

СКОРОСТТА НА СВЕТЛИНАТА

¹Сава Гроздев, ²Веселин Ненков

¹Висше училище по застраховане и финанси – София

²Технически колеж – Ловеч

Резюме. По повод годишнината от определянето скоростта на светлината са отбелязани някои факти и свойства.

Keywords: light; speed; second; meter; nanometer

На 7 декември 2016 г. с един от оригиналните си „дудъли“ GOOGLE отбеляза годишнината на едно от най-значимите събития в науката – определянето скоростта на светлината. На този ден се навършиха 340 години от първите опити за експериментално пресмятане на скоростта, дело на датския астроном Оле Рьомер (1644 – 1710). През 1676 г., като наблюдава движението на Йо – една от луните на Юпитер, Рьомер доказва, че скоростта на светлината не е безкрайна. През 1905 г. Алберт Айнщайн (1879 – 1955) постулира, че скоростта на светлината във вакуум е независима от движението или от отправната система, и изследвайки последиците от този постулат, извежда своята Специална теория на относителността. Тази инвариантност, потвърдена с множество експерименти, се основава на уравненията на Максвел и на липсата на доказателство за съществуването на етер. Специалната теория на относителността изследва следствията от инвариантността на скоростта на светлината c , като прави допускането, че физическите закони са еднакви във всички инерциални отправни системи. Едно от следствията е, че безмасовите частици и вълни имат също скорост c . Същевременно Айнщайн демонстрира, че скоростта на светлината има голямо значение и извън контекста на светлината и електромагнетизма. Оттук следва значението на определянето на точната ѝ стойност. В продължение на векове точността на измерванията се подобрява и през 1975 г. се установява, че скоростта на светлината е 299 792 458 метра в секунда. През 1983 г. се осъществява предефиниране на метъра в Международната система единици (SI), като метърът се определя като разстоянието, изминато от светлината във вакуум за $1/299\,792\,458$ част от стандартната секунда. Поради това числената стойност на скоростта на светлината е свързана с дефиницията на метъра.

Скоростта на светлината c е физична константа, която играе важна роля в много области на физиката. В Теорията на относителността c свързва времето и пространството. Фигурира също в прочутата формула за връзката между маса и енергия $E = mc^2$, както и във формулите за увеличаване масата на движещите се тела в зависимост от скоростта им, в преводния коефициент между електромагнитната и електростатичната система единици и др. Скоростта на светлината е скоростта на всички безмасови частици и на съответните полета във вакуум. Текущи теории предсказват, че това е скоростта на гравитацията и на гравитационните вълни и че става дума за изобщо максималната скорост, с която могат да се пренасят материя, енергия и информация. Според новите научни открития Вселената се разширява със скорост, по-голяма от скоростта на светлината.

„При разпространението на светлината през прозрачни материали скоростта ѝ зависи от показателя на пречупването (n) в съответната среда, а следователно и от дължината на вълната, от което следва, че скоростта на светлината (електромагнитните вълни) v в среда, различна от вакуум, е по-ниска от c . Отношението между c и v се нарича показател на пречупване n на съответния материал ($n = c / v$). Например за светлината от видимата част на спектъра показателят на пречупване на стъклото е обикновено около 1,5, а показателят на пречупване на въздуха е около 1,0003. В повечето практически случаи може да се приеме, че светлината се движи мигновено, но за големи разстояния и чувствителни измервания крайната ѝ скорост оказва забележим ефект. При комуникация с отдалечени космически сонди например обменът на съобщения със Земята може да отнеме минути и часове. Светлината на звездите, която наблюдаваме, ги е напуснала преди много години и по този начин става възможно да се изучава историята на Вселената чрез наблюдения на отдалечени обекти. Крайната скорост на светлината ограничава и теоретичните максимални скорости на изчисление в компютрите, тъй като информацията трябва да премине от чип към чип. Скоростта на светлината може да се използва за точно определяне на големи разстояния с т. нар. *time of flight* експерименти“ (Уикипедия).

По съобщение на агенция ИТАР-ТАСС учени от Университета в германския гр. Кобленц са успели да постигнат скорост, по-висока от тази на светлината. По такъв начин те експериментално потвърждават съществуването на зони с нулево време, което поставя на сериозно изпитание интерпретацията на Теорията на относителността на Айнщайн – основата на съвременните разбирания за заобикалящия ни свят. Според тази интерпретация скоростта на светлината е абсолютна и не може да бъде надмината. По данни на британското списание *New Scientist* по време на опити е регистрирано движение на фотони със скорост, превишаваща тази на светлината. Според професорите съвременници Гюнтер Нимц и Алфонс Сталхофен обаче при експеримента

се е получил известният на съвременната физика ефект на тунела. Съгласно съществуващата теория, която е в хармония с постулатите на Айнщайн, в такива тунели съществува т.нар. нулево време. Откритието е направено при опити с пропускане на светлина през две огледални призми, отдалечени на метър една от друга. При експеримента фотоните, пресичащи създадения тунел, достигат крайната точка едновременно със светлината, отразена от една от границите на призмата, въпреки че са изминали по-дълъг път от отразената светлина. Според професор Сталхофен експериментът вече е повторен и в други водещи световни лаборатории, като учените са получили аналогични резултати. „Сблъскахме се с парадоксално физично явление, при което можеш да се озовеш в крайната точка на пътя още преди да си започнал движението“, коментира ученият.

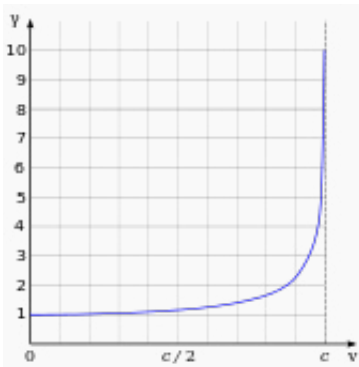
От три години насам голяма група физици от няколко десетки страни работи над **проекта OPERA** (Oscillation Project with Emulsion-Tracking Apparatus), посветен на изучаването на неутринните осцилации. Целта на експеримента е да докаже хипотезата за **превръщане на един вид неутрино в друг**. (В науката са познати три вида неутрино: електронни, мюонни и тау неутрино.) Сноп от един вид неутрино (мюонния) е насочен към подземната лаборатория „Гран Сасо“ в Италия, намираща се на разстояние 732 km. Целта е да се проследи колко от изпратените частици ще пристигнат в лабораторията, превърнати в тау неутрино. При експериментите учените са забелязали, че частиците изминават разстоянието с една шестдесетмилиардна част от секундата по-бързо от скоростта на светлината. Тази парадоксална скорост е наблюдавана около 15 хиляди пъти, което позволява да се смята, че става дума за научно откритие, а не за случаен резултат. Според директора на изследователската лаборатория на ЦЕРН резултатите са невероятни. С проведения експеримент с неутрино екипът на Антонио Ередитато поставя под съмнение **постулатите на съвременната физика**. Защото съгласно приетите в науката представи скоростта на светлината е пределна за Вселената. Както беше отбелязано по-горе, цялата съвременна физика, и по-конкретно Частната теория на относителността на Алберт Айнщайн, се основава на схващането, че **нищо не може да надхвърли** тази фундаментална физична константа. Изследователите подхождат към откритието изключително предпазливо, тъй като то може да преобърне съществуващите представи във физиката и разбирането за Вселената. На 23 септември 2016 г. в ЦЕРН беше проведен семинар за обсъждане на резултатите от серията експерименти.

Скоростта на светлината във вакуум се означава със c от думата „константа“ (на латински *constanta* – постоянна, неизменна) или от думата „бързина“ (на латински: *celeritas*). В началото бил използван символът V , въведен от шотландския физик и математик Джеймс Кларк Максуел (1831 – 1879) през 1865 г. През 1856 г. немските физици Вилхелм Вебер (1804 – 1891) и Рудолф Колбрауш

(1809 – 1858) използват означението c за константа, която по-късно се оказва, че е скоростта на светлината във вакуум, умножена по $\sqrt{2}$. През 1894 г. немският учен Пол Друде (1863 – 1906) в работите си, обединяващи оптиката с електромагнитната теория на Максвел, определя съвременното значение на c . В оригиналните си статии на немски от 1905 г. Алберт Айнщайн използва означението V , но през 1907 г. го заменя със c , с което превръща символа в стандартен. Понякога c се използва за скоростта на вълните в материална среда, а c_0 – за скоростта на светлината във вакуум. Означението с долен индекс е възприето в официалната литература на системата SI и наподобява означенията на други свързани константи: магнитната проницаемост във вакуум μ_0 или магнитна константа, диелектричната проницаемост във вакуум ϵ_0 или електрична константа, както и свързани с тях константи.

Ето няколко интересни факта.

- Светлината на Слънцето достига до Земята за 8 минути, а един автомобил би изминал това разстояние за 180 години, ако се движи със скорост 60 km/h.
- Светлината изминава един метър за 3,3 наносекунди.
- Светлината изминава един километър за 3,3 микросекунди.
- Светлината изминава разстоянието от геостационарната орбита до Земята за 0,12 секунди.
- Светлината обикаля Земята по Екватора за 0,13 секунди.
- Светлината изминава разстоянието от Земята до Луната за 1,3 секунди.
- Светлината изминава разстоянието от един парсек (мерна единица, приблизително равна на $3,0856776 \cdot 10^{16} \text{m}$), за 3,26 години.
- Светлината изминава разстоянието от Алфа Кентавър (най-ярката и най-близката звезда до Слънцето) до Земята за 4,4 години.
- Светлината прекосява Млечния път за 100 000 години.
- Светлината изминава разстоянието от галактиката Андромеда до Земята за 2 500 000 години.



Във физиката се използва т. нар. фактор на Лоренц, означаван с γ , като функция на скоростта. Началната му стойност е 1 и с приближаването на v към c стойността му клони към безкрайност (вж. графиката). Специалната теория на относителността има много следствия, които на пръв поглед противоречат на интуицията, но са доказани експериментално. Сред тях са уравнението за еквивалентност на маса и енергия ($E = mc^2$), намаляването на дължината на движещи се обекти, както и релативистичното забавяне на времето (забавяне на часовника). Факторът γ на Лоренц се определя като $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, където v е скоростта на обекта. За скорости, много по-малки от c , разликата на γ от 1 е пренебрежимо малка, а такива са скоростите в ежедневието. В тези случаи Специалната теория на относителността е много близка до класическата механика. Резултатите от нея могат да се приложат, като пространството и времето се обединят и се разглеждат като единно пространство-време (единиците за пространство и време се свързват чрез c) и се постави изискването физическите теории да съответстват на принципа на симетрия, наречен Лоренцова ковариантност, чиято математическа формулировка съдържа c като параметър. Лоренцовата ковариантност е почти универсално предположение при съвременните физически теории, като квантовата електродинамика, квантовата хромодинамика, стандартния модел на физиката на елементарните частици и Общата теория на относителността. По този начин параметърът c се среща навсякъде в модерната физика, появявайки се включително там, където контекстът не е видимо свързан със светлината. Например Общата теория на относителността предсказва, че c е също и скоростта на разпространение на гравитационното поле.

Когато се разпространява в среда, различна от вакуум, скоростта на светлината е различна от c . Освен това съществуват различни скорости на разпространение. Скоростта, с която се разпространяват върховете и падовете на една плоска вълна (изпълваща цялото пространство и характеризираща се с една-единствена честота), се нарича *фазова скорост* v_p . Един реален физически сигнал, като например импулс светлина, се разпространява с различна скорост. Най-голямата част от импулса пътува с т. нар. *групова скорост* v_g , а челната му част – с т. нар. *фронтна скорост* v_f .

При разпространението на светлината в материална среда и преминаването от една среда към друга от значение е фазовата скорост. Тя често се представя с помощта на показателя на пречупване, който по дефиниция е отношението на c към фазовата скорост v_p в средата. По-големите стойности на показателя на пречупване са свързани с по-ниски скорости на разпространение. Показателят на пречупване зависи и от честотата (или дължината на вълната) на светлината, нейния интензитет, поляризацията и посоката на разпространение, но в повечето случаи може да се разглежда като константа, зависеща само от материала. По-плътни среди от въздуха, чийто показател на пречупва-

не е приблизително 1,0003, като например водата, стъклото и диамантът, имат показатели на пречупване съответно 1,3; 1,5 и 2,4 за видимата светлина. В прозрачните среди, общо взето, показателят на пречупване е винаги по-голям от 1, което означава, че фазовите скорости са по-малки от c . В други материали е възможно за някои честоти показателят да стане по-малък от 1, а в някои екзотични материали дори да стане отрицателен. Съществува връзка между показателя на пречупване и показателя на поглъщане на светлината (които съществено са реалната и имагинерната част на диелектричната константа). Връзката се изразява с т. нар. съотношение на Крамерс-Крониг. Практически това означава, че дори и да съществува материал с показател на пречупване по-малък от 1, поглъщането на вълната е толкова бързо, че не е възможно сигналът да се разпространява със скорост, по-голяма от c . Светлинен импулс, при който груповата и фазовата скорост се различават (това се наблюдава, когато има различни честоти с различна фазова скорост), с времето се развива и този процес е известен като дисперсия. Съществуват материали с изключително ниска и дори нулева дисперсия за светлинните вълни и това е потвърдено експериментално. Обратното, групови скорости, надхвърлящи c , също са наблюдавани експериментално. В нито един от тези случаи обаче не е възможно предаването на информация със скорост, надвишаваща c . Не е възможно да се предаде информация със светлинен импулс със скорост, по-голяма от фронтовата му скорост, а тя е винаги равна на c . От друга страна, възможно е скоростта на движение на частица през дадена среда да надвиши фазовата скорост на светлината в тази среда (но все пак оставайки по-малка от c). Например, когато заредена частица се движи през електрически изолатор (диелектрик), се наблюдава светене. Феноменът е известен като ефект на Черенков.

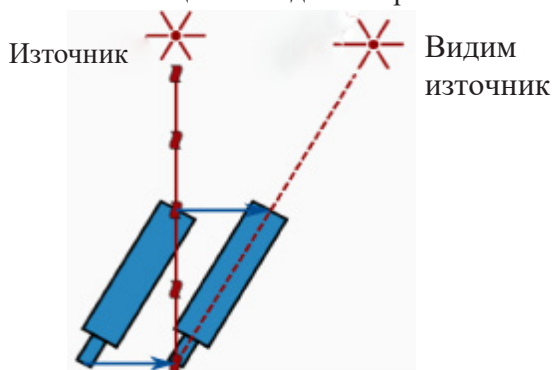
Ето няколко от експериментите и съответните подходи при измерването на c в km/s по години:

1675	Оле Рьомер и Кристиан Хюгенс, спътниците на Юпитер	220 000
1729	Джеймс Брадли, аберация на светлината	301 000
1849	Иполит Физо, зъбно колело	315 000
1862	Леон Фуко, въртящо се огледало	298 000±500
1907	Роса и Дорси, електромагнитни константи	299 710±30
1926	Албърт Майкелсън, въртящо се огледало	299 796±4
1950	Есен и Гордън-Смит, резонаторна кухня	299 792,5±3,0
1958	Фром, радиоинтерферометрия	299 792,50±0,10
1972	Евенсън и сътрудници, лазерна интерферометрия	299 92,4562±0,0011
1983	17-та дефиниция на метъра от Международното бюро за мерки и теглилки	29992,458 (точно)

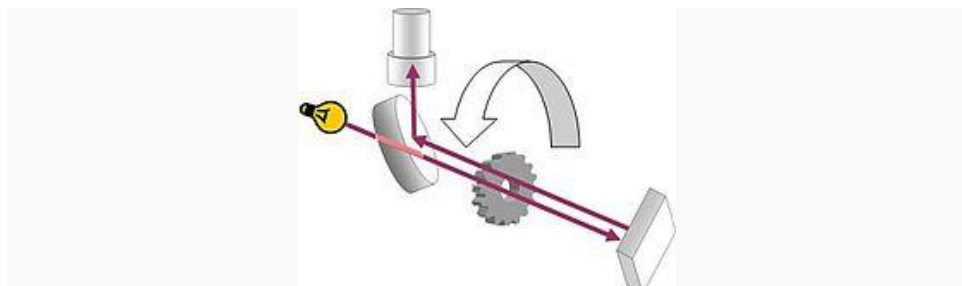
Както се вижда от таблицата, съществуват различни методи за определяне на c . Най-очевидният от тях е да се направи директно измерване с помощта на различни земни и астрономически експериментални постановки. Възможно е също така c да се определи и с помощта на физическите закони, в които фигурира (например чрез определяне на електромагнитните константи ϵ_0 и μ_0 , използвайки връзката им с c). Исторически най-точните резултати са получени чрез определяне поотделно на честотата и на дължината на вълната на електромагнитното излъчване, а чрез тяхното произведение се изчислява и c .

Както беше отбелязано по-горе, през 1983 г. Международното бюро за мерки и теглилки приема дефиниция за метъра в системата SI като „разстоянието, изминато от светлината за $1/299\,792\,458$ секунда“, фиксирайки по този начин скоростта на светлината на точно $299\,792\,458\text{m/s}$. Тоест, прецизното измерване на скоростта на светлината довежда като резултат прецизирането на дефиницията на метъра.

Оле Рьомер (1644 – 1710) използва астрономическо измерване за първата количествена оценка на скоростта на светлината. Той забелязва, че при наблюдение на периодите на завъртане на спътниците около отдалечените планети те са различни в зависимост от това дали Земята се приближава, или отдалечава от съответната планета. Разстоянието, изминато от светлината от съответния спътник (луна) до Земята, е най-кратко, когато Земята е най-близо до планетата, и най-дълго, когато те са най-отдалечени. Разликата между тези две точки е равна на диаметъра на земната орбита около Слънцето. По този начин наблюдаваната промяна в периода на обикаляне на спътника е всъщност разликата във времето, необходимо на светлината да преодолее разликата в разстоянията. Рьомер наблюдава ефекта в случая на най-вътрешния спътник Йона Юпитер и заключава, че на светлината е необходимо време, за да измине това разстояние, оценявайки го на 22 минути. По-късно Хюйгенс в трудовете си за светлината изчислява стойността на скоростта на светлината, основавайки се на тогавашните оценки на диаметъра на Земята.



Друг метод се основава на явлението аберация, открито и обяснено от Джеймс Брадли (1693 – 1762) през XVIII век. Този ефект се дължи на сумирането на векторите на скоростите на светлината от отдалечен звезден източник и на скоростта на движение на наблюдателя (вж. илюстрацията). За наблюдателя изглежда, като че светлината идва от различна точка поради изместването на телескопа с въртенето на Земята и крайната скорост на светлината. Тъй като посоката на скоростта на въртене на Земята се изменя непрекъснато при въртенето около Слънцето, на този ефект се дължи и илюзията, че звездите се въртят около Земята. Като се използва разликата в позицията на определена звезда, е възможно скоростта на светлината да се изрази чрез скоростта на въртене на Земята около Слънцето. Като се знае дължината на времето за пълно завъртане (година), може да се направи изчисление за времето, необходимо на светлината да измине разстоянието от Слънцето до Земята. През 1729 г. Брадли изчислява по този метод, че светлината се придвижва 10 210 пъти по-бързо, отколкото Земята се движи по орбитата си (съвременното съотношение е 10 066 пъти по-бързо). Следователно на светлината са необходими 8 минути и 12 секунди, за да измине разстоянието от Слънцето до Земята.

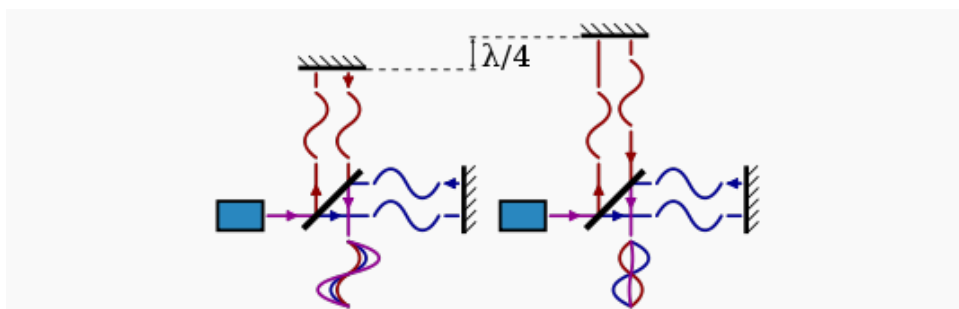


Следваща група подходи се основава на експерименти от типа *time of flight*. Най-ранният от тях е предложен от френския физик Иполит Физо (1819 – 1896). Лъчът светлина преминава през полупропускливо огледало (разположено на 8 км разстояние) и въртящо се зъбно колело (вж. установката) и след отражение се регистрира. При определени скорости на въртене на зъбното колело се получава спиране или преминаване на лъча и като се знаят разстоянията, броят на зъбците и скоростта на въртене, може да се изчисли c .

Методът на френския физик, механик и астроном Леон Фуко (1819 – 1868) е подобен, но при него зъбното колело е заменено с въртящо се огледало.

В днешно време, използвайки осцилоскопи с време за реакция, по-малко от една наносекунда, скоростта на светлината може да се измери директно чрез определяне на забавянето на светлинен импулс на лазер или светодиод при отразяването му от огледало. Този метод не е толкова точен (грешката е от порядъка на 1%), но представлява нагледен лабораторен експеримент.

Съвсем различен експеримент, който не разчита на директно измерване на разпространението на електромагнитни вълни, е да се използва връзката между c и диелектричната константа ϵ_0 и магнитната константа μ_0 , установени с теорията на Максвел: $c^2 = 1/(\epsilon_0\mu_0)$. Диелектричната константа може да се определи чрез измерване на капацитета и размерите на кондензатор, а магнитната константа има фиксирана стойност от точно $4\pi \times 10^{-7}$ Н/м поради дефиницията за ампер. През 1907 г. американският физик Едуард Роса (1873 – 1921) заедно със сътрудници от Националното бюро по стандартизация на САЩ използва този метод и определя скоростта на светлината на $299\,710 \pm 30$ km/s.



Интерферометрията е един от основните методи за определяне на разстояния поради характерната връзка между дължината на вълната на светлината и отстоянието между интерференчните максимуми. Принципът почива на разделянето на кохерентен лъч светлина (например от лазер) с известна честота (f) на две части, които имат различен оптичен път и след това интерферират. Чрез промяна на оптичните пътища и наблюдение на интерференчната картина се определя дължината на вълната (λ). След това от уравнението $c = \lambda f$ се изчислява c . Класическият опит в тази област е дело на Албърт Майкелсън (1852 – 1931) и Едуард Морли (1838 – 1923). В действителност основната цел на опита е била да се докаже или отхвърли съществуването на преносна среда на електромагнитните вълни – етер (понятието е известно още като ефир). Във физиката от края на XIX век се е считало, че светлината се разпространява в тази неподвижна спрямо движението на Земята среда подобно на звука във въздуха. Предполагало се е, че поради това скоростта на светлината ще зависи от посоката на разпространение и от скоростта на източника по аналогия с механиката на Нютон. Очакванията на експериментаторите били светлинният интерферометър да регистрира две съвсем различни скорости на светлината. Резултатът от експеримента обаче е отрицателен: скоростта на светлината изобщо не зависи от скоростта на движението на Земята и от

направлението на измерваната скорост. Преди изобретяването на лазерите за подобни интерферометрични измервания са били използвани източници на кохерентни радиовълни.

REFERENCES/ЛИТЕРАТУРА

- Mendelson, K. S. (2006). The story of c . *American Journal of Physics*, 74 (11).
- Essen, L. (1950). The Velocity of Propagation of Electromagnetic Waves Derived from the Resonant Frequencies of a Cylindrical Cavity Resonator. *Proceedings of the Royal Society of London*, A 204 (1077).
- Evenson, K. et al. (1972). Speed of Light from Direct Frequency and Wave length Measurements of the Methane-Stabilized Laser. *Physical Review Letters*, 29.

THE SPEED OF LIGHT

Abstract. Some facts and properties are considered in the paper on occasion of the anniversary of the speed of light measurement.

✉ **Prof. Sava Grozdev, DSc.**

University of Finance, Business and Entrepreneurship
1, Gusla Str.
1618 Sofia, Bulgaria
E-mail: sava.grozdev@gmail.com

✉ **Dr. Veselin Nenkov, Assoc. Prof.**

Technical College Lovech
31, Sajko Saev Str.
5500 Lovech, Bulgaria
E-mail: vnenkov@mail.bg