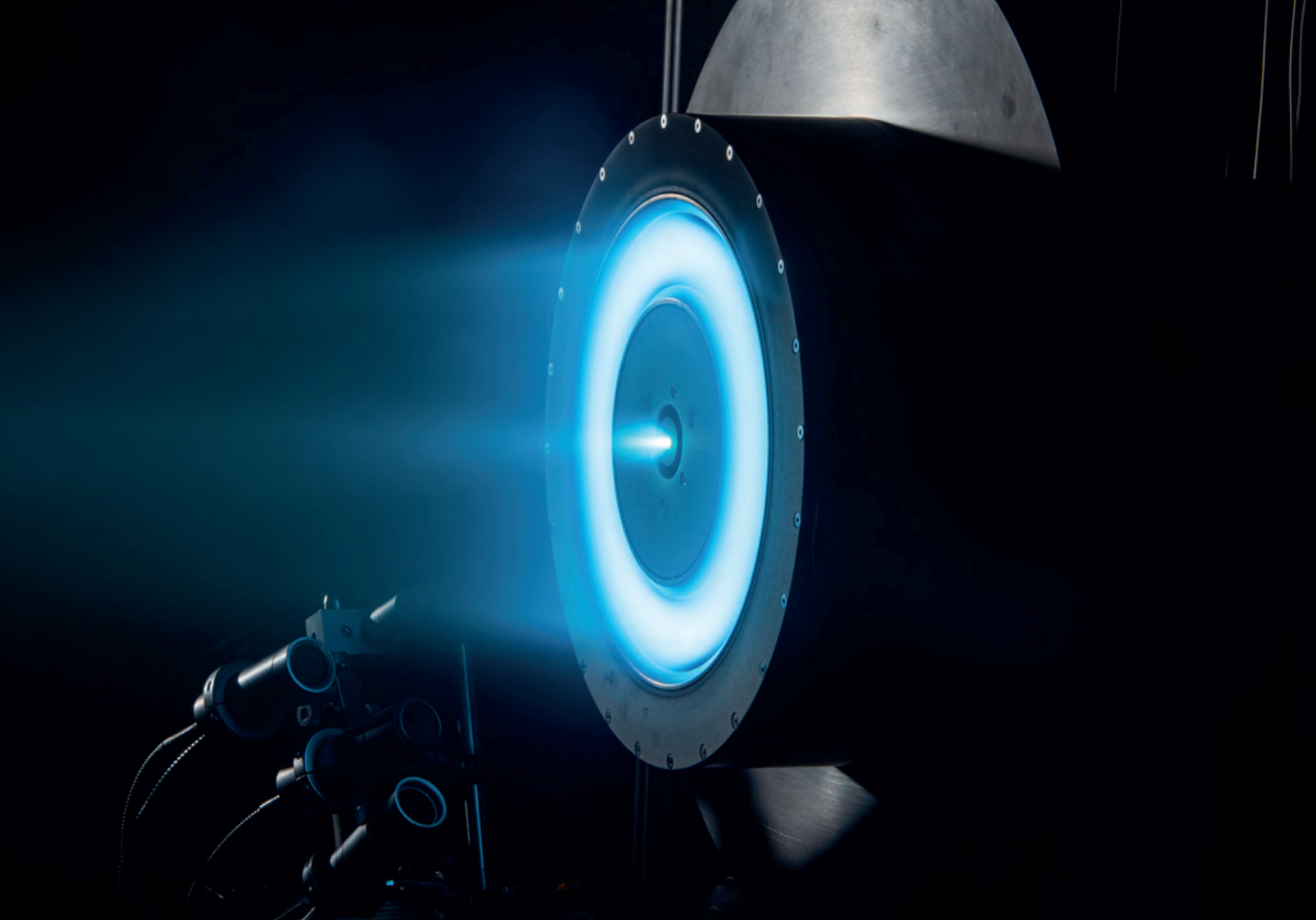


Hall iticilerinde ise pozitif iyonlar elektronlarla beraber hızlandırıldığından plazmanın nötr yapısı korunur. Böylece uzay yük limitine maruz kalınmaz ve daha çok itki elde edilir. İşte bu farklardan dolayı yakıt tasarrufunun daha önemli olduğu derin uzay görevlerinde ızgaralı iyon motorları tercih edilirken çevik yörünge manevralarının gerekli olduğu yakın Dünya görevlerinde Hall iticiler tercih edilir.

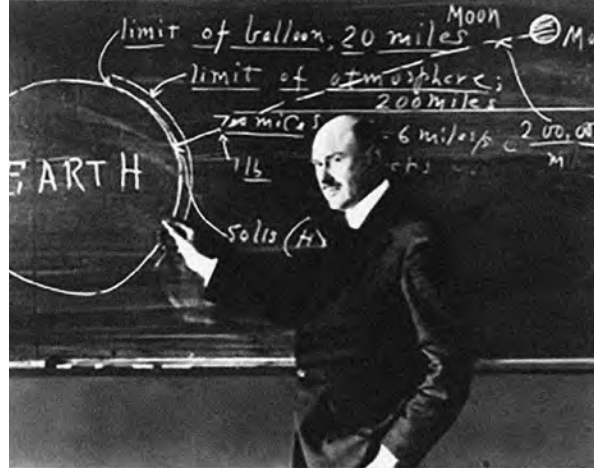
Bir Yüzyılı Aşan Tarih

Son yirmi yılda yaygınlaşmalarına rağmen aslında elektrikli iticilerin tarihi kimyasal yakıtlı roket motorlarındaki kadar eski. 19. yüzyılın sonunda elektronun keşfinden sonra katot ışın tüpünde yapılan deneylerde elektronların hidrojen gazı

moleküllerinin ortalama hızının binlerce katı hızla (30.000–100.000 km/s) hareket ettiği bulunmuştu. Bu gelişmeden ilham alan R. H. Goddard (1906) ve K. E. Tsiolkovskiy (1911) birbirlerinden bağımsız olarak yüksek hızlı elektron akışının bir uzay gemisini hareket ettirmek için kullanılabileceği fikrini ortaya attı. Hayli düşük kütesine rağmen elektronun neden proton yerine tercih edildiği merak edilebilir. Bunun sebebi o zamanlar anot ışınlarının varlığı biliniyorduydu da protonun varlığının, 1920’de kesin olarak doğrulanana kadar tartışmalı olmasıydı. İşe yarar bir elektrikli itici konseptinin oluşması için çözülmesi gereken teknik sorunlar vardı. Örneğin elektron-iyon çifti üretiminin altında yatan iyonlaşma fiziği açıklığa kavuşmuş değildi. Dahası elektrikli iticilerin devasa miktarda enerji gerektirdiği düşünülüyor ve dolayısıyla yakın zamanda kullanılmaları mümkün görülüyordu.



NASA JPL'nin Hall iticisi ateşleme esnasında. Merkezde parlak plazmanın olduğu yer katot. Pozitif ksenon iyonları plazmaya mavi renk veriyor.



Prof. Robert H. Goddard (üstte) roket biliminin öncülerinden

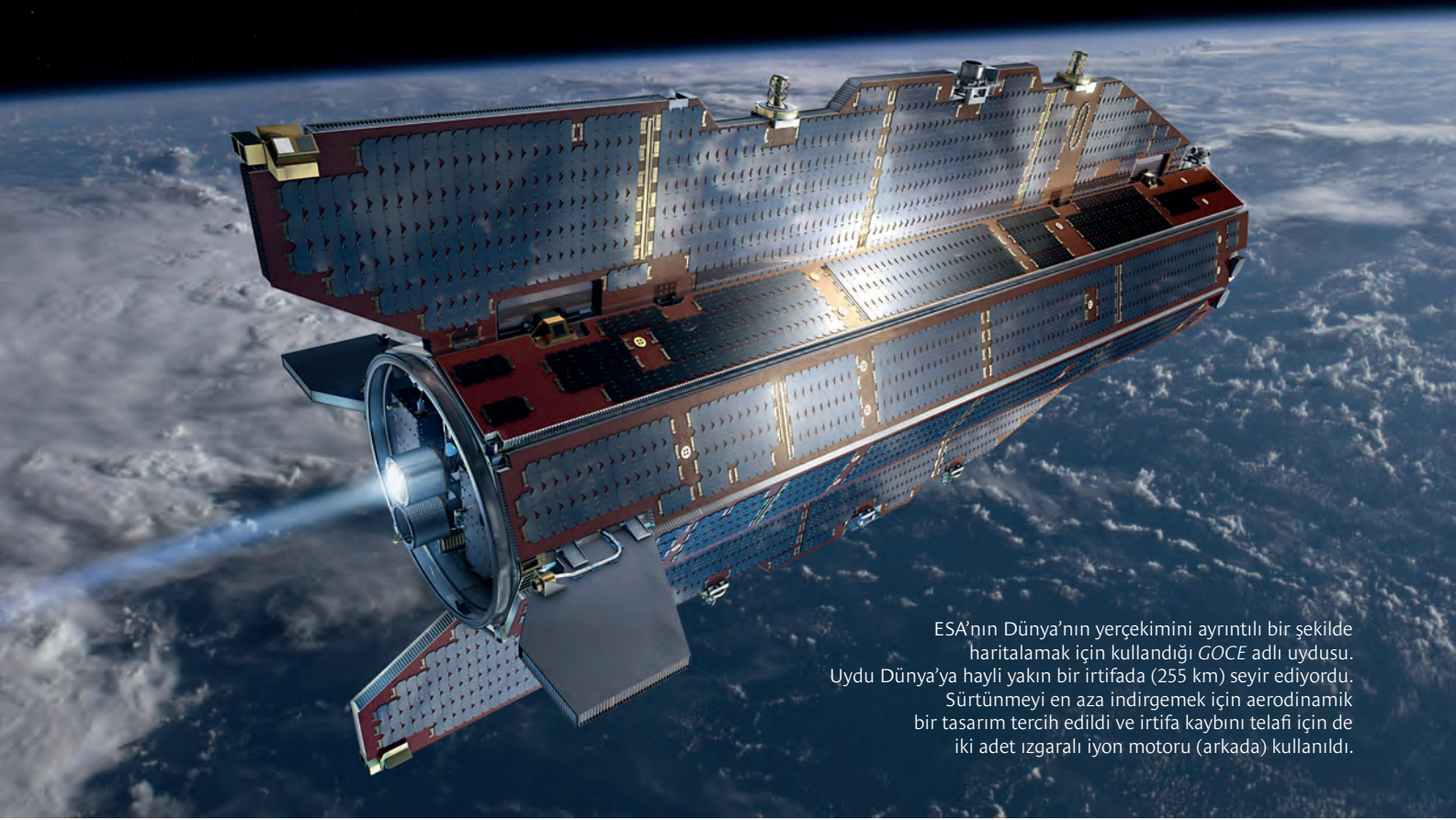
Prof. Hermann J. Oberth (önde), **Dr. Ernst Stuhlinger** (ortada solda), **Dr. Wernher von Braun** (ortada sağda). Arka sırada **General Holger Toftoy** (solda) ve **Dr. Eberhard Rees** (sağda).

Bir de elektrikli iticilerin kullanılabilmesi için öncelikle kimyasal yakıtlı roket motorlarının geliştirilmesi ve uzaya çıkılması gerekiyordu. H. J. Oberth'in 1929'da yazdığı *Ways to Spaceflight* isimli kitabının bir bölümünü tamamen elektrikli iticilere ayırması ve getireceği faydaları, örneğin yakıt tasarrufu konusunu özellikle vurgulamasıyla bu iticiler profesyonel ve amatör birçok uzay meraklısı tarafından bilinir oldu. 1930'lı yılların başında SSCB'de ilk laboratuvar prototipi üretilip başarıyla sılandıysa da elektrikli iticiler II. Dünya Savaşı'nın sonuna kadar çoğunlukla bilim kurgu edebiyatında her ne kadar bilimsel açıdan zayıf olsalar da büyüleyici bir gezegenler arası gelişmiş itki sistemi olarak gösterildi.

1940'lı ve 50'li yıllarda iyon akımı elde edilmesi üzerine önemli çalışmalar yapıldı ve iyon itkisinin tamamıyla uygulanabilir olduğu gösterildi. Ayrıca elektrikli iticilerin bazı yörünge manevralarını kimyasal roket motorlarına göre daha verimli yapabileceği kanıtlandı. E. Stuhlinger'in elektrikli itki sistemleri üzerine ilk sistematik analizi ile de elektrikli itici geliştirme çalışmaları hız kazandı ve böylece ciddi araştırma programlarının kurulma-

sına zemin hazırlanmış oldu. Nihayet ilk fikirlerin ortaya atılmasından yaklaşık yarım yüzyıl sonra 1960'lı yıllarda ilk elektrikli iticiler ABD ve SSCB tarafından yörüngede başarıyla denendi.

Sağlayacağı yakıt tasarrufuna rağmen elektrikli iticiler ABD'de pahalı uzay görevleri için riskli görüldü ve 1990'lı yılların sonuna kadar sadece deneysel çalışmalarla kullanıldı. SSCB ise bu yeni teknolojiyi daha açık bir tutumla ele alarak 1970'lerden günümüze kadar yüzlerce uydunun yörünge ve yönelimlerini kontrol etmek için bu iticilerden faydalandı. 1990'lara kadar ABD'de deneysel çalışmalar ızgaralı iyon motorları üzerine yoğunlaşırken SSCB Hall iticiler üzerine literatüre ciddi katkı yaptı. Elektrikli iticilerin SSCB'de başarıyla kullanılması ABD'de bu teknolojiye karşı yeniden bir ilgi uyandırdı ve 1998'de NASA'nın Deep Space 1 görevinde ilk defa bir ızgaralı iyon motoru ana itki sistemi olarak kullanıldı. Hall iticilerin ızgaralı iyon motorlarına göre daha çok itki üretmesi ve güvenilir/stabil operasyonu ABD'nin ve Avrupa'nın dikkatini çekti. SSCB'nin dağılması ile Rusya'dan teknoloji transfer çalışmaları yapıldı ve Hall iticiler üzerine yoğun araştırma programları başlatıldı.



ESA'nın Dünya'nın yerçekimini ayrıntılı bir şekilde haritalamak için kullandığı GOCE adlı uydusu. Uydusu Dünya'ya hayli yakın bir irtifada (255 km) seyir ediyordu. Sürtünmeyi en aza indirmek için aerodinamik bir tasarım tercih edildi ve irtifa kaybını telafi için de iki adet ızgaralı iyon motoru (arkada) kullanıldı.

Elektrikli iticilerin kullanımında SSCB ve ABD'yi Japonya, Avrupa ve Çin takip etti. Örneğin Japonya Uzay Keşif Ajansı (JAXA) elektrikli itici kullandığı Hayabusa adlı uzay aracı ile ilk defa bir asteroitten örnek toplanıp getirilmesi nedeniyle büyük takdir topladı ve saygınlık kazandı. Ardından Avrupa Uzay Ajansı (ESA) Ay'a gönderdiği ilk uzay aracı Smart-1'de elektrikli itici kullanarak bu teknolojiye ilgisini göstermiş oldu.

Güvenilirlik ve maliyet faydalarının Batı'da kabul görmesiyle elektrikli itici teknolojisi giderek daha fazla önem kazanıyor ve gelecekte çok daha fazla görevde yer alması planlanıyor.

Son Olarak

İlk başta elektrikli iticilerin uzayın insanlı keşfi için kullanılması öngörülmüşse de güç kaynağının sınırlı olması ve yolculuk sürelerinin insanlı görevler için çok uzun olması nedeniyle elektrikli iticiler bugüne kadar insansız uzay araçlarında (yönelim kontrol, yörünge transferi, yörüngeden

çıkarma, yer istasyonu konum sürdürme, atmosfer sürtünme düzeltmesi gibi çeşitli yörünge manevraları için) kullanıldı. Fakat bu durum çok da uzak olmayan bir gelecekte daha geniş ve verimli güneş panellerinin kullanılmasıyla veya nükleer enerjinin devreye girmesi ile değişebilir. Örneğin 200 megavatlık bir elektrikli itici ile Mars'a yolculuk süresi birkaç aya kadar düşürülebilir ve gezegenler arası insanlı seyahat sıradan bir iş haline gelebilir. ■

Kaynaklar

Jahn, R. G., "Physics of Electric Propulsion." Mc Graw- Hill, 1968.

Choueiri, E. Y., "A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906-1956)," *Journal of Propulsion and Power*, Cilt 20, s. 193-203, 2004.

Goebel, Dan M., Katz, I., *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, John Wiley & Sons, 2008.

Choueiri, E. Y., "New Dawn for Electric Rockets", *Scientific American*, Sayı 300, s. 58-65, 2009.