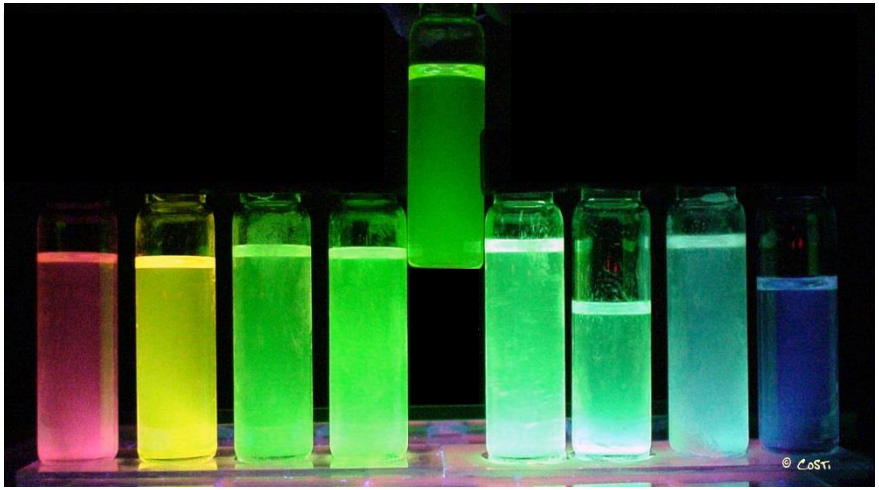
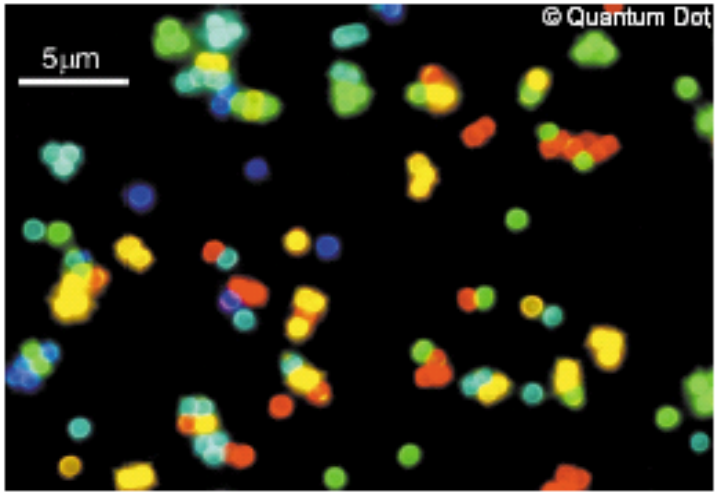
מבוא לאופטיקה - תקציר

דן אורון

המחלקה לפיסיקה של מערכות מורכבות, מכון ויצמן

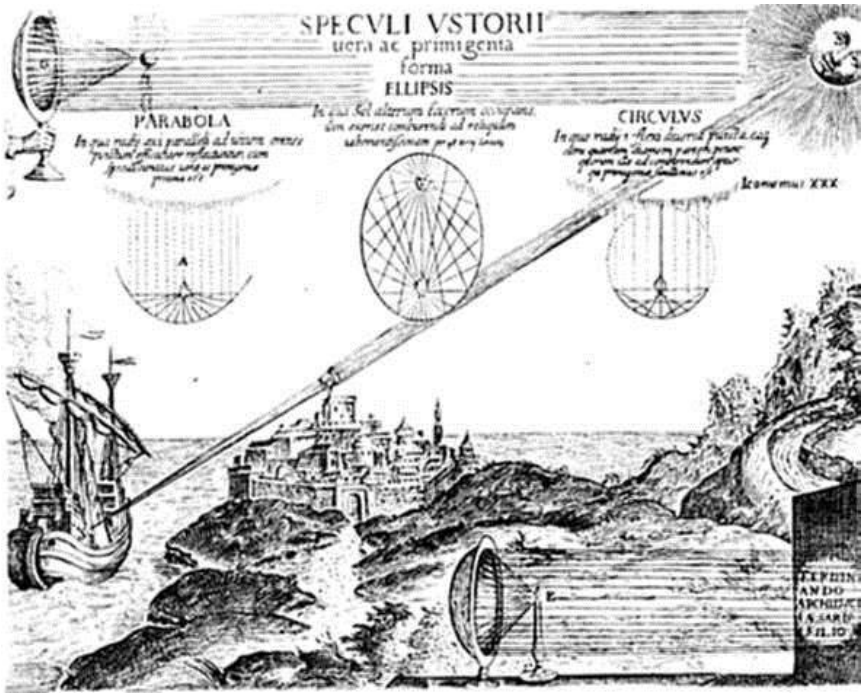




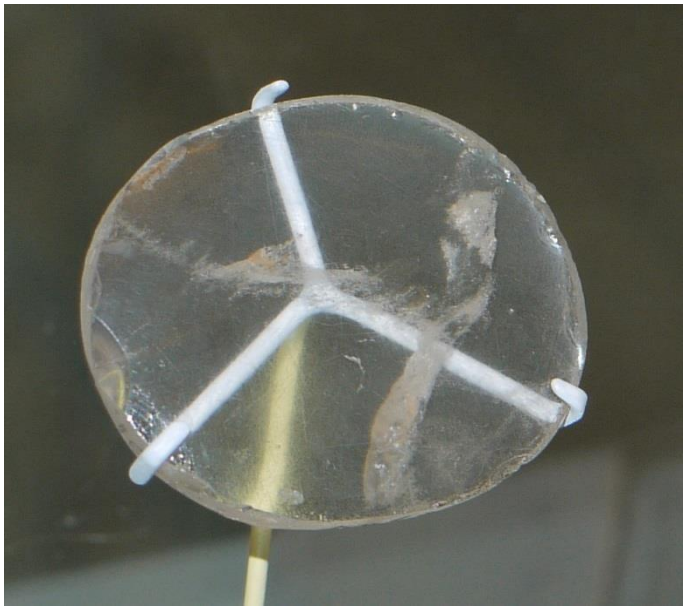
תוכן (1)

- ההיסטוריה הרחוקה של האור
- התלבטויות ראשוניות בנוגע לאופיו של האור
- ניצחון התיאוריה הגלית
- דואליות גל-חלקיק והתיאוריה הקואנטית
- כמה מסקנות מפתיעות
- שימושים באור קואנטי

ההיסטוריה הרחוקה של האופטיקה



מערכת הגנת חופים (יוון העתיקה, משויכת לארכימדס)



עדשת נמרוד (750 לפנה"ס)

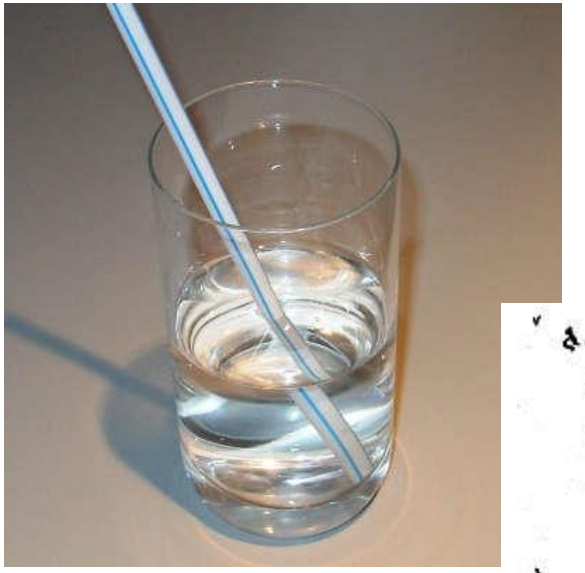
הרנסנס

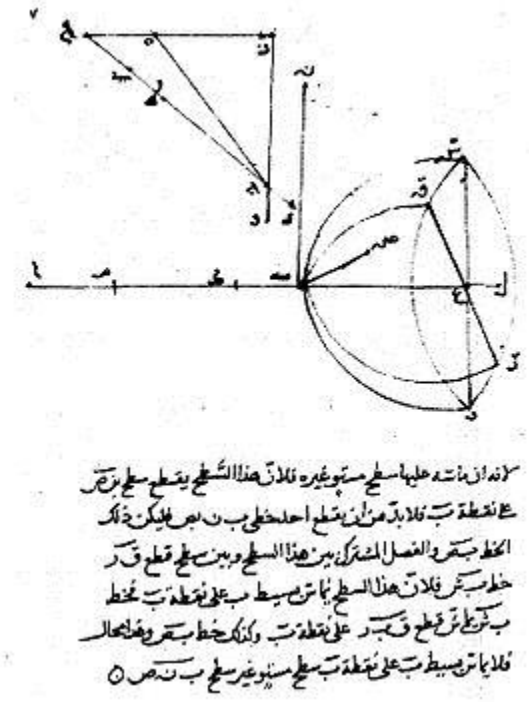
וילבורד סנל, הולנד
(1580-1626)

אבן אל חייתם, פרס
(965-1040)

"גילוי" מחדש של חוקי
ההחזרה והשבירה

$$n \sin(\theta)=const$$



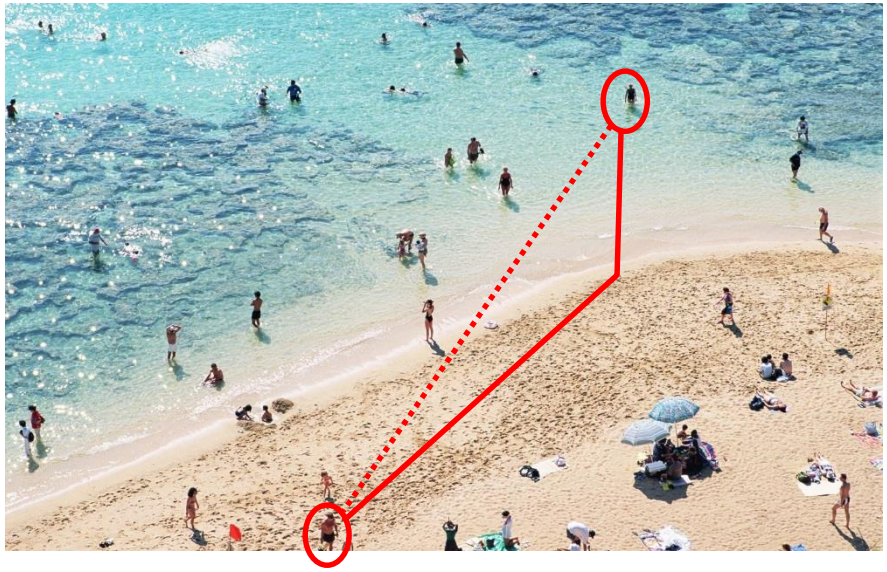


כתבי אבן סאהל,
פרס (984)

המקור של "חוק סנל"

פייר דה פרמה, צרפת
(1601-1665)

עקרון פרמה: אור נע ממקום למקום בדרך הקצרה ביותר האפשרית



מתוך מכתבו של קלרלייר לפרמה, בתגובה על הצגת העיקרון:

Le principe que vous prenez pour fondement de votre démonstration, à savoir que la nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples, n'est qu'un principe moral et non point physique, qui n'est point et qui ne peut être la cause d'aucun effet de la nature

אור – גל?

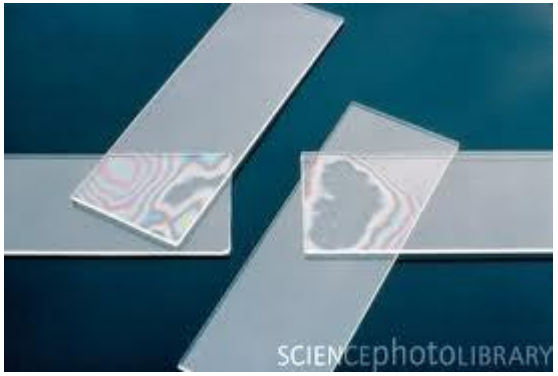
עקיפה והתאבכות

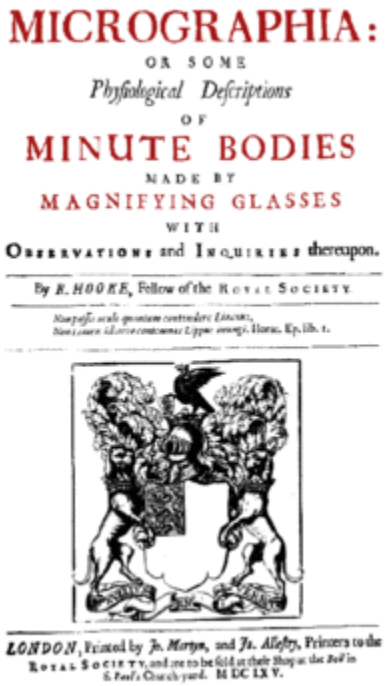
תיאוריה גלית של האור

"אתר"

מהירות האור "גבוהה מאוד"

רוברט הוק, אנגליה
(1653-1701)





MICROGRAPHIA:
OR SOME
Physiological Descriptions
OF
MINUTE BODIES
MADE BY
MAGNIFYING GLASSES
WITH
OBSERVATIONS and INQUIRIES thereupon.

By R. HOOKE, Fellow of the ROYAL SOCIETY

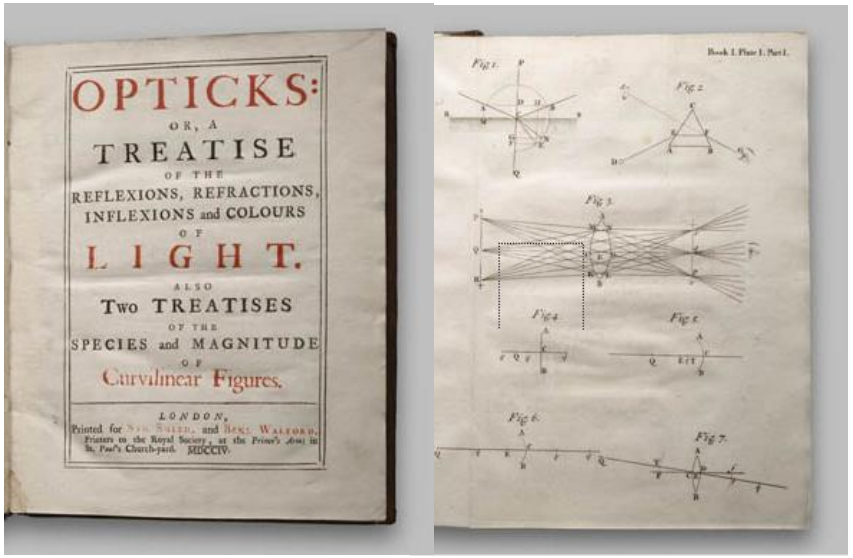
LONDON, Printed by Jo. Martyn, and Ja. Allestry, Printers to the ROYAL SOCIETY, and are to be sold at their Shop at the Bell in S. Paul's Church-yard. M DC LX V.

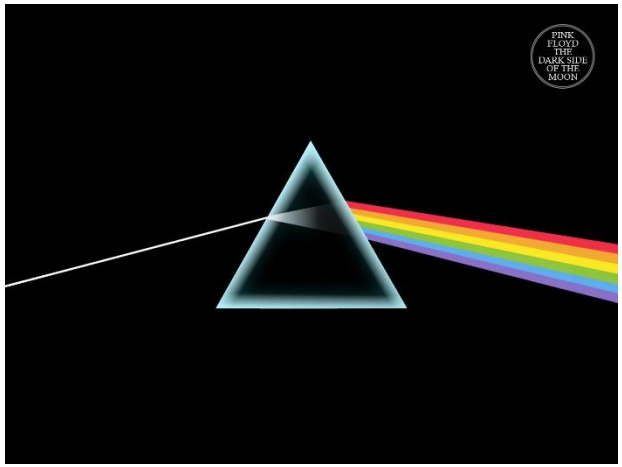
אור – חלקיק?

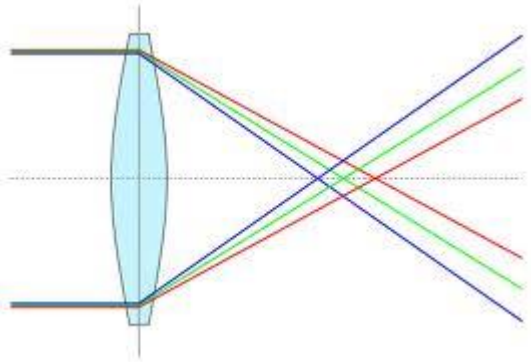
צבע

תאוריה חלקיקית של האור

אייזק ניוטון, אנגליה
(1642-1727)



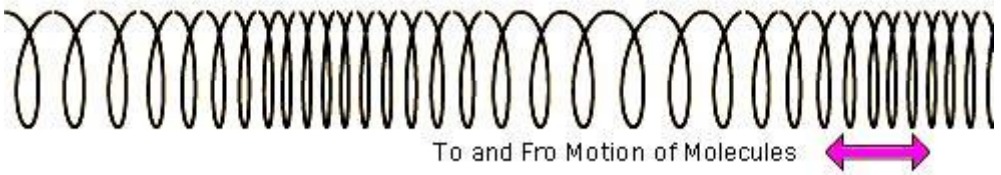


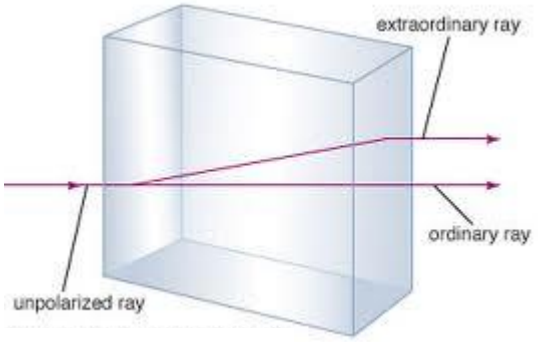


תעלומת השבירה הכפולה

ארסמוס ברטולינוס,
דנמרק (1625-1698)

הבעיה: איך זה מתיישב עם גל אורכי?

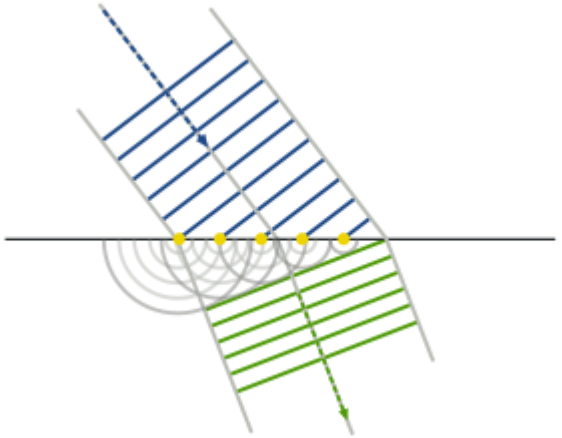




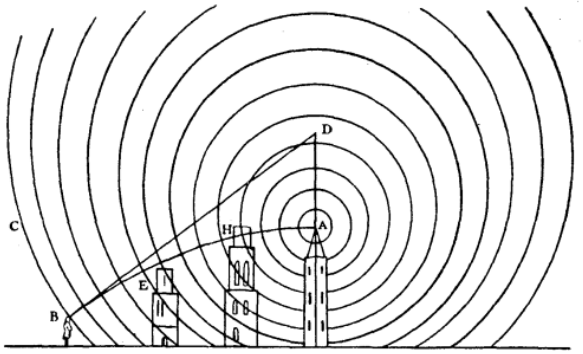
אור – גל?

כל חזית גל הנה מקור
לגלים חדשים

כריסטיאן הויגנס,
הולנד (1629-1695)



בסיס "מדעי" לעקרון פרמה



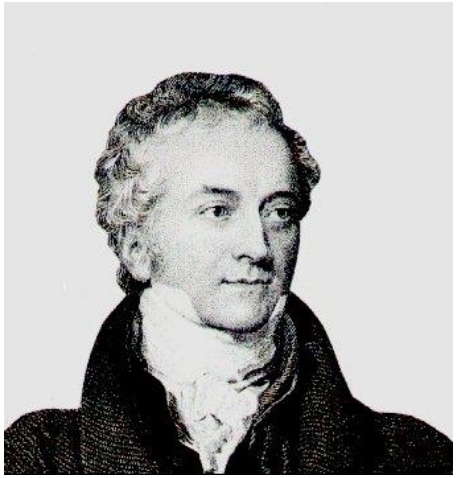
הבנת תופעות כמו "פטה מורגנה"

As there were two different refractions, I conceived that there were also two different emanations of waves of light … the irregular refraction, I wished to try what Elliptical waves, or rather spheroidal waves, would do; and these I supposed would spread indifferently both in the ethereal matter diffused throughout the crystal and in the particles of which it is composed,

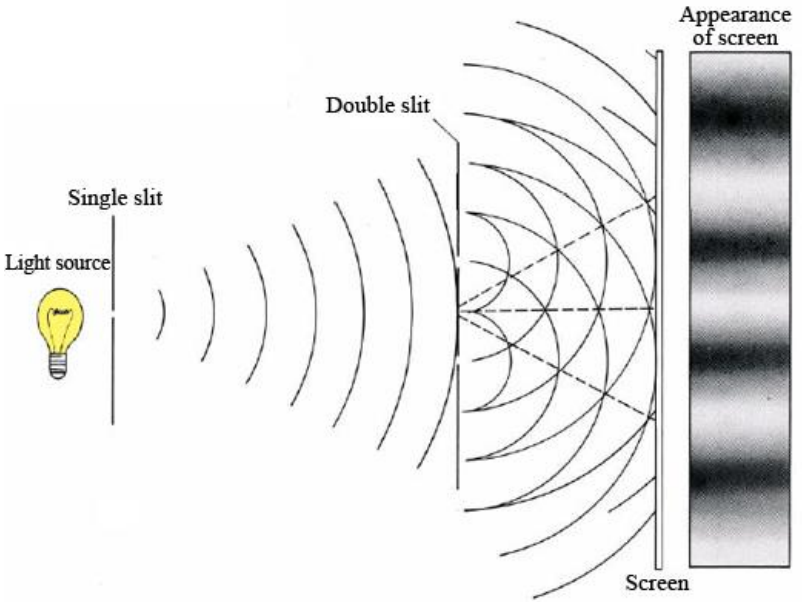
אור – חלקיק או גל?

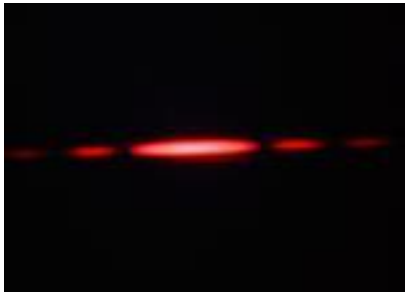
1700-1800

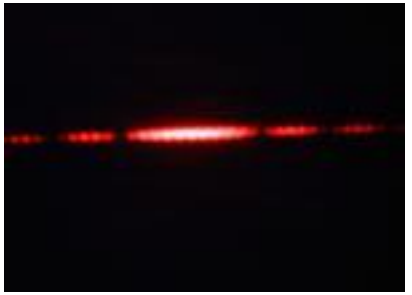
אור – גל!



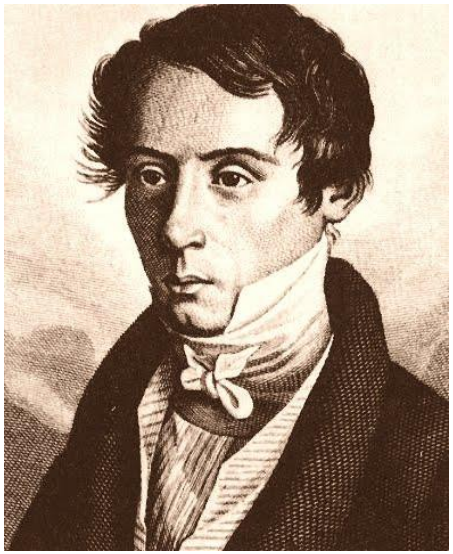
תומס יאנג, אנגליה
(1773-1829)



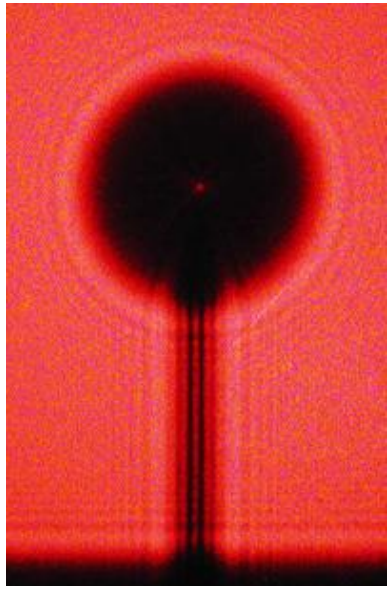


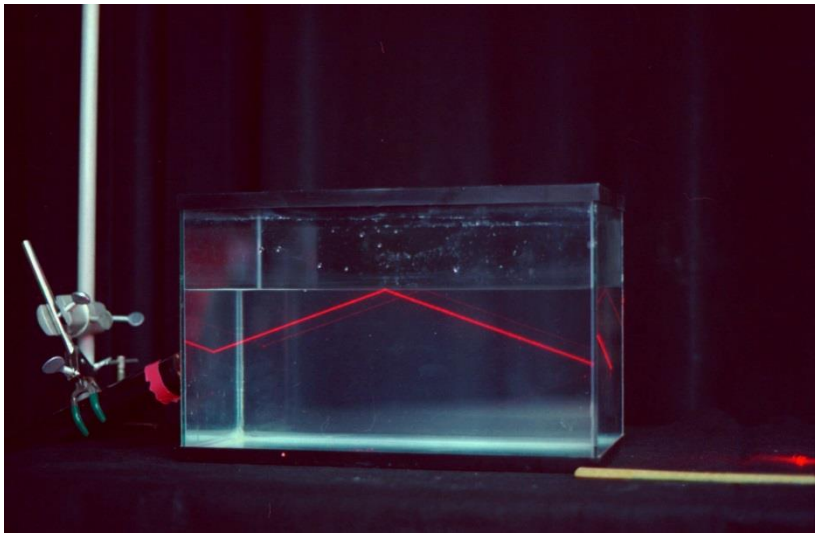


אור –גל!!



אוגוסטין-זאן פרנל,
צרפת (1788-1827)



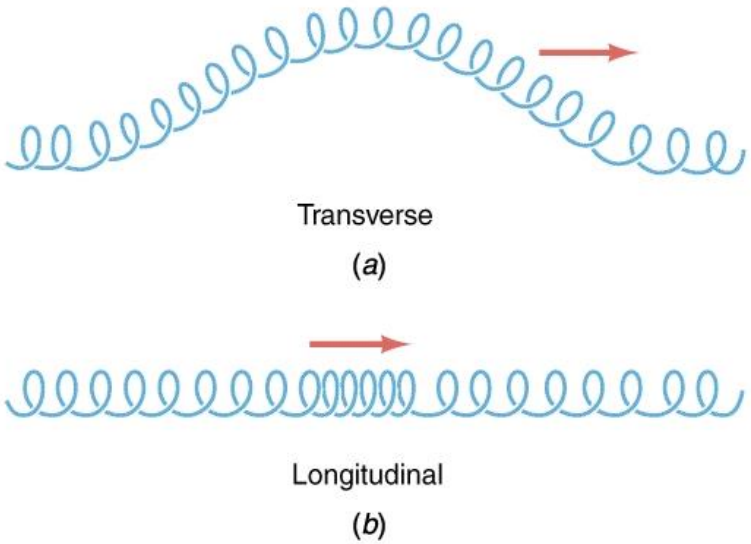


ועדיין – איזה מין גל?

במדיום אחיד יתכנו גלים אורכיים (כמו גלי קול)

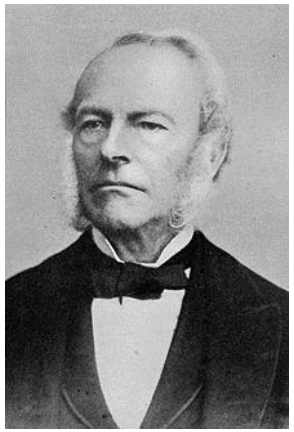
אם כך, ה"אתר" צריך להיות מוצק...

ואז, האם אי אפשר למדוד אותו (למשל, חיכוך)?



פרנץ נוימן, גרמניה
(1798-1895)

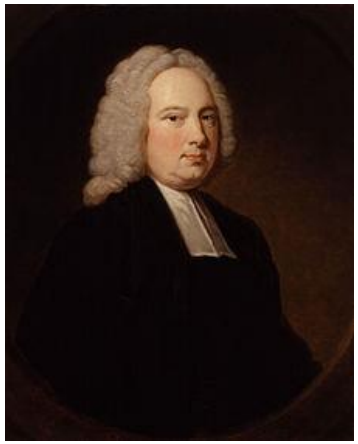
סימאון פויסון, צרפת
(1781-1840)



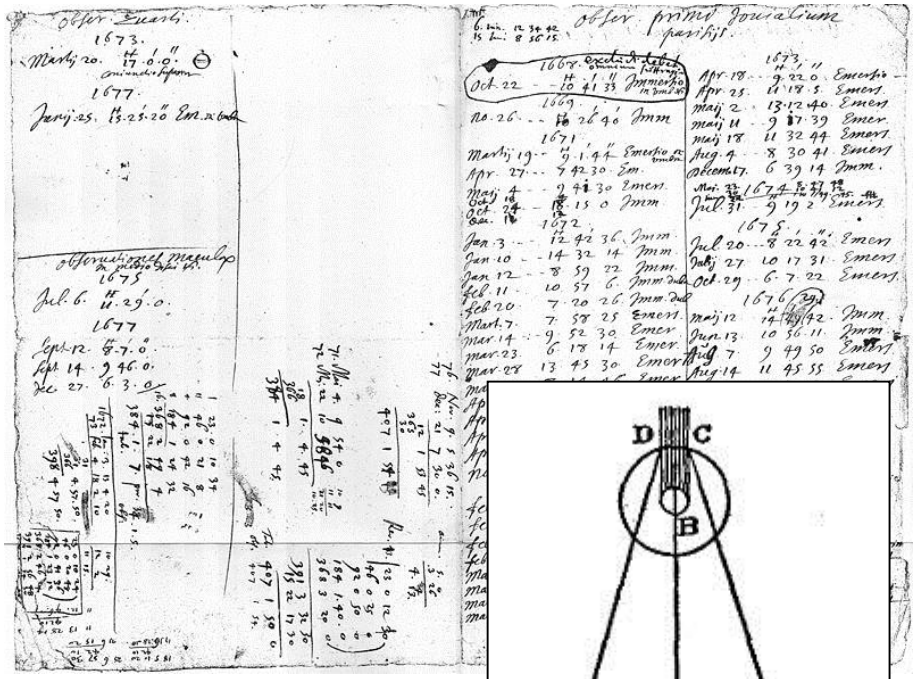
ג'ורג' סטוקס, אנגליה
(1819-1903)

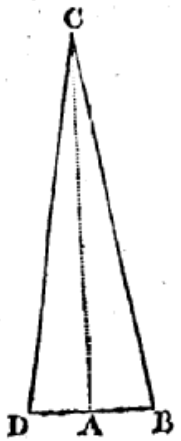
דגרסיה – מהירות האור

אולה רומר, דנמרק
(1644-1710)



ג'יימס ברדלי, אנגליה
(1693-1762)





I con These Particulars being sufficient for my present
lowing Purpose, I shall not detain you with the Recital of
be a R any more, or with any farther Explication of these. It
cularly may be time enough to enlarge more upon this Head,
the Ey when I give a Description of the Instruments &c. if
must a that be judged nec
whethe find, what I now a
or in ar ter my self it will)
moving pothesis. I have pu
is prop great Moment, and
city th Circle, and not an
Eye, a *Calculus*, which a
ing fro sensibly differ from
moves ly in those Consequ
from the foregoing Hypothesis.

sented in the *Fig.*) This therefore being 20″, 2, AC will be to AB, that is, the Velocity of Light to the Velocity of the Eye (which in this Case may be supposed the same as the Velocity of the Earth's annual Motion in its Orbit) as 10210 to One, from whence it would follow, that Light moves, or is propagated as far as from the Sun to the Earth in 8′ 12″.

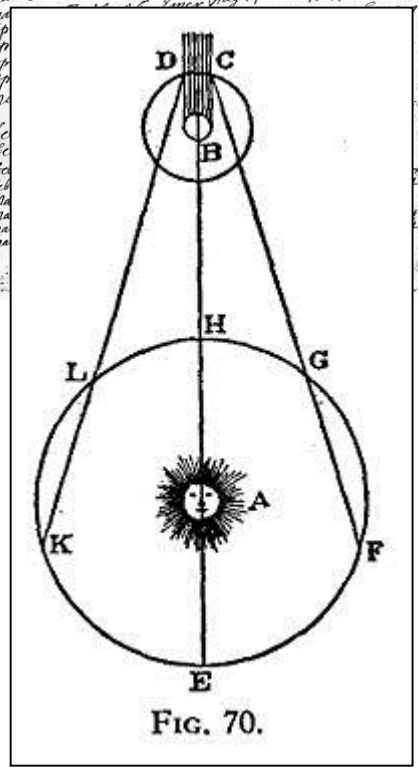
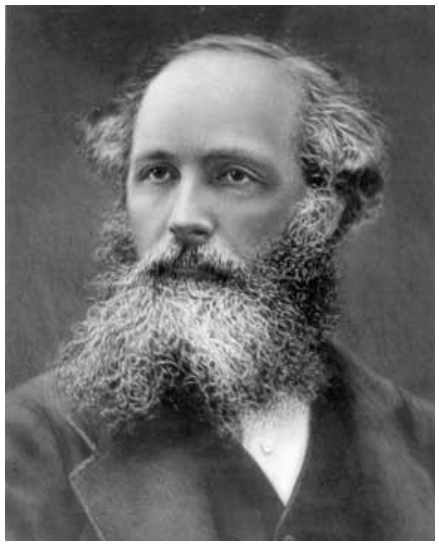
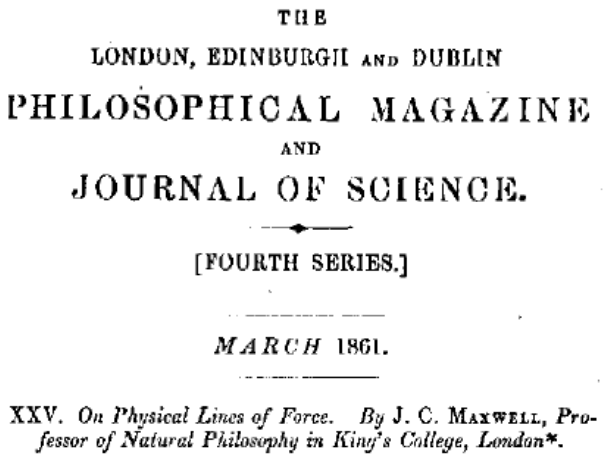


FIG. 70.

אור – גל אלקטרומגנטי



ג'יימס מקסוול, אנגליה
(1831-1879)



THE
LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FOURTH SERIES.]

MARCH 1861.

XXV. *On Physical Lines of Force.* By J. C. MAXWELL, *Professor of Natural Philosophy in King's College, London*.*

התגלית של מקסוול:

קיים פתרון של גל אלקטרו-מגנטי מתקדם שמהירותו (הנקבעת על ידי קבועים ידועים) בריק שווה למהירות האור המוכרת ממדידות אחרות!

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

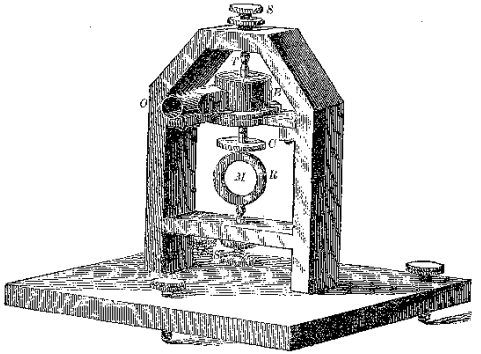
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

סוף תאורית ה"אתר"

אלברט מייקלסון,
ארה"ב (1852-1931)

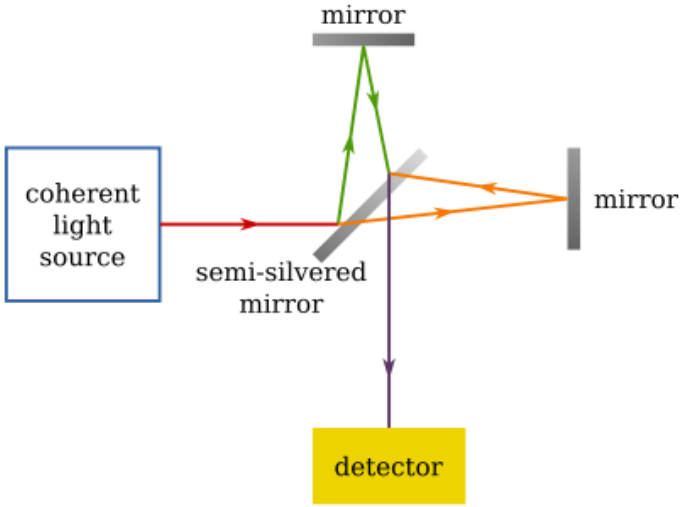
אדוורד מורלי, ארה"ב
(1838-1923)

מדידה מדויקת של מהירות האור שעל פיה
ה"אתר" נע במהירות הנמוכה ממהירות
התנועה של כדור הארץ (ללא תלות בעונה)

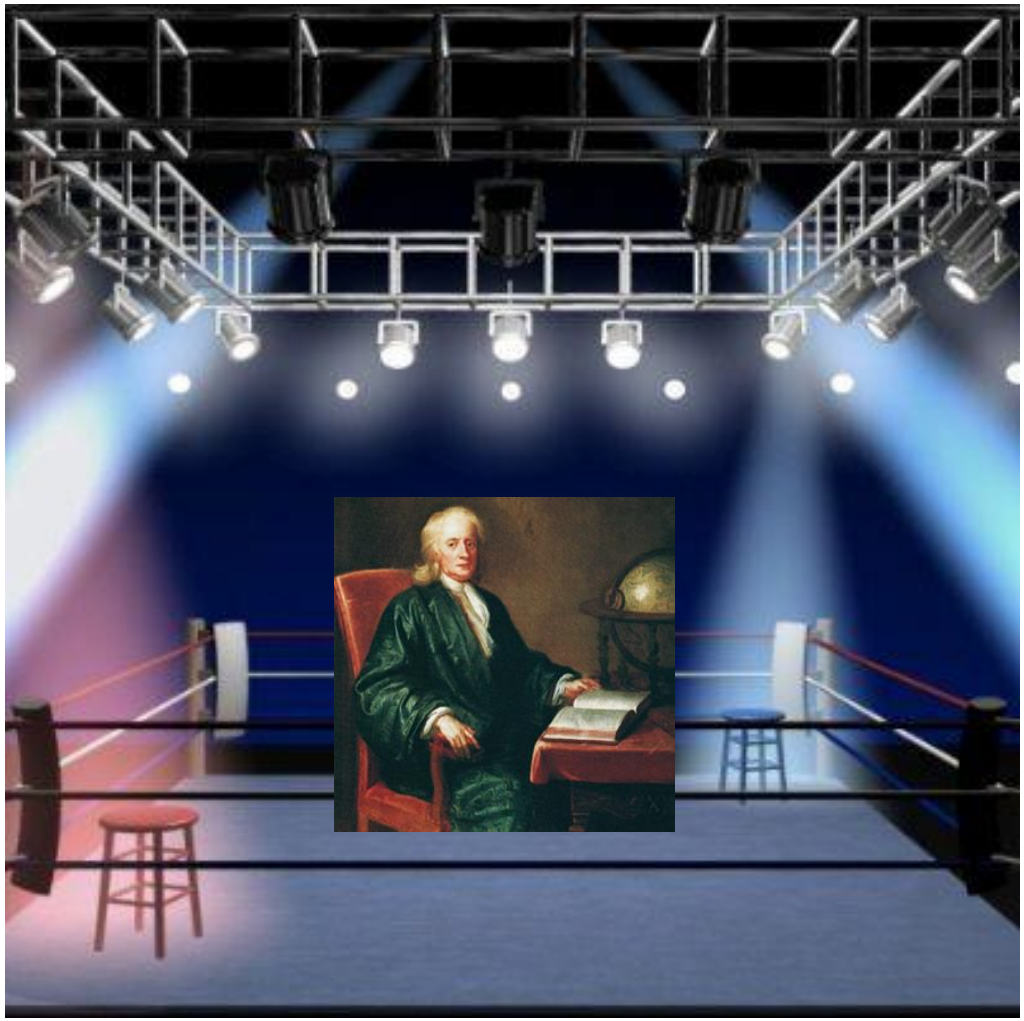


Professor Michelson's brilliant adaptation of the laws of light interference has, however, perfected a group of measuring instruments, the so-called interferometers, based on those laws, which previously only had occasional uses

(מתוך הכרזת פרס נובל בפיסיקה, 1907)



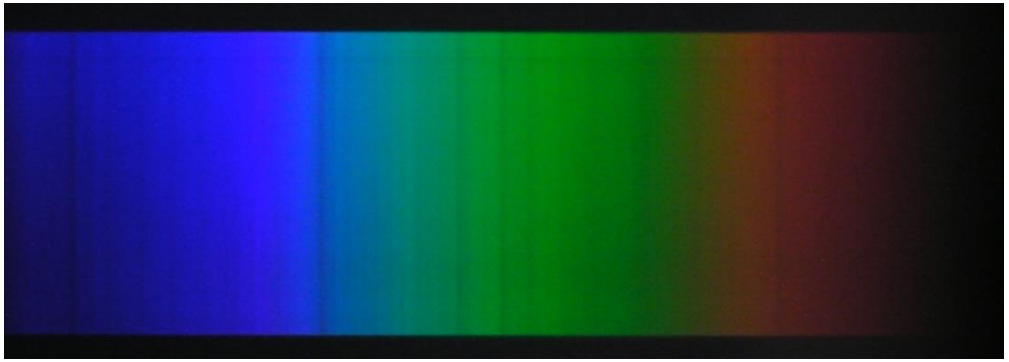
ניצחון התאוריה הגלית של האור



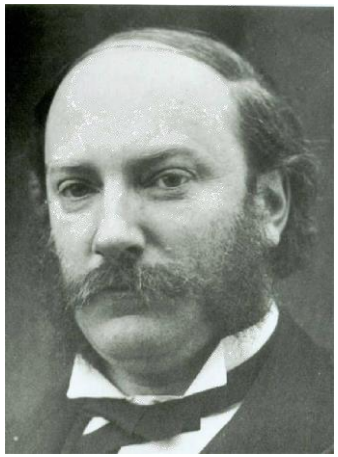
1881

אור – האמנם גל?

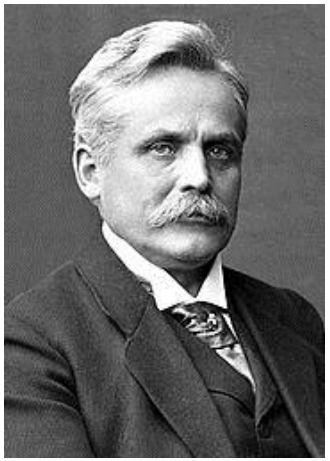
יוזף פרנהופר, גרמניה
(1787-1826)



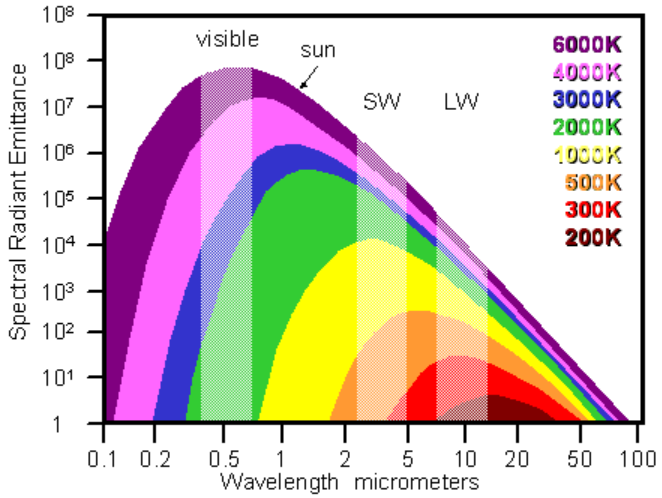
ספקטרום השמש כפי שהוא נראה מכדור הארץ



לורד ריילי, אנגליה
(1842-1919)

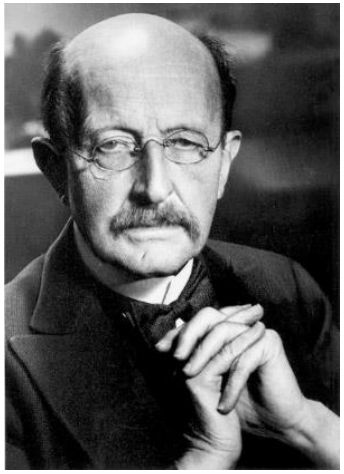


וילהלם וין, גרמניה
(1864-1928)

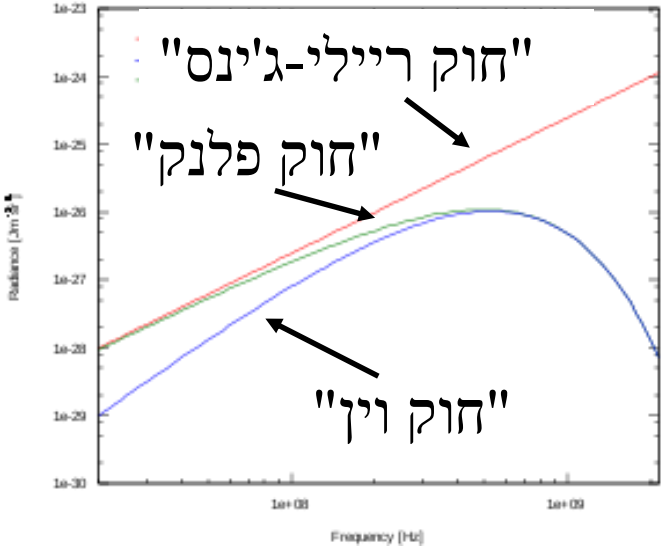


ספקטרום של "גוף שחור"

אור – חלקיק וגל?



מקס פלנק, גרמניה
(1858-1947)



$$E=h\nu$$

… The other constant, the so-called Planck constant, proved, as it turned out, to be of still greater significance, perhaps, than the first. The product *hν*, where *ν* is the frequency of vibration of a radiation, is actually the smallest amount of heat which can be radiated at the vibration frequency *ν*. This theoretical conclusion stands in very sharp opposition to our earlier concept of the radiation phenomenon …

(מתוך הכרזת פרס נובל בפיסיקה, 1918)

אור – גם חלקיק וגם גל!

אלברט איינשטיין,
גרמניה (1879-1955)

פיליפ לנארד, גרמניה
(1879-1955)

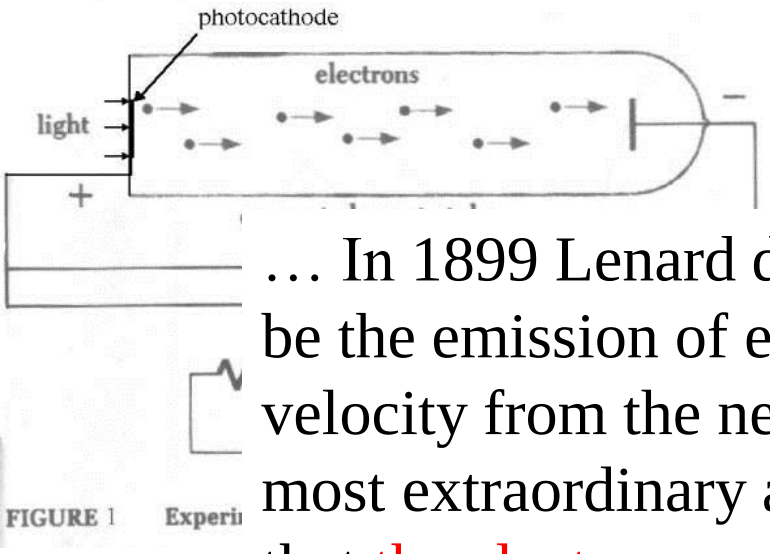


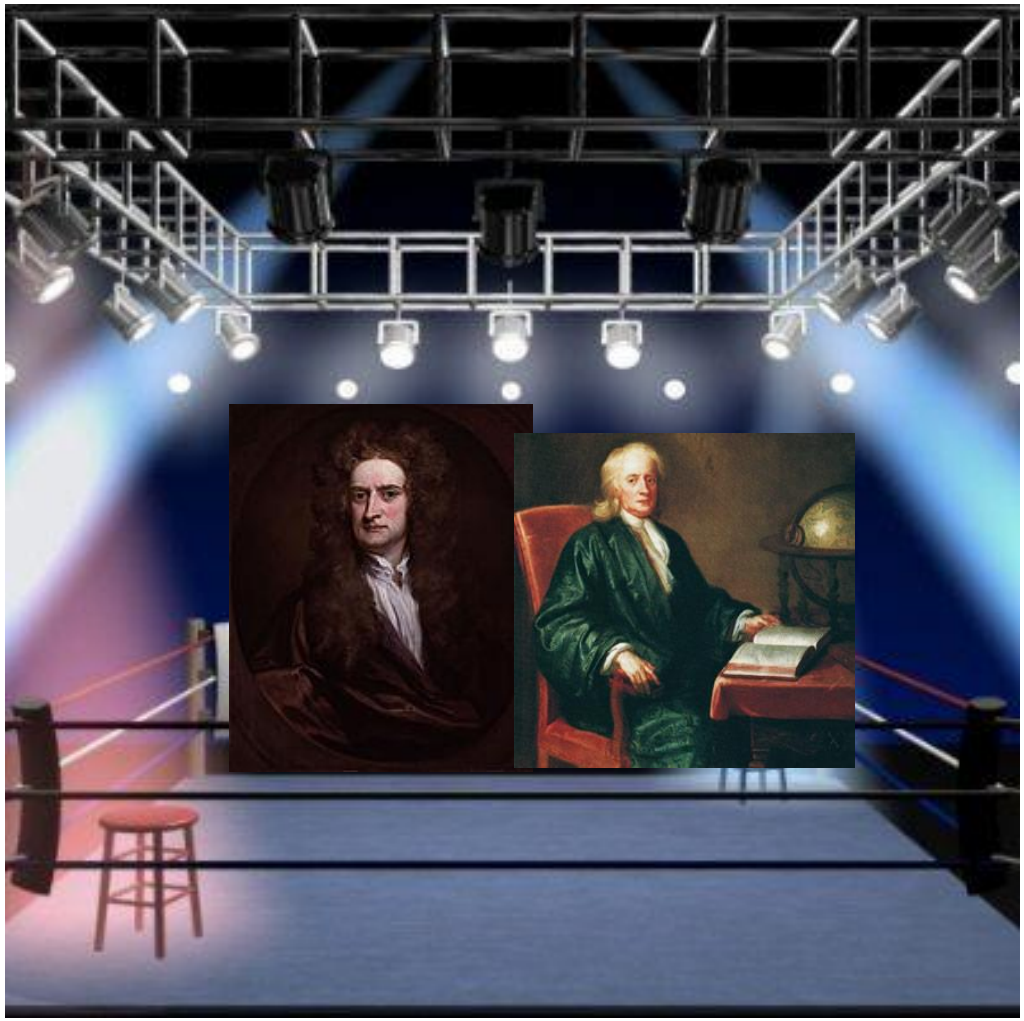
FIGURE 1 Experi

"האפקט הפוטואלקטרי"

… In 1899 Lenard demonstrated the cause to be the emission of electrons at a certain velocity from the negatively charged body. The most extraordinary aspect of this effect was that the electron emission velocity is independent of the intensity of the illuminating light, which is proportional only to the number of electrons, whereas the velocity increases with the frequency of the light. Lenard stressed that this phenomenon was not in good agreement with the then prevailing concepts …

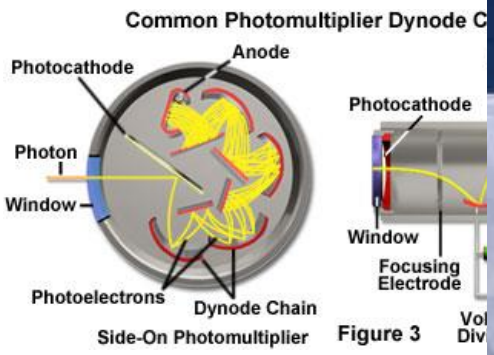
(מתוך הכרזת פרס נובל בפיסיקה, 1921)

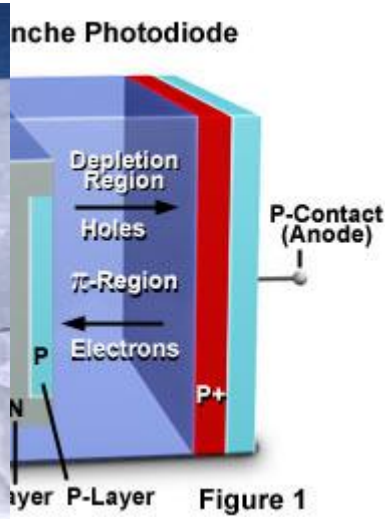
תחילת עידן מכניקת הקוונטים

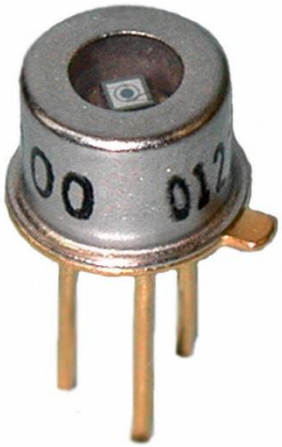


1905

איך מגלים פוטון בודד





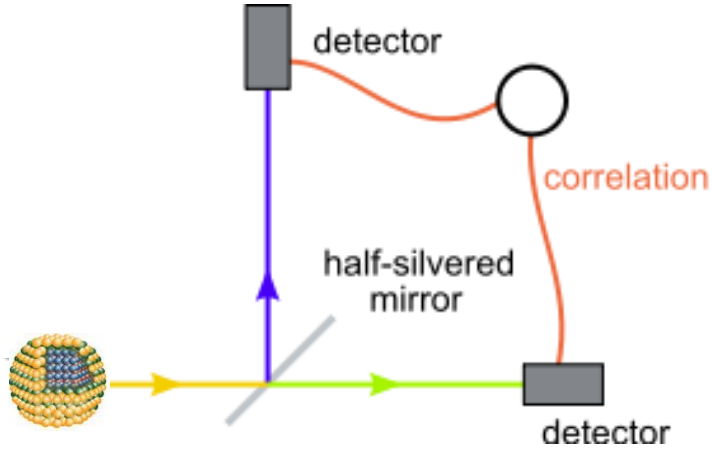


פוטונים נפלטים אחד אחד

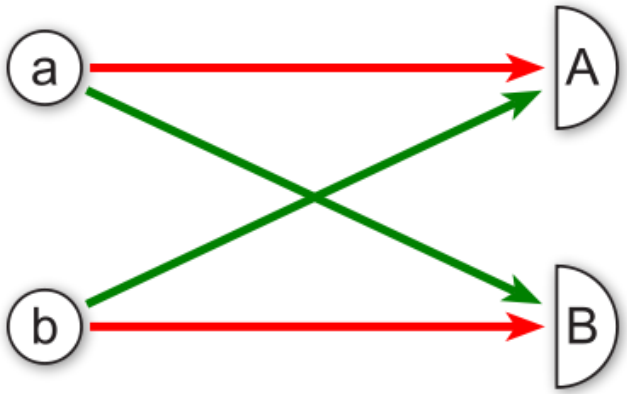
1046 NATURE November 10, 1956 Vol. 178

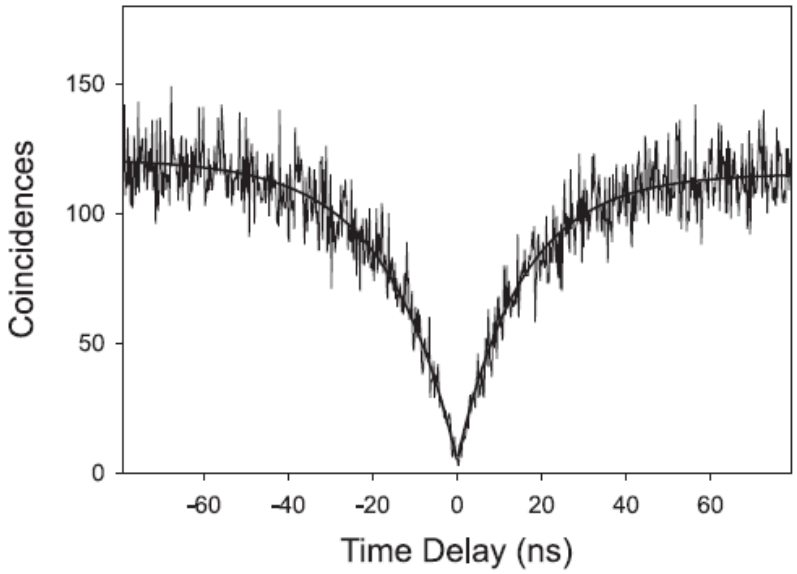
A TEST OF A NEW TYPE OF STELLAR INTERFEROMETER ON SIRIUS

By R. HANBURY BROWN
Jodrell Bank Experimental Station, University of Manchester
AND
Dr. R. Q. TWISS
Services Electronics Research Laboratory, Baldock



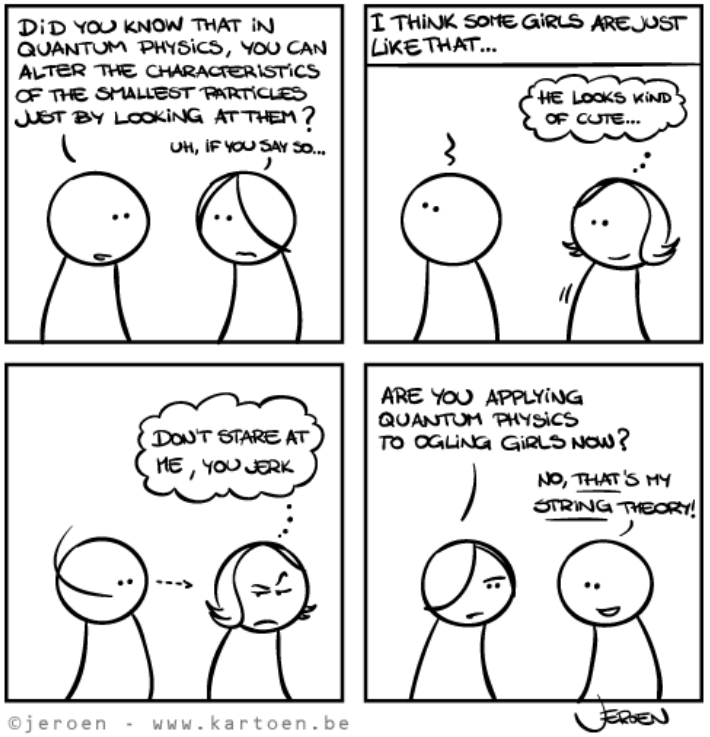
כדי להבין תופעות של פוטונים
בודדים יש למדוד קורלציות!





דגרסיה - עיקרון אי הודאות

ורנר הייזנברג, גרמניה
(1901-1976)



$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

of Heisenberg's
ne rule set out by
lationship between
the position coordinate and the velocity of an
electr
introc
calcu

© 2003 United Feature Syndicate, Inc.

ריאליזם לוקאלי? פרדוקס EPR

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

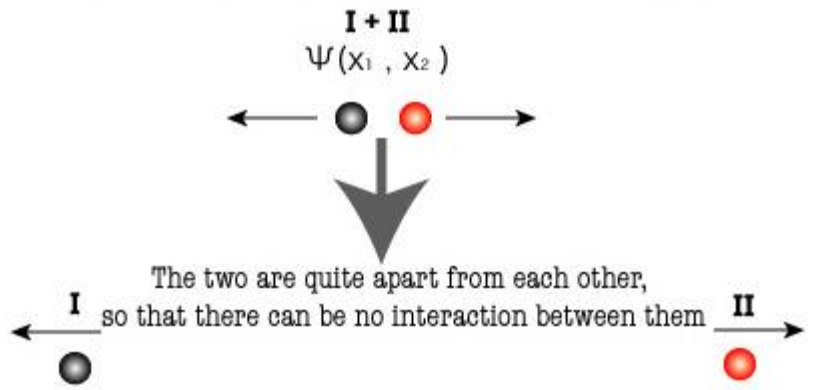
Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

From this follows that either (1) *the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete* or (2) *when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality.*

While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.



אם יש "מציאות" ולוקליות, מכניקת הקוונטים מובילה לסתירה!

אי השויון של בל

Number(A, not B) + Number(B, not C) >= Number(A, not C)

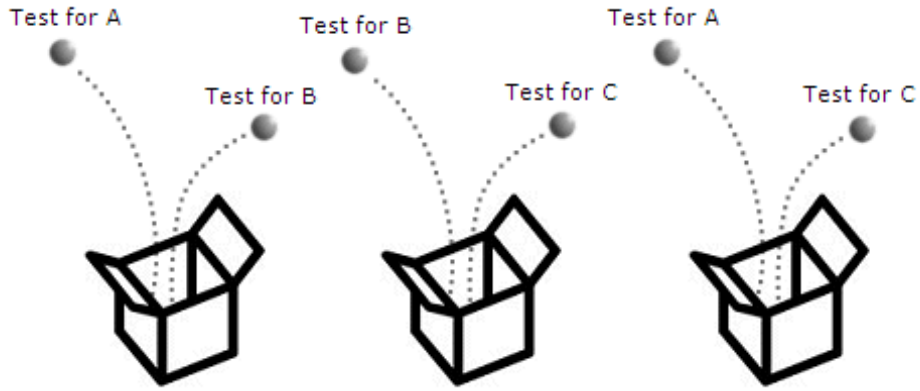
ג'ון בל, אירלנד
(1928-1990)

A: גבר \ אישה

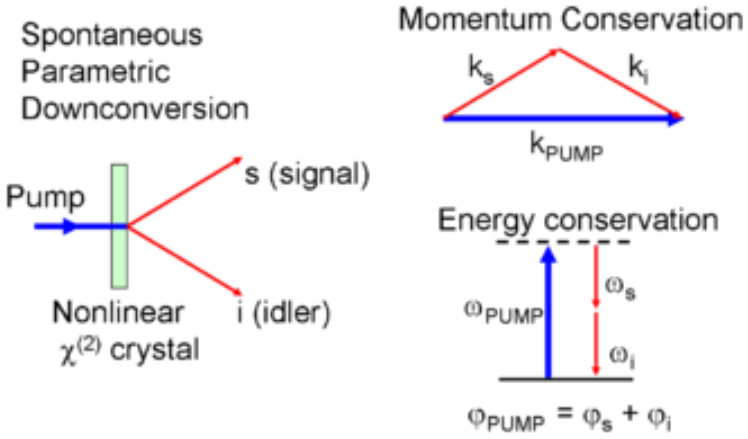
B: גבוה \ נמוך — מספר הגברים הנמוכים + מספר הגבוהים (גברים+נשים) הכהים גדול

C: בהיר \ כהה — ממספר הגברים הכהים

האם אי השויון יתקיים גם עבור אובייקטים קואנטיים (במובן סטטיסטי)?



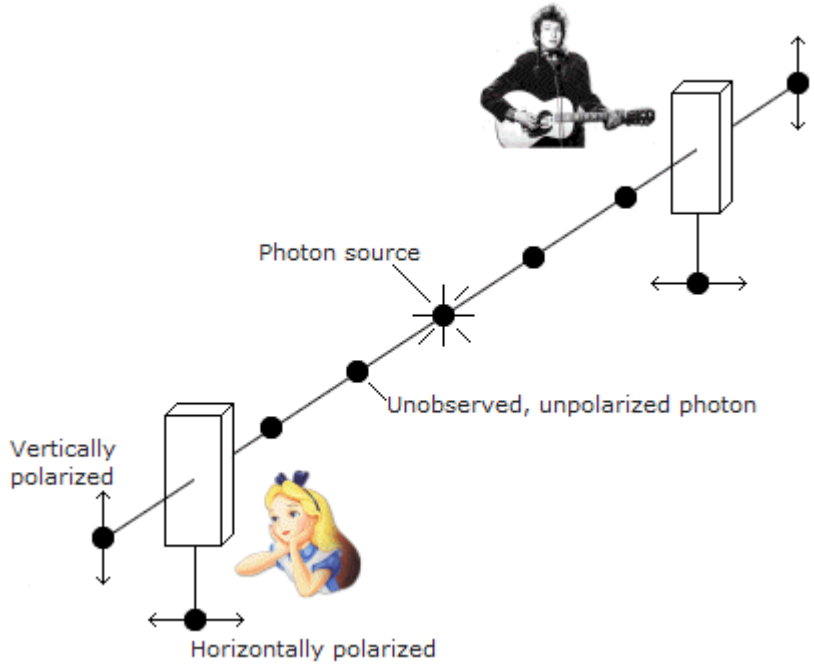
פוטונים "שזורים"



אם בין הפוטונים יש קשר הקובע את תכונות הזוג, אבל לא ניתן להפריד אותו לתכונות של כל אחד בנפרד, הם נקראים "שזורים" (entangled).

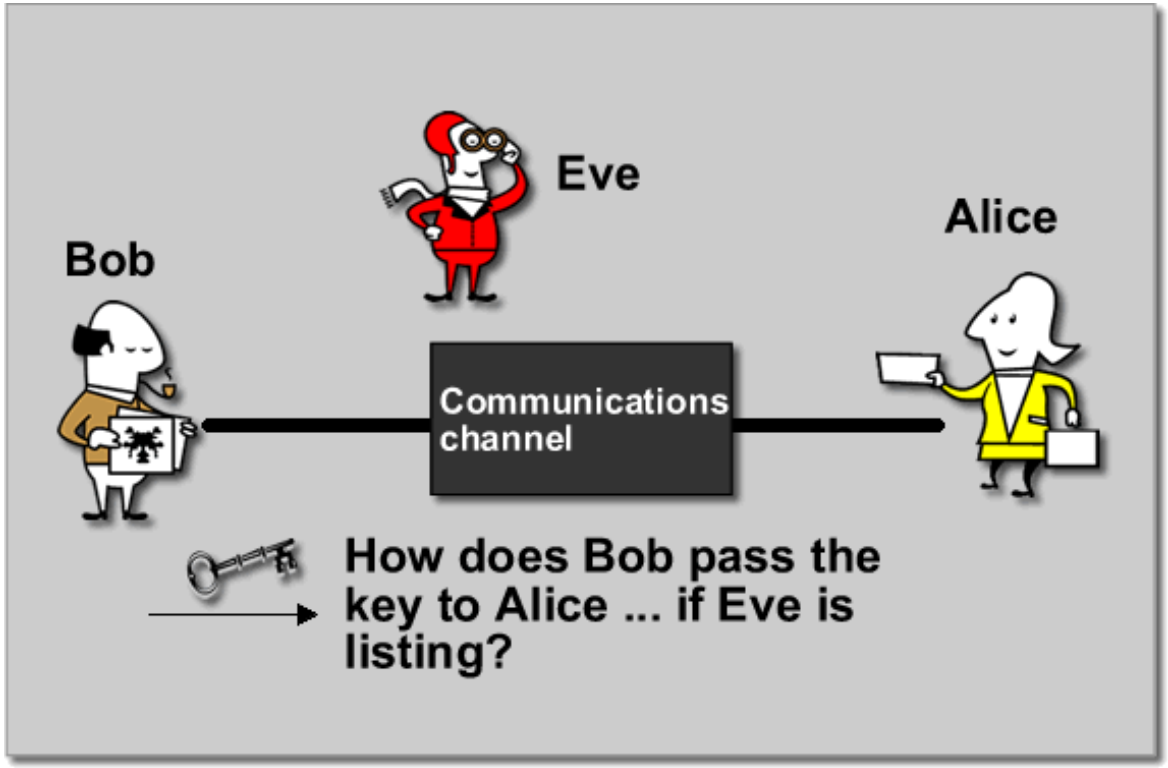
באמצעות SPDC ניתן לייצר פוטונים זהים בקיטוב שזור

$$|\uparrow\rightarrow\rangle + |\rightarrow\uparrow\rangle$$



מהניסויים מתקבל שאי-שויון בל אינו מתקיים עבור זוגות שזורים

אפליקציות בהצפנה



היתרונות של שימוש בפוטונים בודדים:

האזנה משנה את המידע

No cloning theorem

פרוטוקולים "קלאסיים" מבוססים על אלגוריתם שקשה להפוך אותו (RSA)

אפליקציות בהצפנה

פרוטוקול BB84 לתקשורת קואנטית מוצפנת

1.	↺	↕	↻	↔	↕	↕	↔	↔	↻	↺	↕	↻	↺	↺	↕
2.	+	○	○	+	+	○	○	+	○	+	○	○	○	○	+
3.	↕		↻		↕	↺	↺	↔		↕	↻	↻		↺	↕
4.	+		○		+	○	○	+		+	○	○		○	+
5.			√		√			√				√		√	√
6.			↻		↕			↔				↻		↺	↕
7.			1		1			0				1		0	1

Fig. 1. Basic quantum key distribution protocol.

1. Alice sends a random sequence of photons polarized horizontal (↔), vertical (↕), right-circular (↻) and left-circular (↺);
2. Bob measures the photons' polarization in a random sequence of bases, rectilinear (+) and circular (○).
3. Results of Bob's measurements (some photons may not be received at all).
4. Bob tells Alice which basis he used for each photon he received;
5. Alice tells him which bases were correct;
6. Alice and Bob keep only the data from these correctly-measured photons, discarding all the rest.
7. This data is interpreted as a binary sequence according to the coding scheme ↔ = ↺ = 0 and ↕ = ↻ = 1.

סיכום (או בעצם התחלה)

בתשובה לשאלה "מהו בדיוק אור" יש עדיין חלקים חסרים!

אור מתפשט לפי חוקי הגלים, אבל האינטראקציה שלו עם חומר נקבעת לפי החוקים (המוזרים) של מכניקת הקואנטים.

לאור קואנטי יש כבר מספר אפליקציות מעשיות (הצפנה, יצירת מספרים אקראיים)

אור קואנטי הינו אחד המרכיבים הבסיסיים במיחשוב קואנטי