



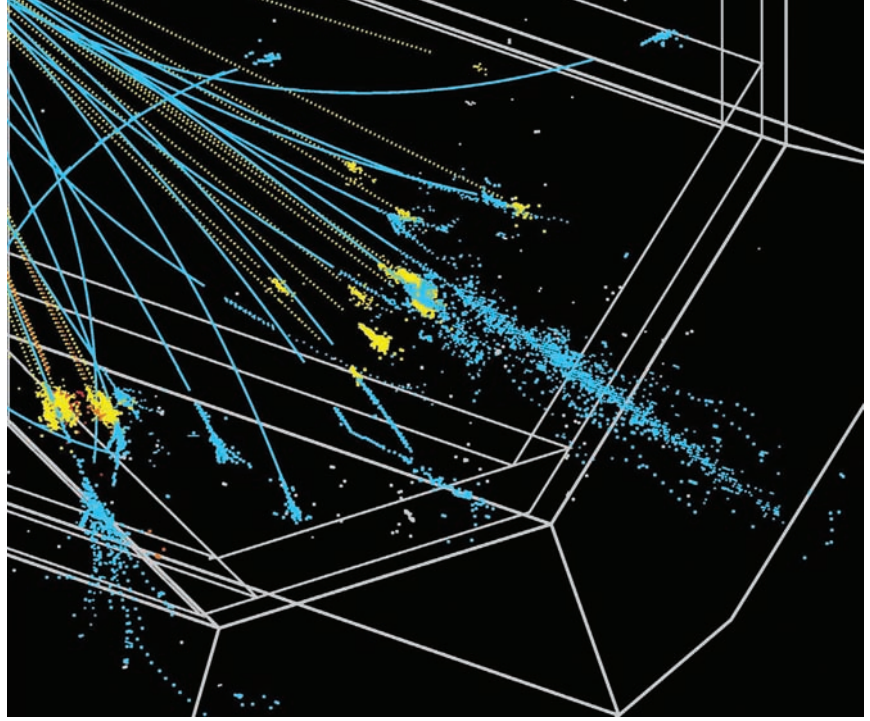
**Hava ortamından daha yoğun bir ortama geçen fotonun frekansı değişmezken hızı azalıyor ve dolayısıyla dalgaboyu azalıyor. Sorum şu: de Broglie dalga boyu  $h/p$  olduğuna göre hızı azalırsa dalga boyunun artması gerekirdi. Burada yanlış olan şey ne?**  
Hakan Kurt

Yanlış olan, fotonları etrafımızda gördüğümüz diğer cisimler gibi değerlendirmek. Fotonların bir kütlesi yoktur, bu nedenle bunların momentumunu hesaplamak için kütle çarpı hız ( $p=mv$ ) gibi bir formüle başvuramayız.

Okullarda momentumu basitçe kütle çarpı hız olarak tanımlıyoruz. Ama bu tanım sadece düşük hızlara sahip cisimler için geçerli. Işık hızına yakın hızlarda yol alan, görelilik kuramının uygulanması zorunlu cisimler, fotonlar gibi ışık hızında yol alan parçacıklar veya dalgalar gibi cisim olarak düşünemeyecek uyarımlar için bu tanımları doğrudan uygulayamayız. Okullarda basit tanımın verilmesinin amacı, Newton'un hareket yasalarından başlayarak momentumun korunumu yasasını elde etmek. Amaç bu olunca da, momentum, Newton'un yasalarının geçerli olduğu cisimler için tanımlanmalı, yani "kütle çarpı hız" şeklinde.

Öte yandan "momentumun korunumu yasası", diğer bir çok doğa yasasından daha genel bir geçerliliğe sahip. Çünkü bilim insanları bu yasayı çok basit bir ilkeye indirgemeyi başardılar: Doğa yasalarının konumdan bağımsız oluşu. Yani, eğer siz bulunduğunuz yerde bir deney yapar ve belli bir sonucu elde ederseniz, aynı koşullar altında olmak şartı ile aynı deneyi biraz daha ötede, veya 100 km ötede veya evrenin başka bir köşesinde yaparsanız bile aynı sonucu elde edersiniz. Yapılan bir deneyin sonuçları, o deneyi gerçekleştirdiğiniz yerden bağımsızdır. Eğer bu ilke geçerliyse, o zaman momentum denilen bir nicelik de korunuyor olmalı. (Meraklılar için ekleyelim: Enerjinin korunumu yasası da, deney sonuçlarının, deneyin ne zaman yapıldığından bağımsız olması ilkesine dayanıyor.) Yapılan bu ispat oldukça genel ve momentum için değişmez bir formüle dayanmıyor. Aksine momentum her fiziksel sistem için ayrıca, o sisteme özel bir şekilde ifade edilmeli. Bu ifadeler bazen oldukça garip formlara bürünebiliyor. Örneğin, bazı tür dalgalar için, dalganın ilerlediği yön (hızın yönü) ile momentumun yönü farklı doğrultularda çıkabiliyor.

Momentumun korunumu yasasını kullanarak, örneğin bir fotonun momentumunun ne olabileceğini kestirmek mümkün. Bunun için, fotonun duran bir cisme çarparak soğurulduğu durumu düşünüp, cisme ne kadar itme verildiğini (yani cismin son hızı ile kütlelerinin çarpımının ne olduğunu) bulmak yeterli. Büyük bir tesadüf sonucu, boşlukta hareket eden bir foton için, momentumun değeri sanki "kütle çarpı hız" formülüyle hesaplanabilmiş gibi çıkıyor: Eğer, fotonun bilinen enerjisinden,  $E=mc^2$  formülünü kullanarak



bir kütle hesaplırsak, ve sonra bu kütleyle ışık hızı ile çarparsak ( $p=mc$ ), fotonun doğru momentumunu bulabiliriz. Buradaki hata, fotonun belli bir kütlesi olduğunu varsaymak. Böyle bir kütleyle tutarlı bir fiziksel anlam vermek mümkün değil. Üstelik, görelilik kuramına göre, fotonlara atfedilecek doğru kütle sıfır olmalı. Bu nedenle momentum, hiçbir şekilde bir kütleden bahsetmeksizin, doğrudan enerjiye bağlı bir ifade olarak veriliyor ( $p=E/c$ ).

Deneyel olarak da fotonların bu momentumuna sahip olduğunu biliyoruz. Örneğin Compton deneyinde fotonlar elektronlarla çarpıştırıldığında, önceden durağan olan elektronlar çarpışmadan sonra yerlerinden fırlıyor.

Yukarıdaki yaklaşımın en önemli sakıncası, foton su gibi bir ortamda yol alırken açığa çıkıyor. Soruda belirttiğiniz gibi, foton suda daha yavaş ilerlediği için, basit formül daha küçük bir momentum değeri veriyor. Buna karşılık, Snell yasasını kullanarak daha büyük momentum bulmak da mümkün. Bu yaklaşımda, foton suya girerken, fotona sadece su yüzeyine dik kuvvetler etki ettiğini varsayıyoruz. Bu nedenle, fotonun momentumunun yüzeye paralel bileşeni korunmalı. Snell yasasındaki kırılma açısını dikkate alırsak, sudaki momentumun boşluktakinden daha büyük olduğunu buluyoruz. Bu çıkarımı ilk olarak ışığı tanecik gibi düşünen Newton yapmış (bu nedenle, Newton, ışığın suda daha hızlı hareket ettiğini iddia etmiş). Kuantum kuramındaki de Broglie bağlantısı da bununla aynı sonucu veriyor.

Hangisi doğru? Açıkça söylemek gerekirse, doğru cevabın ne olduğunu hâlâ bilmiyoruz. Dünyanın değişik yerlerinde birkaç grup, fotonun bir ortam içindeki momentumunu deneysel olarak ölçmek için deneyler yapıyor, ama cevabın ne olduğunu söylemek için henüz vakit erken.

Temel sorun ışık-madde etkileşiminin karmaşık oluşu. Işık bir madde içinde yol alırken, o maddenin elektronlarına bir takım kuvvetler uyguluyor. Işığın geçtiği bölge içinde, elektronlar da ışıkla beraber titreşim hareketleri yapıyor ve bu hareket ışığı takip ediyor. Bu durumda fotonun momentumu derken neyi kastediyoruz? Sadece fotonu oluşturan elektromanyetik dalgaların momentumunu mu, yoksa bunlarla beraber fotona eşlik eden elektronların katkısını ekleyerek elde ettiğimiz bir değeri mi? Birinci sorun bu. İkinci bir sorunsu, fotonun boşluktan ortama girdiği süreçte ortama bir itme verilmesi (foton ortama çıkarken aynı itme ters yönde veriliyor). Dolayısıyla bir cevap verilirken bu itmenin de hesaba katılması gerek. Bu itmenin ileri yönde mi (yani fotonun ilerlediği doğrultuda mı) yoksa ters yönde mi olduğunu henüz bilmiyoruz; yukarıdaki iki alternatif cevap ters yönde öngöründe bulunuyorlar. Deneyciler de işte bu itmenin ne yönde ve ne kadar olduğunu belirlemeye çalışıyorlar.

"Peki, de Broglie ifadesindeki momentum ne işe yarıyor?" diye sorabilirsiniz. İşin ilginç yönü, bu momentum değerlerinin de ayrı bir korunum yasasına sahip olması. Gerçek momentumdan ayırt etmek için bunlara bazen sanki-momentum deniyor. Örneğin, ortam içindeki bir fotonun iki ayrı fotona bölündüğü bir süreçte, ilk sanki-momentum, son sanki-momentumların toplamına eşit olmalı. Yani, hem gerçek momentum, hem de sanki-momentum korunuyorlar, ama bunlar birbirinden farklı yasalar. Bu nedenle doğrudan, sanki-momentumun, gerçek momentumla aynı şey olduğunu söyleyemiyoruz (en azından bir ortamda yol alan fotonlar için). Sonuç olarak, öne sürdüğünüz sorunun oldukça karmaşık ve henüz kesin cevabın ne olduğu bilinmiyor. Kesin olan şey, ışığın veya dalgaların mekanik özelliklerinden bahsederken dikkatli olunması gerektiği.