

הרומנטית

פיזיקה וכימיה

נאסף ונערך בעברית ע"י פרופ' צבי קם

המאה ה-19, המאה הרומנטית

מדוע רומנטית – בהשאלה מהספרות השירה והמוזיקה, אך גם בגישה לחקר הטבע:
דגש על ביולוגיה תיאורית, סווג מיני חיים וצומחים,

בפיזיקה:

לורנץ – גאות ושפל
טסלה – חלוקת חשמל בגלי רדיו
מקסוול – התורה האלקטרומגנטית
שימושי הטכנולוגיה באמריקה – גרהם בל, מורס, טומס אדיסון

פיזיקה

המאה ה-19 בפיזיקה

מכאניקה: ביסוס מתמטי של הפיזיקה הקלאסית: המילטון, הילברט, מינקובסקי, לורנץ, ד'למבר

חשמל: ביסוס מתמטי של תורת השדות החשמליים:
הבטריה: וולטה, דייוי,

אור וחשמל: פיזו, פראונהופר, פרנל, וולסטון, מייקלסון-מורלי, פואסון, ריילי,
ארסטד, אוהם, פרדיי, הנרי, בייר דופלר, מקסוול, ריטר, טסלה, גיבס
גאזים: בויל, גיי-לוסק, אבוגדרו, דלתון, ואן-דר-וואלס,
טרמודינאמיקה: קרנו, וואט, גאול, קוריווליס, הלמהולץ, קלווין, קלאוזיוס, קלפירון,
גיבס, בולצמן, מקסוול, נרנסט
נוזלים: פואסיי, סטוקס, וונטורי, לפלס, פלטו,

לידת הפיזיקה האטומית המודרנית:
מבנה האטום: רנטגן, בקרל, פלנק, רטרפורד, קירי, טומסון, פלנק, בולצמן, זימן,

החשמל, השטח שהתפתח תודות לבטריה, הופך לתשתית יסודית במאה הטכנולוגית:
הוא מאפשר גילוי יסודות כימיים חדשים (אלקטרוליזה), גילוי האטום ומרכיביו (שפורפרות ריק)
שהביא למכאניקה הקוונטית, והופך למשאב מרכזי בו תלויים רוב יישומי הטכנולוגיה
המודרנית.

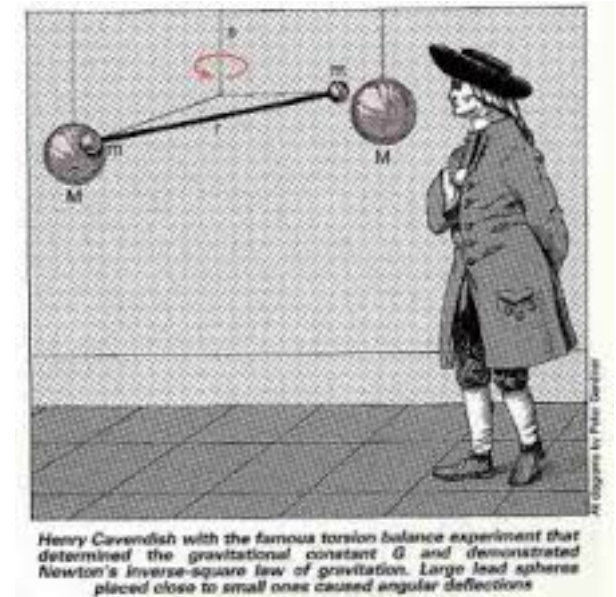
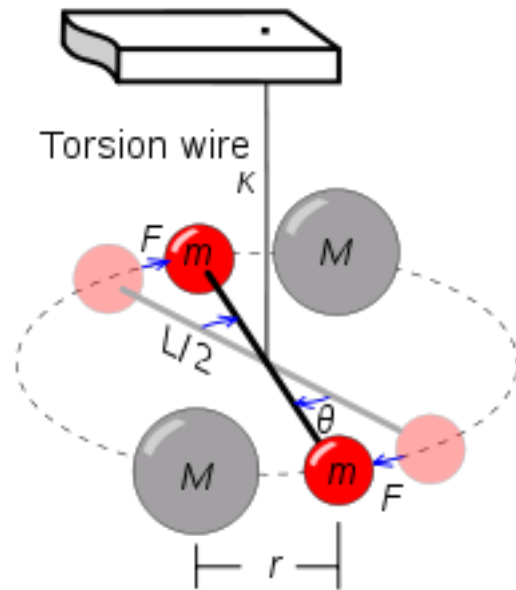
מכאניקה

William Cavendish 7th Duke of Devonshire 1731–1810

היה איל פלדה עשיר, ומדען מחונן באנגליה הויקטוריאנית שתרם 6,300 פאונד להקמת מעבדה שנקראה על שמו.

מהשגיו: בידוד "אוויר דליק" – מימן – מתגובות מתכות וחומצות, ויצר מים מחדש בבעירתו. שקל בדיוק רב גאזים. אי-התאמות במשקל התבררו כ"זיהומים" ע"י הגאז ארגון, שהתגלה ע"י רמזי וריילי).

1798 הנסיון הידוע ביותר של קוונדיש הוא מדידת קבוע הגראויטציה ע"י מאזני פיתול שבנה בעקבות John Michell 1724–1793 .

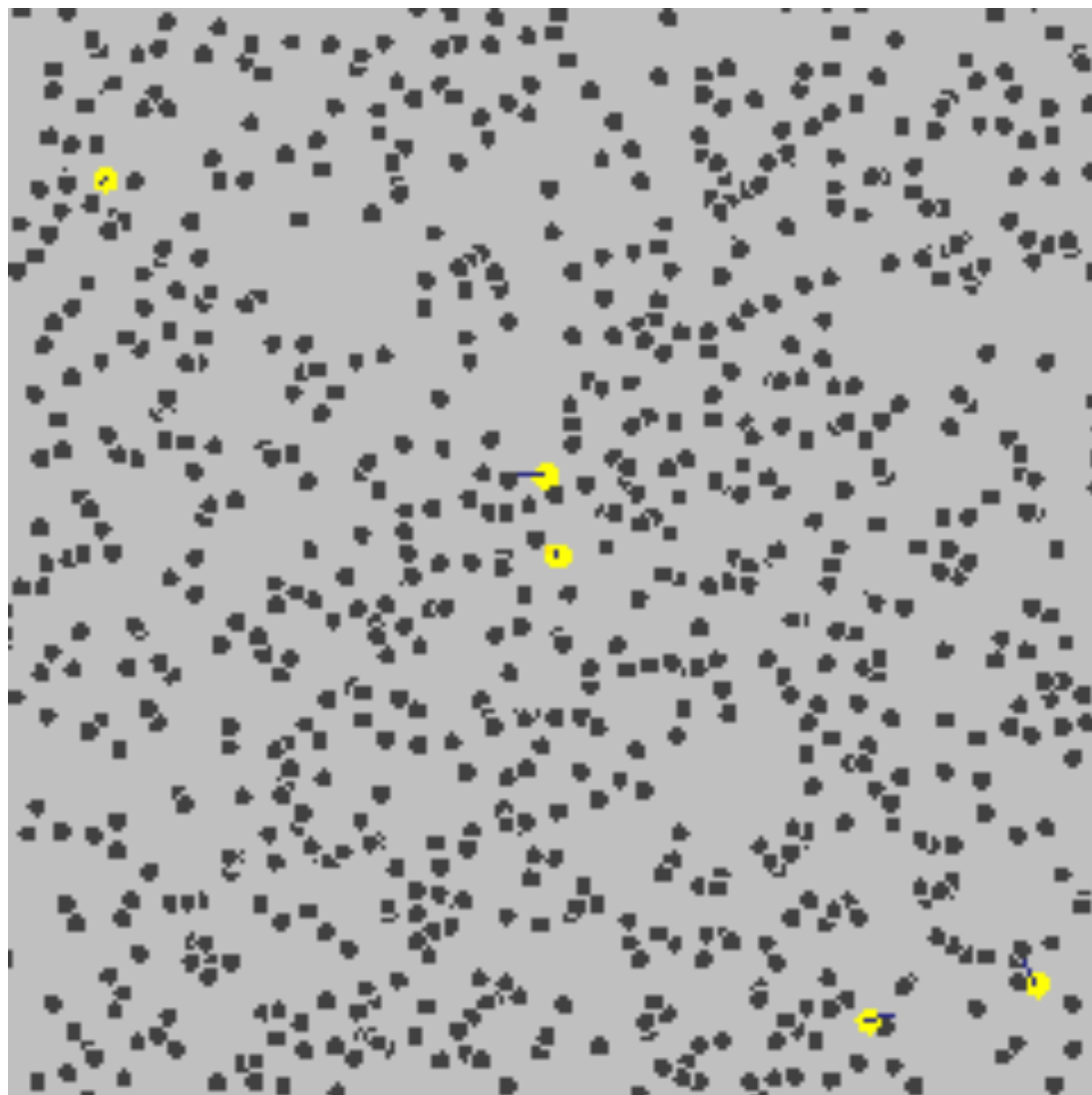


1874 הוקמה מעבדת קוונדיש בקמברידג' שמנהליה ומדעניה במשך השנים היו מקסוול, ריילי, טומסון (אלקטרון), רטרפורד (התפרקות גרעינית), ברג (דיפרקציה של קרני x מגבישים), וילסון (תא עננים), אסטון (איזוטופים), צ'דוויק (ניוטון), ווטסון וקריק (מבנה DNA).

29 מחוקרי המעבדה קיבלו פרסי נובל.

Robert Brown

1827 בראון מגלה במיקרוסקופ שחלקיקים קטנים (אבקנים) המרחפים בנוזל נמצאים בתנועה מתמדת - תנועה בראונית. כביולוג בדק שלא מדובר בתנועה של חיים. הוסבר ע"י התורה האטומית ע"י איינשטיין ב-1914





Gaspard-Gustave de Coriolis 1792 – 1843

תרם לקשר בין "עבודה" לאנרגיה קינטית.

1835 חוקר תיאורטית את יעילות מעבר תנע בגלגל מים.

1838 ידוע בגין כוח קוריוליס ה"פועל" על גוף נע במערכת מסתובבת.

הוא כח מדומה מאחר ובמערכת המסתובבת גופים "כאילו" סוטים

מהתנועה בקו ישר (רדיאלי) עקב הכוח הצנטריפטאלי. הוא משפיע

למשל בגין סיבוב כדור הארץ על תנועת רוחות בכוון ימין בחצי הכדור

הצפוני, ושמאל בחצי הדרומי. בניגוד למקובל – כוון עירבול המים היוצאים מהאמבטיה אינו

קשור בכוח קוריוליס מאחר והוא זניח. הוא פועל אנכית למהירות ולציר הסיבוב. זו דוגמא

יפה לשקילות בין כח לתאוצה במערכות לא אינרציאליות.

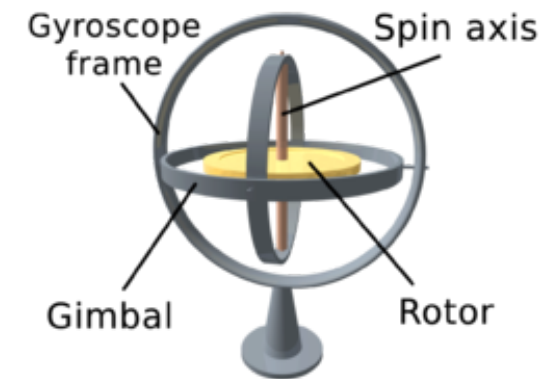
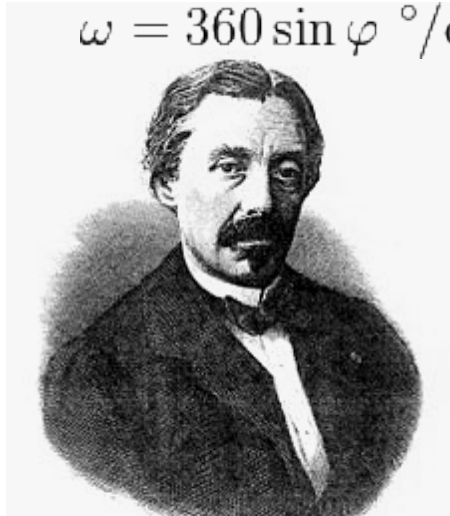
$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}$$

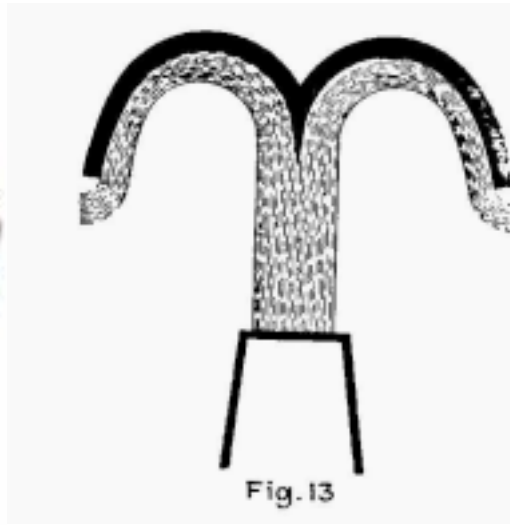


Jean Bernard Léon Foucault 1819 – 1868

1851 פוקו מדגים סיבוב הארץ ע"י פרצסיה של מישור התנודה של "מטוטלת פוקו" שתלה מתקרת הפנתיאון בפריז. על תייל באורך 67 מטר תלה כדור של 28 ק"ג. המטוטלת הועברה למוזיאון ל"אמנויות ואומנויות" **Arts et Métiers**

בקוטב הצפוני המטוטלת מסתובבת בכוון השעון בדיוק ביום. בקטב הדרומי בכוון הפוך לשעון. בקו המשווה מישור התנודה קבוע. בקו רוחב φ הסיבוב ביום: $\omega = 360 \sin \varphi^\circ / \text{day}$ למשל בקו רוחב 30 המטוטלת תסתובב סיבוב שלם ביומיים. אפשר לחשוב על סיבוב המטוטלת כאילו פועל עליה כוח קוריוליס. לליאון פוקו מיוחס הגירוסקופ והוא גילה זרמי אדי eddy currents





Lester Pelton

1879 טורבינת פלטון

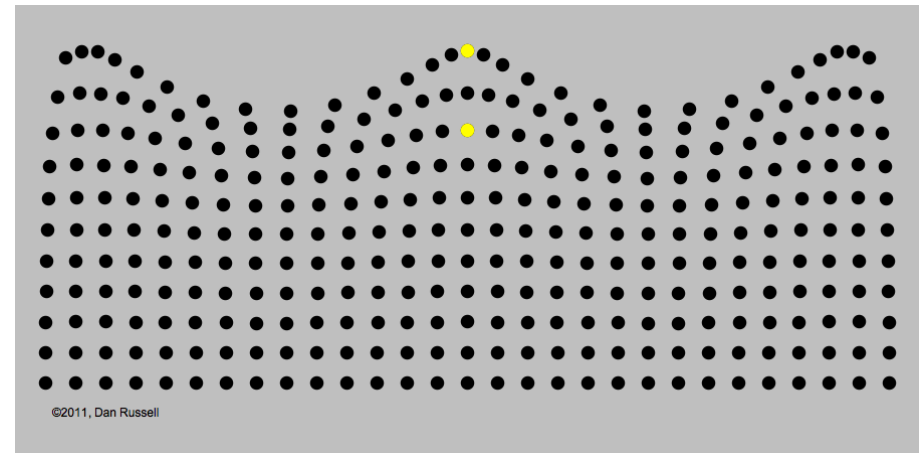
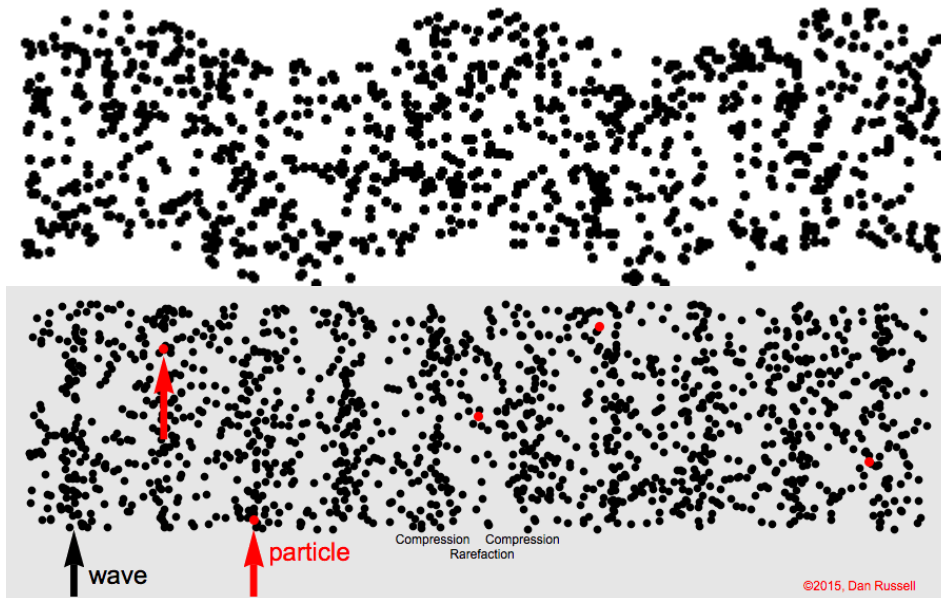
בניגוד לטורבינות מים קודמות
הנצילות כאן גבוהה כי התנע
של זרם המים המוחזרים הפוך
למוזרקים, שינוי תנע מירבי
אפשרי הנותן כוח מירבי על ציר
הטורבינה.

דוגמא נהדרת לניצול ידע בסיסי במכאניקה להנדסה שימושית.

אלסטיות של מוצקים

התיאוריה של כוחות, עוותים ומאמצים בחמרים ושל התפשטות גלים (גלי קול) בתווך התפתחה המשך 250 שנה מאז גיליאנו (ראה השקף הבא)

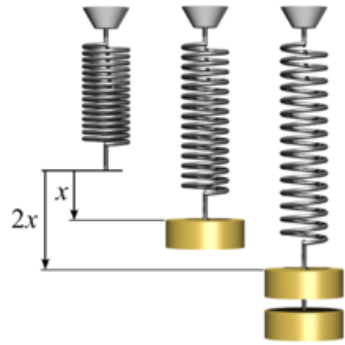
בנוזלים וגאזים אין מאמצי גזירה ולכן יש רק גלים אורכיים. במוצק גם רחביים.
בגלל שלמות התיאוריה באה המצאת האתר כתווך בו מתפשט גל האור וגם מוחזר ונשבר במעבר בין תווך לתווך. האתר תואר כנוזל הממלא את העולם, (גם חום קושר לנוזל - הקלוריק) אך עם גילוי קיטוב האור הוכנסו תיקונים "דמויי" מוצק לתכונות האתר...



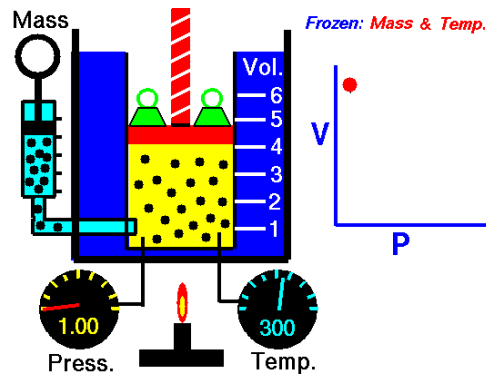
Boltzmann

1874 מכניס זכרון לעוותים ומאמצים בחמר אלסטי. (היסטורזיס)

אלסטיות של מוצקים נוזלים וגאזים



Edme M



גליליי 1600: מניח שחמר בנוי מסיבים בלתי דחיסים (אך ניתן לכיוף).

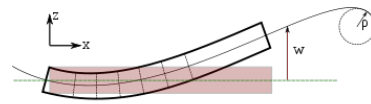
חוק הוק 1678: כוח יחסי להתארכות קפיץ: $F=kx$

חוק בויל-מריוט 1662: $pv=\text{const}$

בדחיסת נפח נוזל אלסטי פי-n עולה האלסטיות שלו פי-n

מריוט-לייבניץ: סיבי החמר מתארכים ומתכווצים בכוח.

אוילר-ברנולי: כיפוף קורה מעוגנת



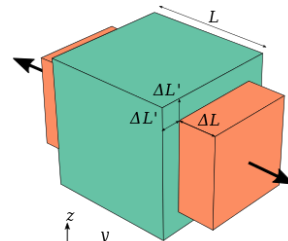
מוהר-קולומב 1773: קריטריון שבירת חמר Mohr+Coulomb

ג'יררד 1798: ספר המסכם את הידע על חוזק חמרים

יאנג מודולו 1807: מקשר בין מאמץ ועוות: $F/A = \epsilon dL/L$

נביאר, Navier

יחס פואסון: התרחבות אנכית לכוון לחיצה z



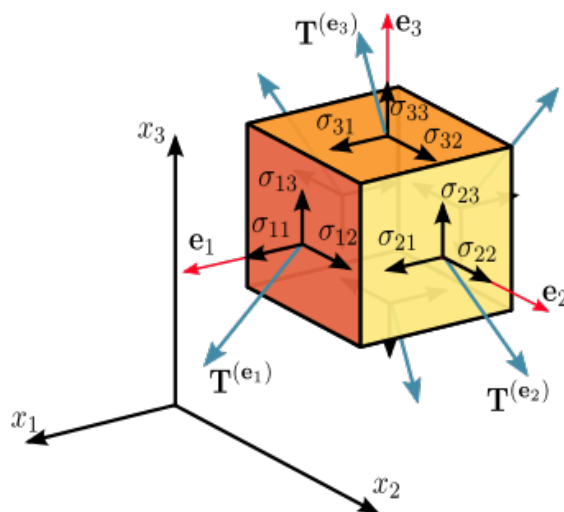
$$\nu = d\epsilon_x / d\epsilon_x$$

קושי-Augustin-Louis Cauchy:

(מאמצים ועוותים), טנזור אלסטיות

$$\mathbf{T}^{(n)} = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad \text{or} \quad T_j^{(n)} = \sigma_{ij} n_i.$$

המשוואה היא הבסיס ל-"FINITE Element Analysis" בעזרתה פותרים בעיות חוזק של מטוסים, בניינים וכו'



ובר Wilhelm Weber: גלי קול במיתרים ופלטות

(עבר לעבוד עם גאוס על מגנטיות)

David Hilbert I (1862-1943) Germany algebraic number theory, Euclidic geometry

Hilbert space, 23 problems, dictionary, basis theorem, zeros theorem.

למד באוניברסיטת קנינגסברג בגרמניה, שם הכיר את מינקובסקי.

על מאמר של תורת האינוריאנטים (גדלים כמו אנרגיה ותנע הנשמרים) כתב פאול גורדן

שזו "תיאולוגיה ולא מתמטיקה" **Paul Albert Gordan**

ב-1895 עבר בהשפעת פליקס קליין **Felix Christian Klein** (בקבוק קליין בטופולוגיה)

לגוטינגן-מרכז עולמי למתמטיקה, ושם נשאר עד מותו. עם עליית הנאצים היה עד להגליה

מגוטינגן של היהודים (והאישה היהודיה היחידה שהיתה פרופסורית, אמי נתר Emmy Noether)

(בתשובה לשאלת שר המדע הנאצי: איך המתמטיקה בגוטינגן אחרי הניקוי הארי מהיהודים,

ענה: אינה קיימת)

תרומתו הידועה ביותר: מרחבי הילברט, שעליהם התבססה המתמטיקה של המכאניקה

הקוונטית. הם מגדירים מרחב וקטורי מעל שדה שלם (כגון המספרים הממשיים) עם ממדים

סופיים או אין סופיים עם מכפילה פנימית (שתוצאתה סקלר) שמגדירה נורמה (מקביל

לפונקצית מרחק בין נקודות במרחב).

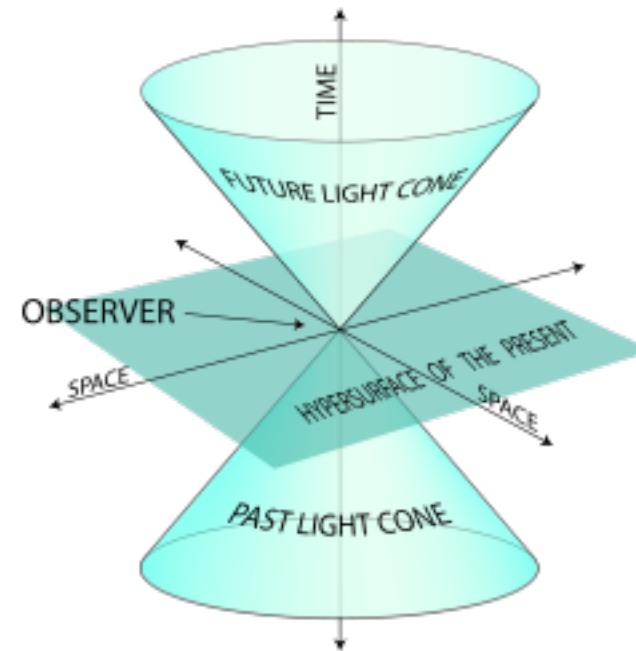


Herman Minkowski (1864-1909) Germany number theory

Minkovski's theorem, inequality

מרחב רב ממדי:

איינשטיין היה תלמידו והושפע ממנו כשתאר את המרחב-זמן ה-4 ממדי ביחסיות



William Kingdon Clifford

1876 מציע שתנועת גופים נובעת משינוי גיאומטריה המרחב

Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) Holland physicist

פיתח את המשוואה ה-4 ממדית בה השתמש איינשטיין לחישוב הטרנספורמציה מרחב-זמן בין מערכות אינרציאליות (הנעות זו כלפי זו במהירות v)
נובל עם זימן 1902

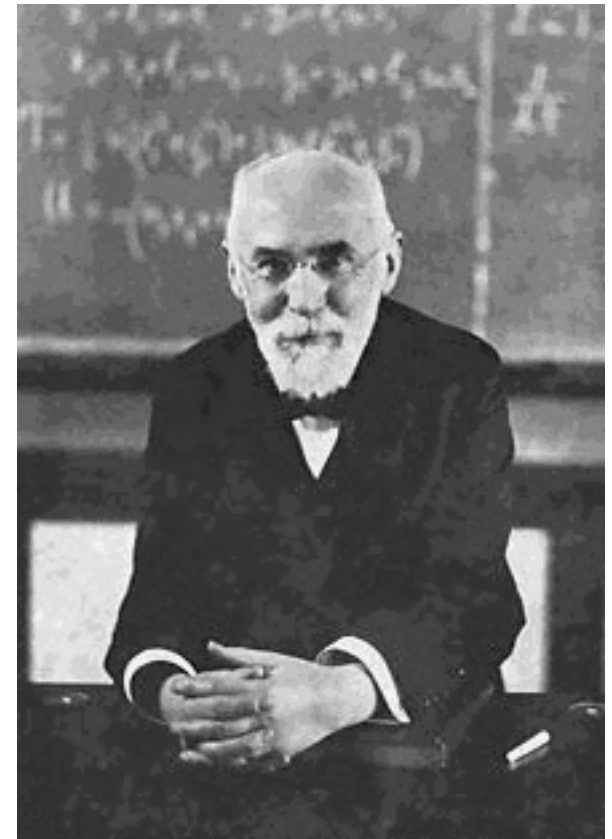
$$\begin{bmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

$$t = \gamma \left(t' + \frac{vx'}{c^2} \right)$$

$$x = \gamma (x' + vt')$$

$$y = y'$$

$$z = z',$$





William Roan Hamilton (1805-1865) Irland

graph theory, quaternion algebra, vector analysis
Hamiltonian , Hamiltonian path, Hamiltonian mechanics

1821 אנליזה של תנועה בעזרת המילטוניאן

1828 מפתח משוואת תנועה כללית לאופטיקה המקשרת קרני אור של קפלר לחלקיקים של יאנג.

1832 מסביר איך ההמילטוניאן כפונקציה של דרך אופטית המיושם לאופטיקת הגלים של פרנל. מנבא שבזוית מסויימת אור הנכנס לגביש דו-צירי ישבר לקונוס conical refraction ויצא כמעטפת גליל. החיזוי

אכן אושר נסיונית ע"י לוד Humphrey Lloyd

1833 עקרון פרמה שהאור נע בקרניים העוברות במסלול זמן מינימאלי מוביל את המילטון לעקרון הפעולה המינימאלית – תנועה נעשית במסלול שהוא יציב (סטציונארי) כלפי שינויים מקומיים קטנים.

זה מוכלל אח"כ גם לדינאמיקה – "מכאניקה של המילטוניאן" המבטאת את האנרגיה של מערכת דינאמית באמצעות מסלול רצוף במרחב הפאזות: קואורדינטות ותנע. תנועת המערכת היא פתרון המינימום של האנרגיה שהיא משתנה רצוף.

1835 המילטון מציג את המשוואה הקנונית לתנועה

פורמליזם חדש למכאניקה קלאסית ואלקטרומגנטיות:

עקרון הפעולה המינימאלית: לגרנז'יאן: האנרגיה הקינטית פחות הפוטנציאלי

$$L = T - V.$$

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L dt = 0.$$

מרחיב את עקרון ד'למבר D'Alembert מהמאה הקודמת.

$$\sum_i (\mathbf{F}_i - m_i \mathbf{a}_i) \cdot \delta \mathbf{r}_i = 0$$

המילטוניאן H מקיים משוואת תנועה
כאשר

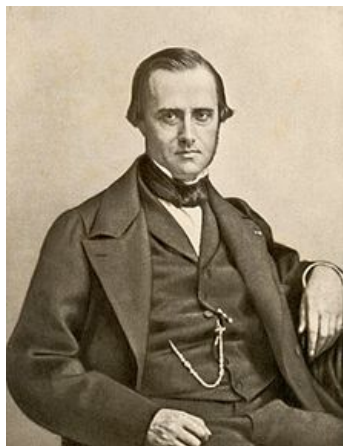
$$H + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

$$H = H \left(q_1, \dots, q_N; \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_N}; t \right)$$

$$S = S(q_1, q_2 \dots q_N, t)$$

ביטוי האנרגיה כפונקציה של q הקואורדינטות, p והתנע

תורת המילטון, עם כל הידורה, לא מצאה שימוש רב במכאניקה קלאסית, ולתצורה המתמטית הזו של המכאניקה היתה חשיבות אסטטית בעיקר. אך כמו שנראה בהמשך, תרומתה למכאניקה הקוואנטית היתה חשובה ביותר, מאחר וניסוח ההמילטוניאן התאים גם למכאניקה קלאסית, וגם לקוואנטית, למרות שרמות האנרגיה רצופות בקלאסי ובדידות בקוואנטי.



מכאניקה ואסטרונומיה

Édoard Albert Roche 1820–1883

1849 מחשב את המרחק המירבי של לוויין לכוכב לכת - הסבר לקוטר טבעות הירחים של כוכבי הלכת.



Léon Foucault 1819–1868

1851 מטוטלת פוקו המשנה את מישור תנועתה בגלל סיבוב הארץ.
ראה לעיל



William Ferrel 1817–1891

1856 מפרסם מאמר על רוחות וזרמים באוקיאנוס

מכאניקה



Ernst Mach 1838-1916

1870 קושר תנע של גוף לאינטראקציה שלו עם שאר העולם – אין תנע לגוף בודד.

שותף לתורות של לייבניץ ומאייר (האנרגיסטים) שהאמינו שאנרגיה היא חומר

1883 עקרון מאך – המאתגר מושג המרחב האבסולוטי של ניוטון: סיבוב אבסולוטי אינו ניתן להבחנה.

חקר בליסטיקה. "מספר מאך" נקרא על שמו – מהירות ביחידות מהירות הקול.
מתנגד חריף ליחסיות



Loránd Eötvös 1848-1919

1889 אטווש מפתח מאזני פיתול רגישים שמגלים סטיות מזעריות בכבידת האדמה ועזרו בגילוי שדות הנפט בטקסס. הם הראו בדיוק רב, של חלק אחד למליון, את השוויון בין מסה אינרציאלית לגרויטציונית – weak equivalence principle – בו השתמש איינשטיין ביחסיות הכללית.

קול ומוזיקה

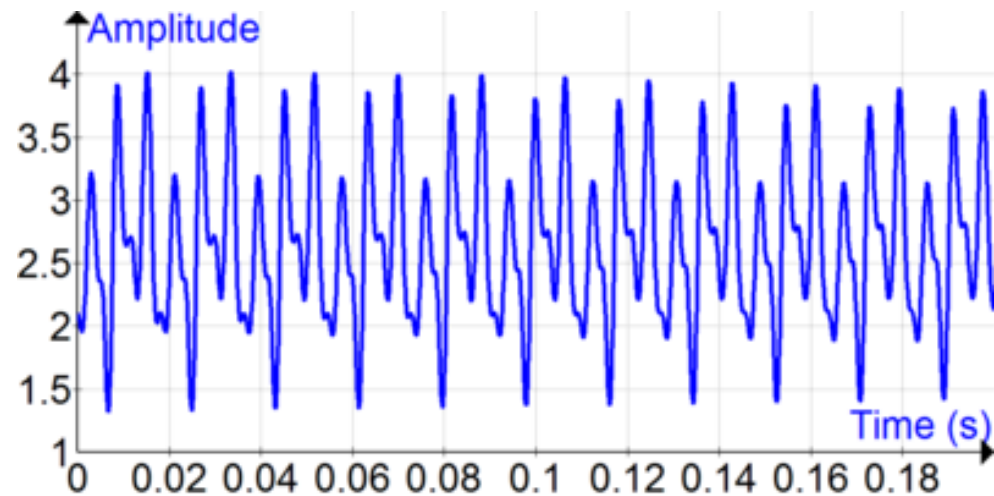
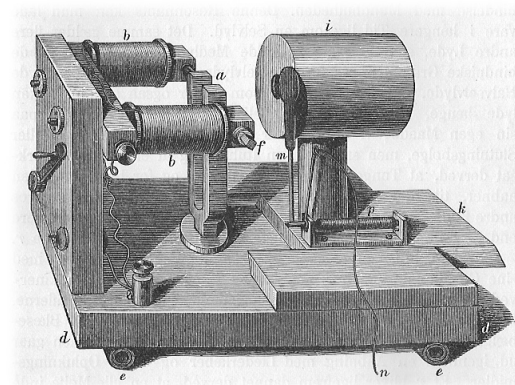
Gustaf G. Hällström 1865–1950

1832 טוען שצריך לשמוע פעימות בהרמוניות של שני צלילים בתדירות f_1 f_2
למשל $f_1 - f_2$, $-2f_2 - 2f_2$, $3f_1 - f_2$ וכ'ו
1856 אושר נסיונית ע"י הלמהולץ



Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz 1821 –1894

בונה רזונטור המרעיד מיתר בתדירות רצויה.
הבין שלצליל ספקטרום תדירויות של הרמוניות הקובעות את "צבעו"
חקר את חישת הקול באוזן (וגם ראית אור בעין)



גרהם בל שלא קרא גרמנית, לא הבין את ציור הרזונטור, אך גרם לו להמציא את שפורפרת הטלפון.

גאזים

מה חשיבות המחקר בגאזים?

סלל את הדרך להוכחת התורה האטומית. לא ניתן לשער אותה בעולם נזלי או מוצק.
הבסיס לטרמודינאמיקה – האפס המוחלט, יעילות מכונות, אנטרופיה, וכימיה.
מכאן לחוקי שימור האנרגיה (חום+מכאנית) בפיזיקה.
הואקום איפשר נסיונות בחלקיקים אלמנטאריים.
האירודינאמיקה מבוססת על התורה הקינטית של גאזים.

דוקא הסטיה מחוקי הגאזים האידיאליים הביאו להבנת מעברי פאזה, ולמערכות קירור.
והבנת חוקי הגאזים והטרמודינאמיקה שימשה בסיס לפיתוח מנועי קיטור ולמהפיכה
התעשיתית.

מה חשיבות הטרמודינאמיקה?

השקול של אנרגיה קינטית, פוטנציאלית, כימית ובתחילת המאה ה-20 גרעינית.
שלילת יצירת אנרגיה ללא השקעת לפחות כמות שווה של אנרגיה. לרוב התמרת צורת
האנרגיה אינה יעילה ב-100%
בסיס להערכת יעילות מירבית במערכות התמרת אנרגיה – מנועים. גם כלים לאופטימיזציה
של יעילות מנועים.

התיאוריות של גאזים אידיאליים ואמיתיים

גאז אידיאלי הוא אוסף מולקולות המתנגשות התנגשויות אלסטיות, ביניהן ועם קירות המיכל, ושניתן לחשב את התכונות הסטטיסטיות שלהן.

התורה התפתחה מתוך נסיונות בגאזים אמיתיים בהם שינו רק משתנה אחד ובדקו שני:

1662 חוק בויל Boyle's Law $PV = \text{const}$

1699 חוק אמונטונס Amontons's Law $P/T = \text{const}$

1780 חוק צ'רלס Charles's Law $V/T = \text{const}$ שוב ע"י Gay-Lussac

1801 חוק דלתון ללחצים חלקיים Dalton's Law $p = p_1 + p_2 + \dots$

עירוב שני גאזים במיכל מייצר אותו לחץ כאילו הם כ"א בנפרד

1802 גיי-לוסק Joseph Louis Gay-Lussac אישר חוק אמונטונס ע"י בבלון אוויר חם

1811 חוק אבוגדרו Avogadro's Law $V/n = \text{const}$

1848 חוק גרהם לדיפוזיה של גאזים Graham's law $D = \text{const}/\sqrt{\text{density}}$

"משוואת המצב" של גאז אידיאלי מקשרת בין לחץ, טמפרטורה נפח ומספר המולקולות, בלי תלות בגודלן:

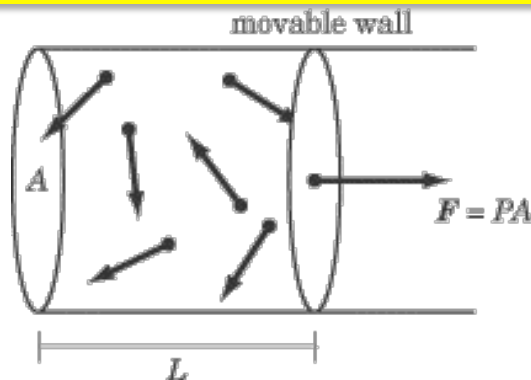
$$PV = nRT$$

איך ייתכן: הרי מולקולות גאז גדולות יותר ייצרו כוח גדול יותר כשייתקלו בקירות המיכל, ולכן

לחץ יותר גבוה? אבל מהירותן תהיה נמוכה יותר באותה טמפרטורה.

הלחץ יחסי לממוצע המהירות בריבוע, למה? בכל התנגשות הלחץ יחסי לשינוי התנע, הינו למהירות, אך מספר

ההתנגשויות עם הקיר ג"כ יחסי למהירות)



בהסתמך על מכאניקה סטטיסטית אפשר לחשב את קיבול החום, מהירות הקול, אנטרופיה ועוד תכונות טרמודינאמיות של גאז אידיאלי, ולהשוות לגאזים אמיתיים. ניזול גאז – נובע דווקא מ"אי-האידיאליות". ואן-דר-ואלס – נובל 1910



John Dalton 1766-1844

1801 מאמר הדן במסיסות גאזים במים
1803 מנסח את התורה האטומית לחמר: (לראשונה נוסחה ע"י היוונים) כל החמרים בנויים מאטומים – חלקיקים המשנים את תכונותיהם אם מחלקים אותם לתת חלקים. מולקולות נוצרות מהרכב ממספר שלם של אטומים. אטומים אינם נוצרים או נשמדים, וכולם שוים לאותו החמר. אטומים נבדלים במשקלם. מפרסם טבלת משקלים אטומיים ככפולות של מימן – האטום הקל ביותר (חמצן=7 ולמעשה הוא 16 כי גאז המימן בנוי ממולקולות בנות שני אטומי מימן)

דלתון הניח שתרכובות נוצרות מיחסי אטומים 1:1

1808 חוק הלחצים החלקיים $p = p_1 + p_2 + \dots$

1808 דלתון מגן על התורה הקלורית של החום ואיך היא משתלבת בכימיה, בעיקר של גאזים. הוא מציע שחום סגולי של גאזים יחסי הפוך למשקל האטומי.



Thomas Thomson 1773-1852

בספר כימיה מדווח על התורה האטומית של דלתון.



Gay-Lussac 1778-1850

1806 אם גאז מתפשט בלי שמבצע עבודה הטמפרטורה שלו אינה משתנה
1808 גאזים מתרכבים כימית ביחסים קבועים. פוצץ בלון עם חמצן ומימן,
ביחסי נפח שונים, והסיק כי מים מורכבים משני נפחי מימן ונפח אחד של
חמצן.

דלתון סרב לקבל את התוצאות כי לדעתו לא נשמעו לתורת האטום כי
ההבדל בין יסודות ומולקולות לא היה ידוע. הנושא יושב ע"י אבוגדרו.



Amedeo Avogadro 1776 -1856

1811 אבוגדרו טוען שבתנאי טמפרטורה ולחץ זהים נפחי גאז שווים מכילים
מספר זהה של חלקיקים. החוק לא התקבל.

עד שב-1860 Stanislao Cannizzaro הראה שחוק אבוגדרו הוא הפתרון
למשקלים אטומיים ומולקולאריים.

מספר המולקולות במול אחד הוערך ע"י לושמידט Josef Loschmidt ב-1865
מהתורה הקינטית של הגאזים ונקרא ע"ש אבוגדרו 6.02252×10^{23}

ב-1909 Baptiste Perrin פרין העריך את המספר מתנועה בראונית.
גם מחלוקת מטען של מול אחד של אלקטרונים (פרדיי) במטען האלקטרון
שקבע מיליקן מתקבל מספר אבוגדרו.

אבוגדרו קרא לאטומים: מולקולות בסיסיות elementary molecules
ולתרכובות מולקולות אינטגרליות integral molecules

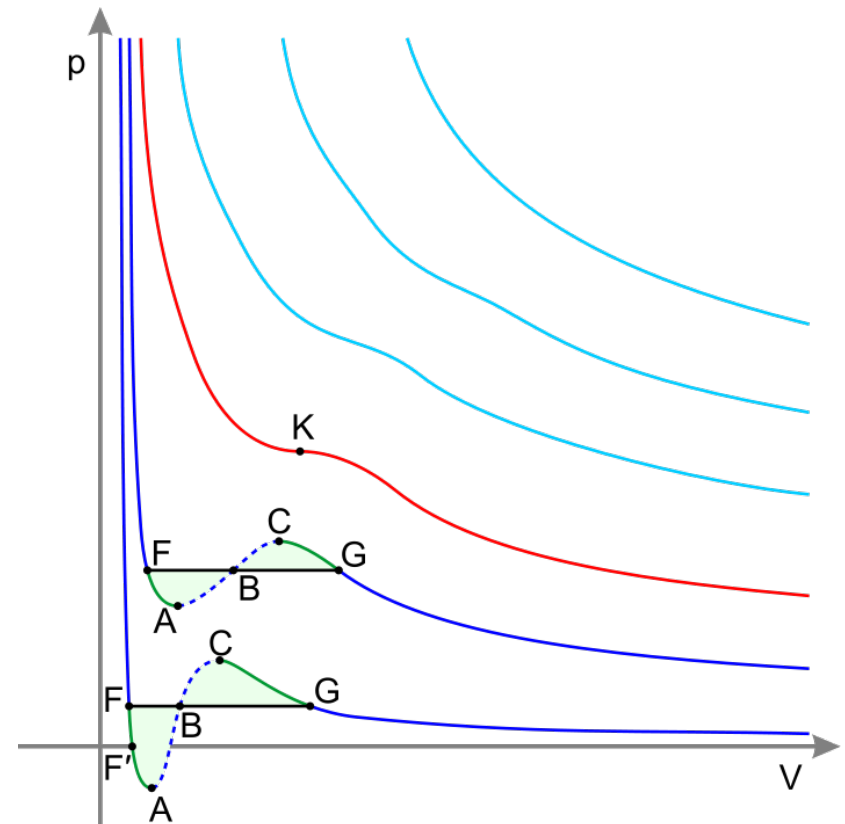
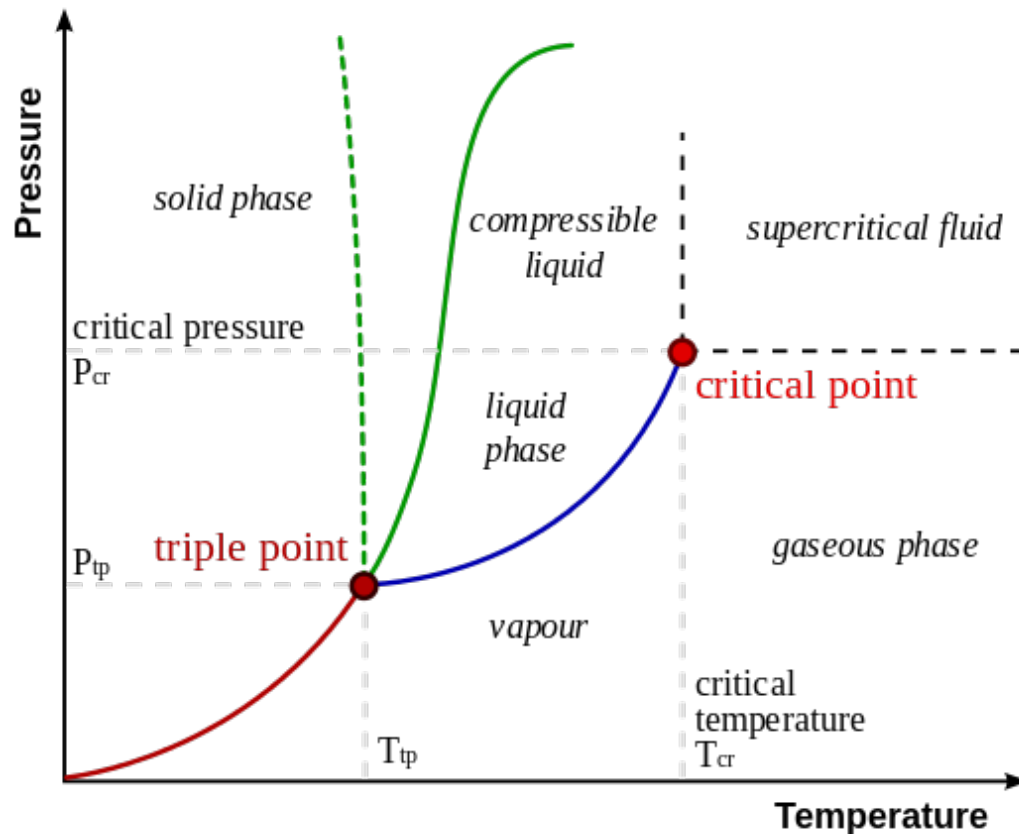


*Yours most sincerely
Thomas Andrew.*

Thomas Andrew 1813–1885

1861 מראה שחוק בויל אינו מוכל על CO_2 בטמפרטורות נמוכות:
באזורים שלאורך איזותרמה שינוי נפח אינו גורם לשינוי לחץ, עקב
שוי משקל נוזל-גז.

מוצא את הנקודה הקריטית ואת הנקודה המשולשת
(ראה קלאוזיוס-קלפירון וואן-דר-ואלס בהמשך)

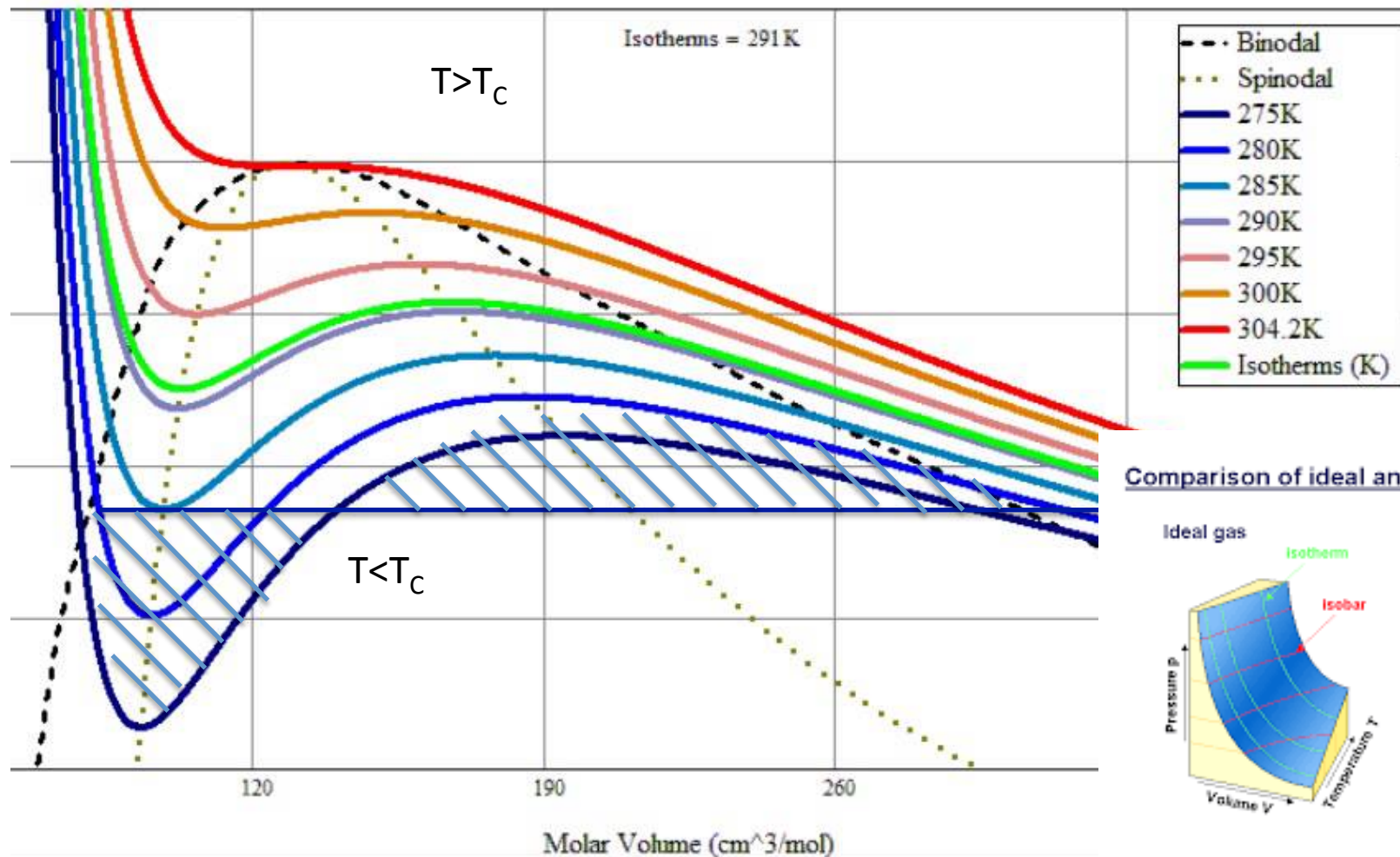




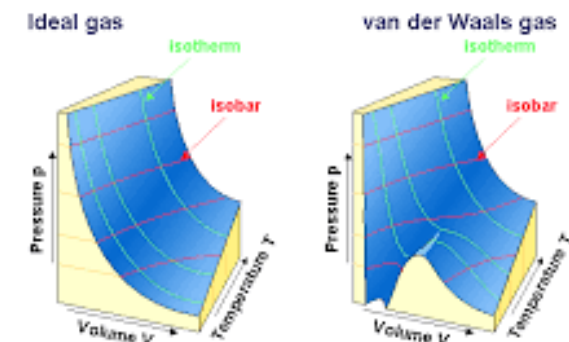
Johannes Diderik van der Waals 1837 –1923

- 1873 גאז לא אידיאלי עקב כוחות משיכה בין המולקולות -
- גורם לקירור בהתפשטות (מקררים), וחימום בדחיסה (משאיבת אופניים) -
- כוחות ואן-דר-ואלס - נובל 1910
- תיקון לגרף $PV = \text{const}$ מעבר פאזה לנוזל מתחת לטמפרטורה קריטית T_c
- $$(P + a / V_m^2)(V_m - b) = R T$$

Carbon Dioxide Phase Envelope : van der Waals Equation-Of-State



Comparison of ideal and van der Waals gas





William Henry 1774 –1836

1801 מסיסות גאז בנוזל יחסית ללחץ - חוק הנרי

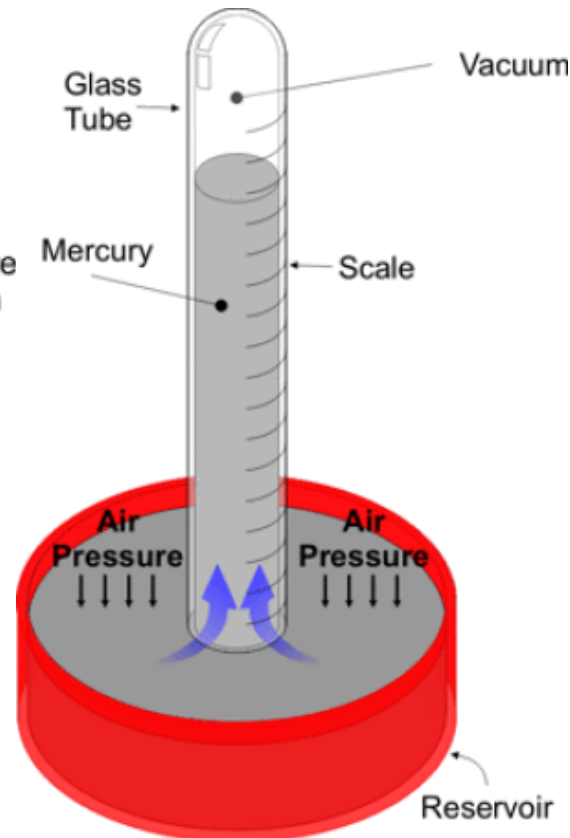
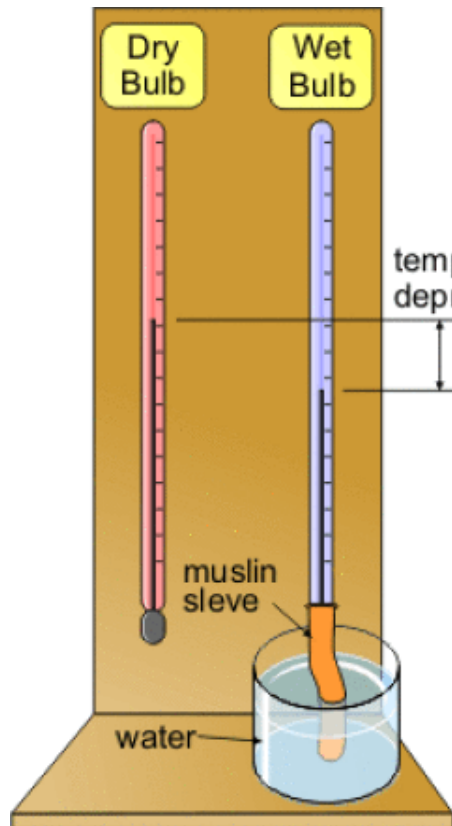
לחץ אדים:

בחדר שניפחו 4000 ליטרים, מיכל עם מים. כמה מים יתאדו בטמפרטורה 25°
 אם לחץ האדים של מים בטמפרטורה זו הוא 23.8 מ"מ כספית.
 1 אטמוספירה = 760 מ"מ כספית

$$n = PV/RT = 23.8/760 * 4000 / 0.082057 \text{ liter atmosphere/mole/Kelvin} / 298^{\circ}\text{K}$$

$$N = 54.4 \text{ moles of water}$$

$$\text{WEIGHT OF WATER} = n * MW = 54.4 * 18.01 = 980 \text{ gr}$$



בטמפרטורת הרכיחה, לחץ האדים
 של מים משתווה ללחץ האטמוספירי
 (ולכן שינוי בטמפרטורת רכיחה בגובה ההר)

היגרומטרים של מים ושערה,
 וברומטר כספית: עקרונות הפעולה.



טרמודינאמיקה

Nicolas Léonard Sadi Carnot 1796 –1832 France

למד בבית הספר הפוליטכני ב־École Polytechnique בו לימדו פואסון, אמפר, גיי-לוסק ואחרים.
היה חייל רוב חייו ולאחר מפלת נפוליון עזב את הצבא, סבל ממניה ומת מכולירה.
1803 כותב חיבור על טרנספורמציה גיאומטרית של מערכת 'geometric motions'
1824 קרנו כותב ספר על מכונות קיטור. בזמנו היתה יעילות המכונות נמוכה ביותר.
הוא שואל: האם העבודה שניתן להפיק מהמכונה בלתי מוגבלת
האם ניתן לשפר יעילות ע"י החלפת הקיטור בחומר אחר

באותה שנה התפרסם חוק שימור האנרגיה. החוק הראשון של הטרמודינמיקה יפורסם 10 שנים אח"כ, והאקוילנט המכאני של חום 20 שנים אח"כ.
קרנו מתאר בספר את "מעגל קרנו" – מכונת חום אבסטרקטית אידיאלית העובדת בין שני מיכלי חום, ללא חיכוך, וללא איבוד חום בין המכלים.
בניתוח עבודתה הראה שיעילותה תלויה בהפרש טמפרטורות המיכלים ביניהם נוצרת העבודה, ואינה תלויה בסוג הנוזל והגז שבתוכם. בניתוח יעילות המכונה "בנה" מעגל קרנו בו שני מיכלים בטמפרטורות שונות מייצרים עבודה מכאנית בה אז משתמשים לייצר חום, שכמובן לא יכול להגדיל את הפרשי הטמפרטורות, ומכאן מוגבלת יעילות התהליך.

בהמשך הוכח שהיעילות שווה להפרש הטמפרטורות חלקי הטמפרטורה האבסולוטית של המיכל החם

$$(T_1 - T_2) / T_1 \quad (\text{במעלות קלווין})$$

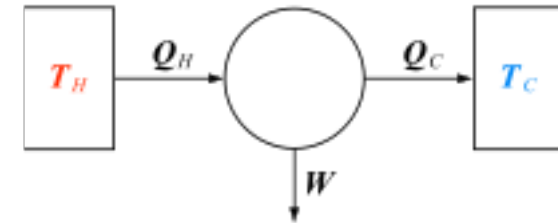
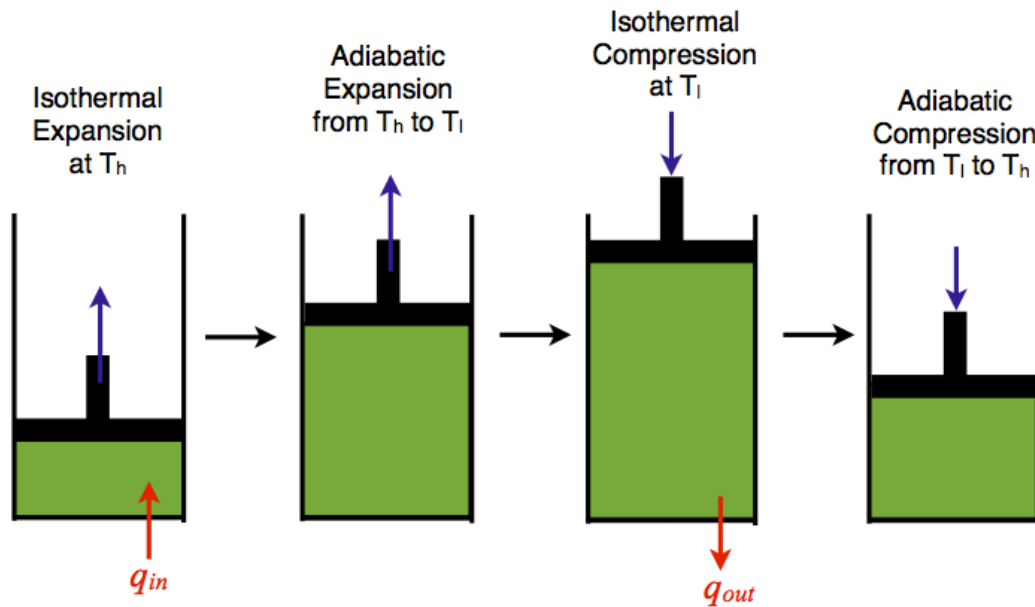
דן בהופכיות שהראה שאינה קיימת – מה שהביא לחוק השני.

הוא מציע מנוע בעירה פנימית – טמפרטורה גבוהה ולכן יעילות גבוהה.



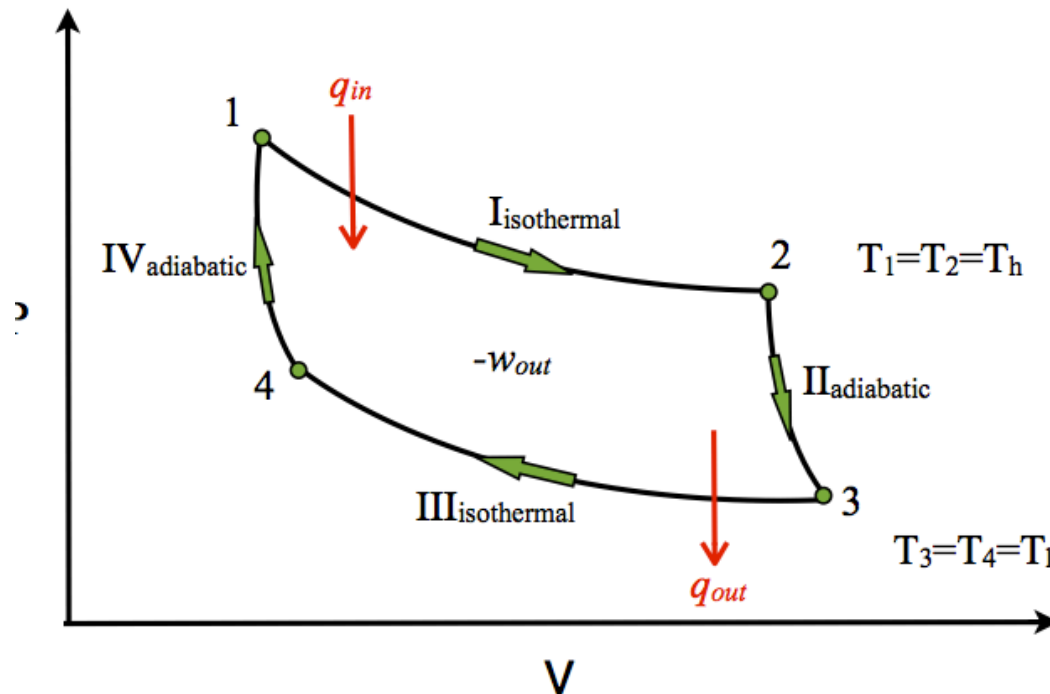
קרנו הביא לשיא את החוזק של תורות תיאורטיות בטרמודינאמיקה ובפיזיקה בכלל. מצד אחד עמדה הדרישה של פיזיקאים למודלים מכאניים (כולל לחום – נזל קלורי, לאלקטרומגנטיות – האתר) ומאך היה מהבוטים שבהם. מאידך עמדו מול משברים חוזרים ונשנים של מגבלות המודלים בניבוי המציאות. בולצמן, פלנק והרץ תמכו לכן בתיאוריות וניסויי מחשבה כמדריכים בתכנון וניבוי תוצאות שייבדקו ניסיונית.

מעגל קרנו



$$PV=nRT$$

$$\text{Work} = \int P dV$$



$$\text{efficiency} = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$



הסטוריה של מכונות קיטור:

Heron of Alexandria 10 -70

מכונת קיטור: מיכל מים מחומם באש, עם שתי יציאות לקיטור המסובבות אותו

ליאונרדו: תותח הנפלט מקנה רותח לתוכו הוזרק מים.

1551 תאקיי א-דין סובב טורבינה בסילון קיטור - כמה ממציאים המשיכו בכוון זה.

Thomas Savery 1650-1715

1698 "מנוע אש" למשאיות ומנסרות - ברזים ומיכל קיטור, ללא חלקים נעים, קיטור מתעבה במיכל מקורר מים, ומושך לתוכו מים.

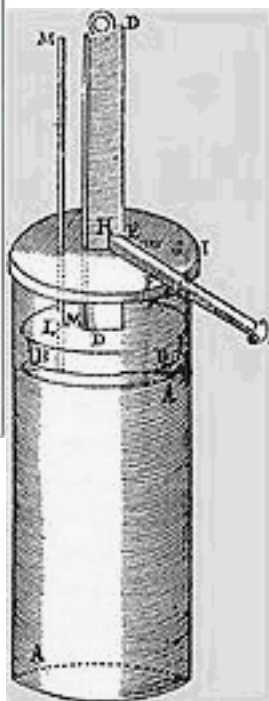
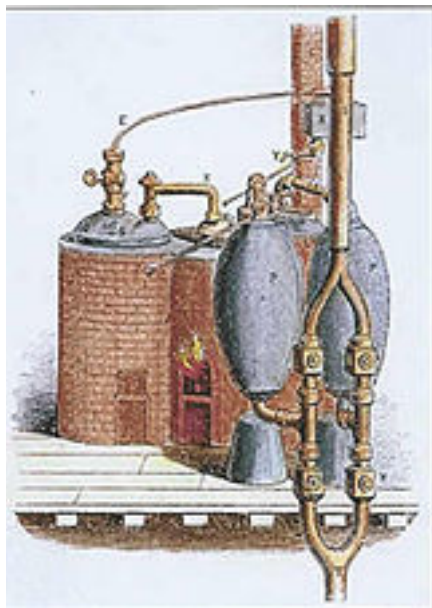
Denis Papin 1647 - 1712

בנה מיכל לחץ ובוכנה, צרפתי שנסע לאנגליה ונפגש עם בויל

Thomas Newcomen 1664-1729

1712 תכנן מנוע למשאית מים

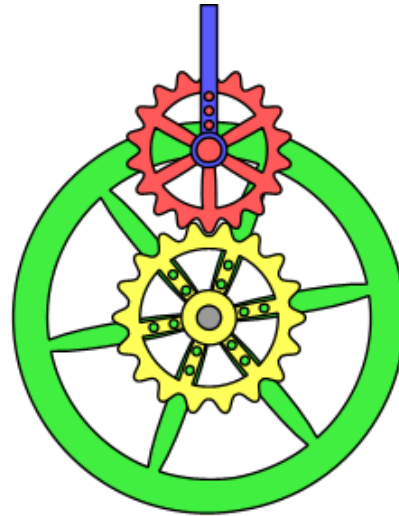
ממכרות פחם: בוכנה ושסתומים.





James Watt 1736–1819

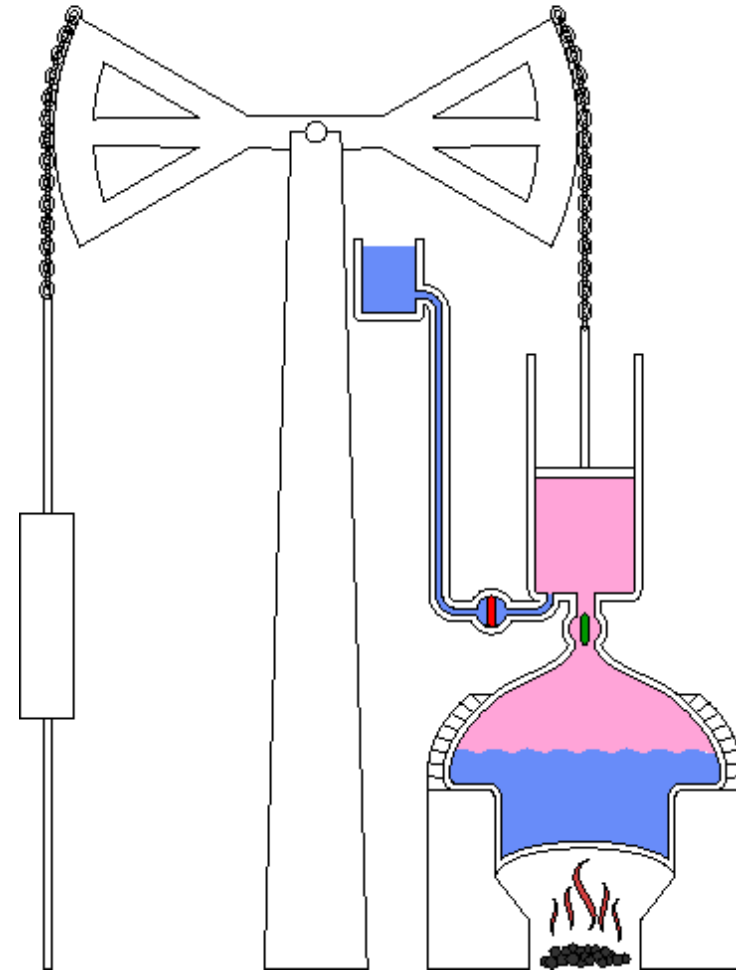
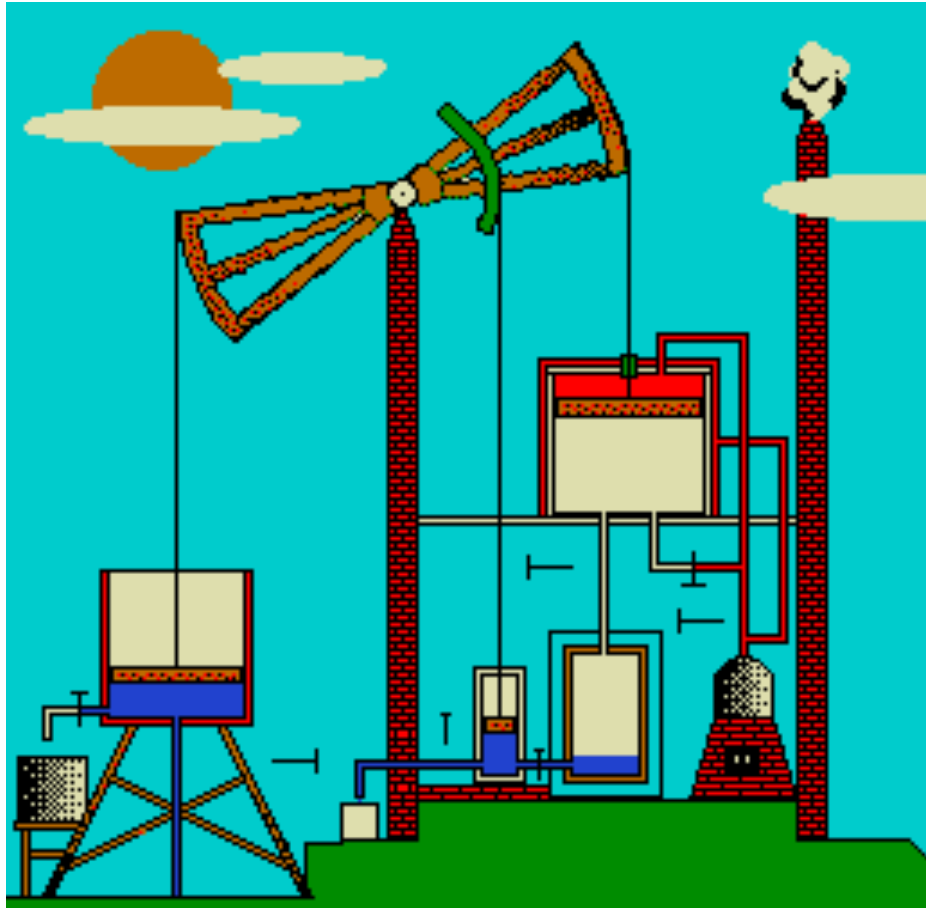
1765 הבין שעיקר אובדן היעילות במכונות של ניוקמן היה בקירור הצילינדר במים מה שגרם שקיטור שזרם לתוכו במחזור הבא ברובו התעבה. הפתרון – הפרדה בין צילינדר כוח לצילינדר עיבוי. הבעיה החמורה ביותר בתיכנון היתה התאמת הבוכנות לצילינדר ללא זליגת הגאז בלחץ. עם השיפורים הוצמדו המכונות לגלגל מסתובב, במקום לתנועה קוית.



Richard Trevithick 1771 1833

1800 בגלל עקרון קרנו ליעילות – שאיפה למכונות בלחץ גבוה: קטנות יותר, מהירות יותר, אבל מתפוצצות... יצירת הכוח מגאז בלחץ גבוה, ולא מעיבוי גאז בלחץ נמוך פתח דרך לרכבות.

אנימציות של מכונת הקיטון של ניוקומן (מימין) והשיפור של וואט



Ivan Polzunov 1728 –1766

1 מכונת קיטור עם שני צילינדרים – תנועה יותר רצופה.



1788 ספינת קיטור שבנה **John Finch** לשירות קבוע על

נהר הדלוור בין פילדלפיה וברלינגטון

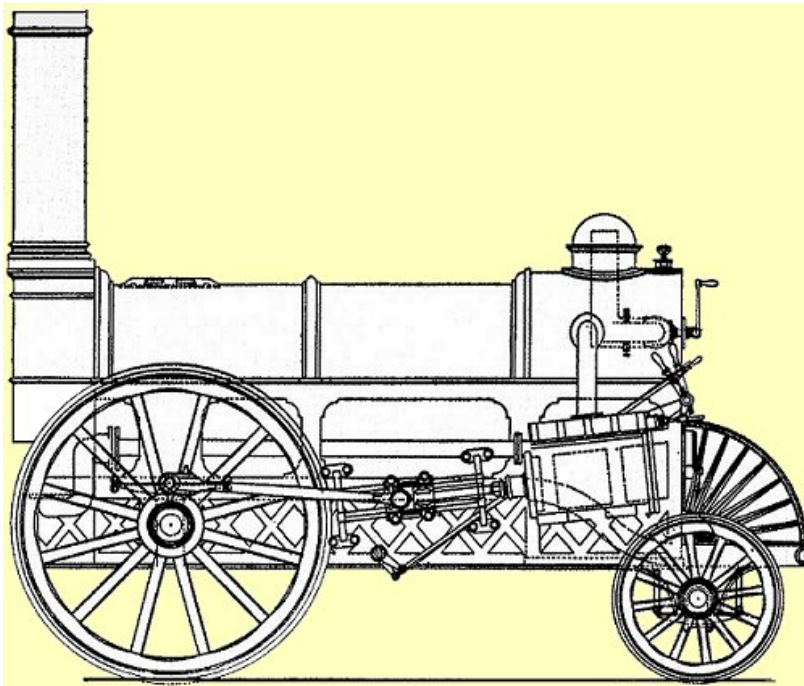
1807 פולטון **Robert Fulton** בונה ספינת פדלים מונעת

קיטור paddle-wheel steamboat המשמשת בקוים

מסחריים על המיססיסיפי

Robert Stephenson 1803 –1859

קטרי רכבת. היו כבר פסי רכבת לקרונות שנמשכו ע"י סוסים



המהפיכה התעשיתית

גורמים מכריעים:

מטוויות

מכונות קיטור

עיבוד פלדה ומתכות אחרות

תאורה מלאכותית

מיכרות פחם

אמצעי תובלה (תעלות, רכבות)



Thomas Young 1773–1829

1806 מנסח את מושג האנרגיה. התורה הקינטית.

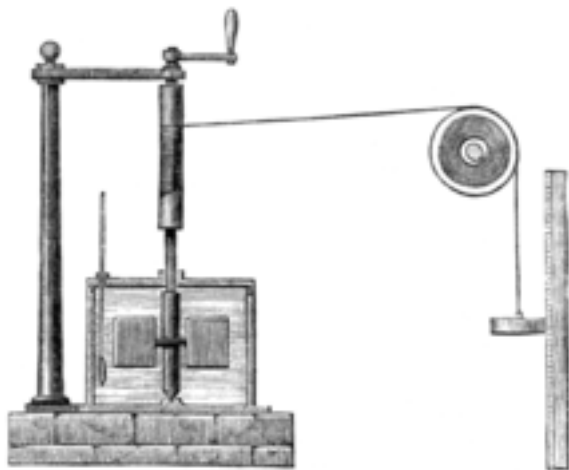


James Prescott Joule 1818–1889

בא ממשפחה של מבשלי בירה אנגליים.

1845 השקול המכאני של אנרגיה טרמית (חום) [במקביל גם ע"י מאייר Julius Robert Mayer] בנה מתקן בו משקולת יורדת ומניעה שבשבת חיכוך במים, ומדד את עלית טמפרטורת המים. שימור אנרגיה מכאנית – שהיה מקובל – הורחב לחום+מכאניקה – ומכאן החוק הראשון של הטרמודינאמיקה. תורת ה"נוזל הקלורי" שהאמינו בו, הזורם מהחם לקר, התערערה כשהוכח ש"אינו נשמר" אלא מותמר לעבודה מכאנית. הוא בנה תורה קינטית לגאזים, אם כי הניח אנרגיה סיבובית ולא קוית).

בירח הדבש שלו בצרפת תכנן למדוד את הפרש הטמפרטורה של מים הנופלים במפל...
על שמו יחידת אנרגיה.



Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz 1821–1894 Germany

העין, ראייה וצבע, חילוף חמרים (מטאבוליזם) בשרירים (האמין שאינו צורך אנרגיה לא ויטאלית), ושמיעה וקול (בנה רזונטור להפקת תדירויות קול מוגדרות בעצמות נשלטות) 1847 חוק שימור האנרגיה. הבחין בין אנרגיה חפשית וקשורה בתגובות כימיות

משוואת גיבס-הלמהולץ: אנרגיה חפשית=אנרגיה פנימית-אנטרופיה*טמפרטורה $H=E-TS$



William Thomson, 1st Baron Kelvin or – Lord Kelvin 1824 –1907

1848 טמפרטורת האפס המוחלט בו תנועת האטומים נעצרת.

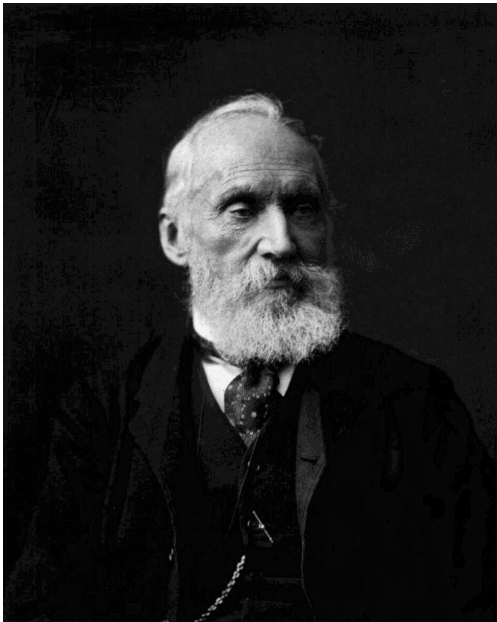
על שמו סקלת הטמפרטורות המוחלטות – מעלות קלוין=מעלות צלזיוס+273

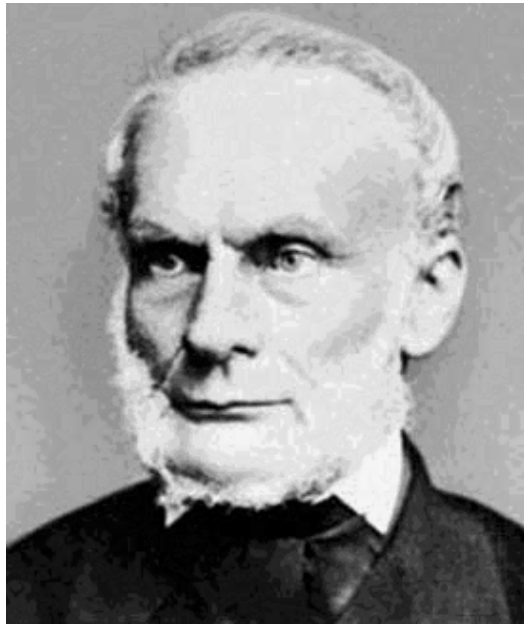
לאחר פירסומי ז'אול על שקול חום של עבודה מכאנית, הצהיר כי אינו מאמין שניתן להעביר חום לעבודה.

אפקט ז'אול–טומפסון- התקררות גאז המוזרם דרך חריר.

ניסוח החוק השני של הטרמודינאמיקה: סה"כ האנטרופיה במערכת סגורה יכול רק לגדול
החוק השלישי: האנטרופיה של מערכת שואפת לקבוע באפס המוחלט.

קידם את קו הטלגרף הטרנס-אטלנטי, זכה לאבירות מהמלכה ויקטוריה, והיה סגן יושב ראש
לחברת איסטמן-קודק
חישב שיש לנו 400 שנים של אספקת חמצן באטמוספירה לפני שנמות בחנק....





Rudolf Julius Emanuel Clausius 1822–1888

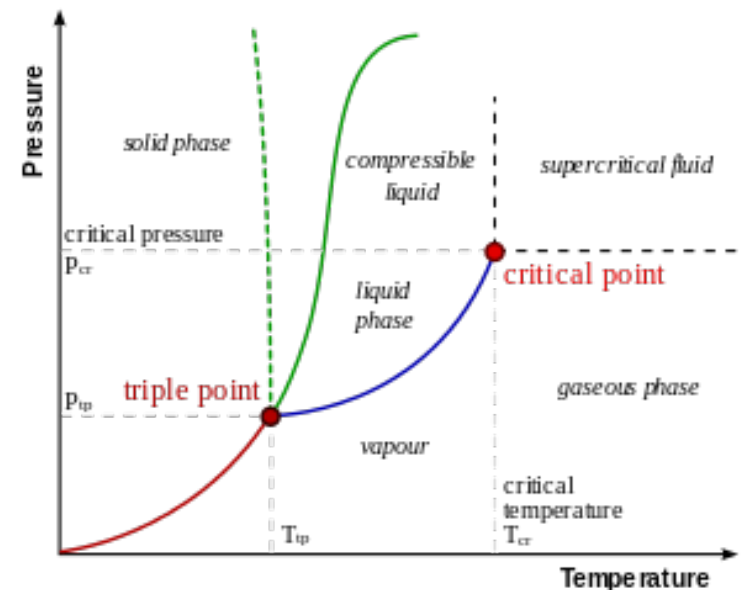
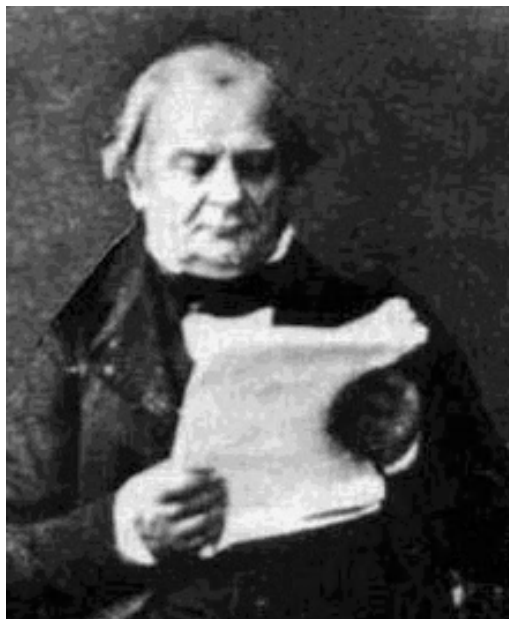
1850 החוק הראשון של הטרמודינאמיקה: האנרגיה הכוללת של מערכת סגורה היא קבועה, יכולה לעבור מצורה אחת (למשל חום) לאחרת, (למשל עבודה מכאנית).

1850 תורה מכאנית של חום. דרך חפשית ממוצעת למולקולות גז בין התנגשויות. מצא סתירה בין שימור אנרגיה למחזור קרנו, ופתר אותה כשנתן הגדרה מתמטית ל**אנטרופיה** וניסח את החוקים השני והשלישי של הטרמודינאמיקה- אנטרופיה לא יכולה לרדת במערכת סגורה: כוון זמן ואירוורסיביליות בפיזיקה.

Benoît Paul Émile Clapeyron 1799–1864

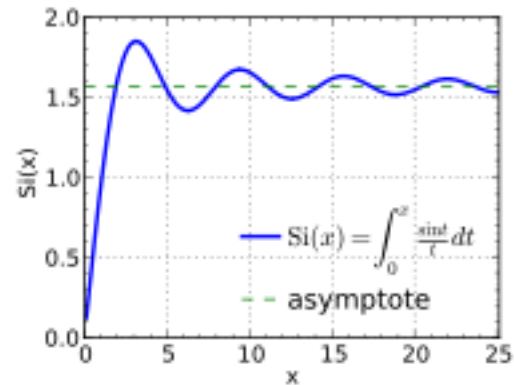
משוואת קלאוזיוס-קלפירון: לאורך גבול בין פאזות (נוזל וגז) היחס בין לחץ לטמפרטורה מתואר ע"י:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T \Delta v} = \frac{\Delta s}{\Delta v},$$

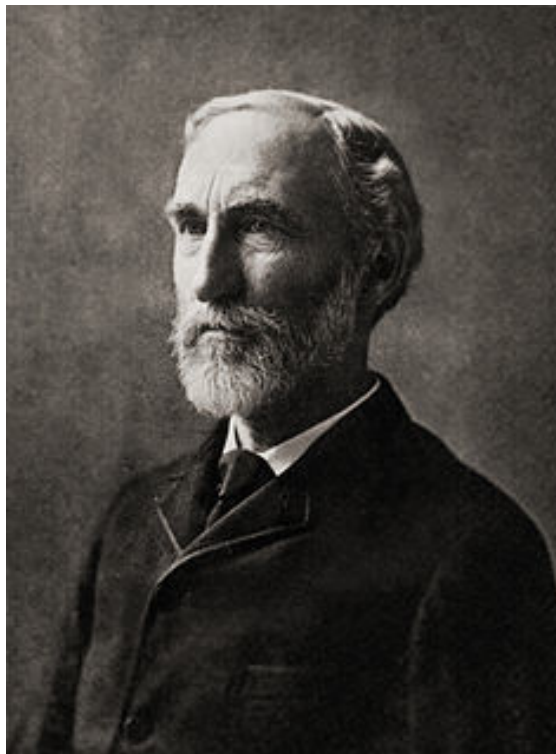


Josiah Willard Gibbs 1839–1903

1876 מייסד טרמודינאמיקה כימית – אנרגיה חפשית של גיבס התיאוריה לתגובות כימיות



“גלים” בהתמרת סינוס של פונקצית מדרגה



אנליזה וקטורית
החליפה אלגברת הקוורטניונים



Ludwig Boltzmann 1844 –1906

Statistical definition of entropy 1877

מחלוקת עם פואנקרה האם הזמן הפיך. פואנקרה הוכיח כי במערכות מכאניות הזמן הפיך. בולצמן הכניס אנטרופיה והראה שאין הפוך זמן אם היא גדלה.

משוואת בולצמן:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} + a \frac{\partial f}{\partial v} = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_c$$

מתארת שינויים בפונקצית התפלגות החלקיקים, f

1872 בולצמן טוען שהחוק השני של הטרמודינאמיקה והעליה באנטרופיה מובנת רק באוכלוסיה גדולה של חלקיקים, ולא מתוך מסלולי חלקיקים בודדים. באוכלוסיות יש מעין "אבולוציה". אנטרופיה היא סטטיסטית, ויש סיכוי סופי אך קטן למצבים קיצוניים. הגדיר פונקצית-E הזהה לאנטרופיה של קלאוזיוס.



Josef Stefan 1835–1893

1883 גלים אלקטרומגנטיים יוצרים לחץ בהחזרה ממשטח:



נהוג בטעות להציג את שבשבת האור כהוכחה ללחץ שמפעיל האור.

אך אור המוחזר מהצד המבריק היה צריך להפעיל לחץ גדול יותר מהצד השחור בו נבלע האור. למעשה הצד השחור מתחמם וגורם למולקולות הגאז לנוע מהר יותר ולדחוף את השבשבת.

משלב משוואות מקסוול לטרמודינאמיקה - חוק סטיפן-בולצמן

תלות קרינה מגוף חם תלויה בחזקה רביעית

$$J = \sigma T^4$$

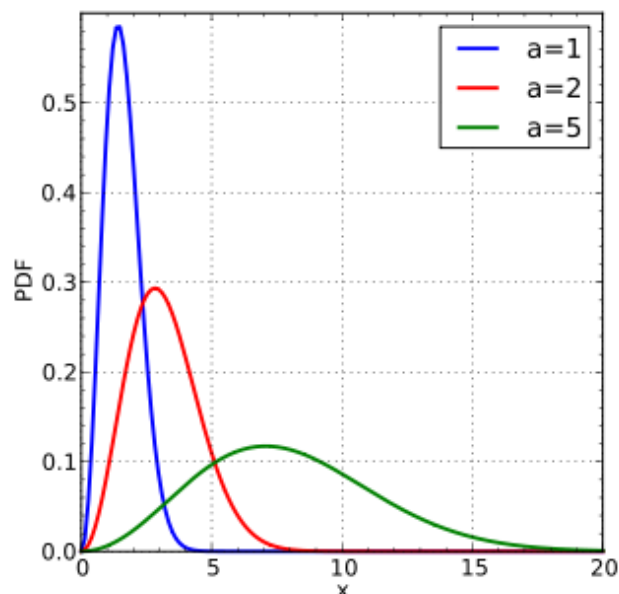
לספקטרום הפליטה של גוף שחור חשיבות גדולה בהתפתחות תורת הקוונטים



1873 – James Clerk Maxwell 1831 –1879 Scotland

מקסוול – טרמודינאמיקה

:



1867 תורה דינאמית של גאזים
פילוג מהירויות מולקולות גאז של
מקסוול-בולצמן

$$f(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}},$$

מקסוול מנסה להזים את חוקי האנטרופיה של בולצמן:

השדון של מקסוול: חש את מהירות האטומים מהקרינה ממטענים, ופותח פתח בין שני חדרים

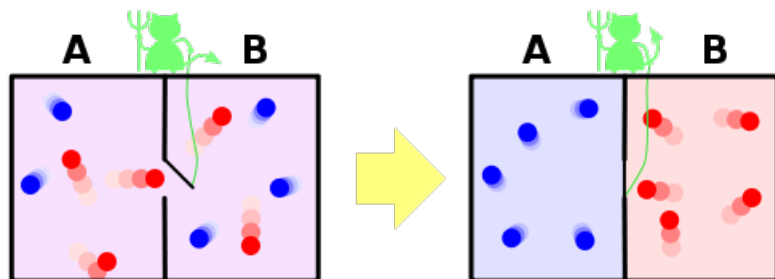
כך שהמולקולות המהירות יהיו בחדר הימני,
והאיטיות בשמאלי. לבסוף החדר הימני יהיה

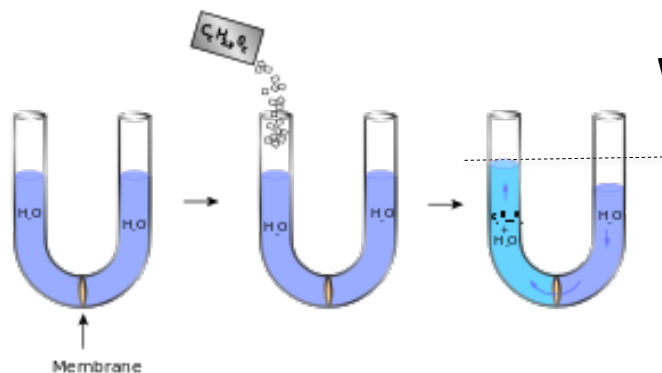
חם יותר – מה שסותר את עקרונות

הטרמודינאמיקה ???

הסבר רק ב-1872

לא ניתן למדוד מהירות מבלי לשנותה.





Walther Hermann Nernst 1864 – 1941 Nobel 1920

לחץ אוסמוטי - ממברנה לא עבירה ליונים אך מעבירה מים
1897 ממציא מנורת להט עם חוט להט קרמי, שנמכר
לווסטינגהאוז והחליף את מנורת חוט הפחם של אדיסון.
תלמידו אירוין לנגמיר Irving Langmuir פיתח את מנורת
הטונגסטן, בה השתמשו עד לאחרונה.

1903 מקור קרינת אינפרה-אדום ממנורת להט של תחמוצות עפרות נדירות Nernst glower

1905 החוק השלישי של הטרמודינאמיקה - התקרבות לאפס המוחלט

ממנו ערך מדידות אנרגיה חפשית ושוי משקל כימי.

1914 ביקר את איינשטיין בציריך לאחר שהתרשם ממאמריו, וסידר לו משרה בברלין במכון

קיסר וילהלם שנוסד ובאוניברסיטת הומבולד. הוא כנראה נתן

תרומה (עושרו ממכירת פטנט המנורה) שאיינשטיין לא היה

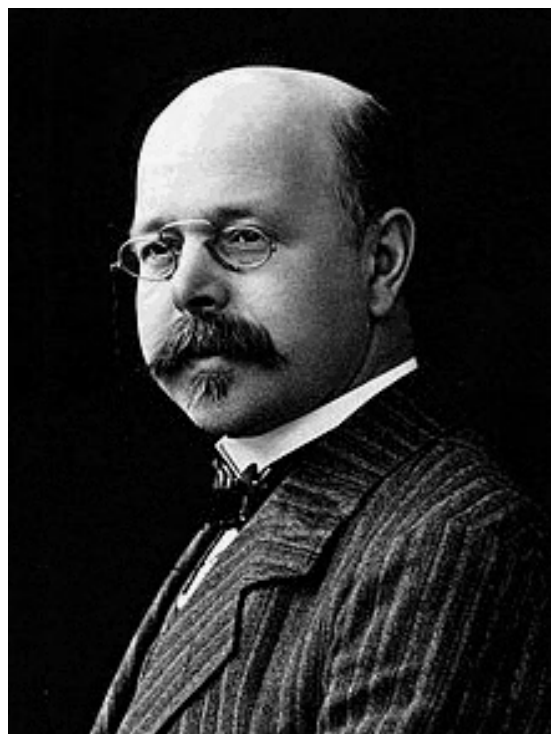
צריך ללמד.

1918 ריאקציות שרשרת - הרעיון לריאקציות כימיות, אך

מומש לריאקציות גרעיניות.

1930 פסנתר אלקטרוני (עם חברת הפסנתרים בקשטיין).

התנגד לנאצים - מה שחיסל את הקריירה האקדמית שלו.





נקודות ציון בטרמודינאמיקה (כרונולוגי)

Jean Baptiste Joseph Fourier 1768-1830
1807 פותר בעית התפשטות חום במוצקים – משתמש בטור פוריה.

Sir John Leslie 1766–1832

1810 מקפיא מים במערכת קירור



Siméon-Denis Poisson 1781-1840

1811 התיאוריה המתמטית של חום, בהתבסס על פוריה

Amedeo Avogadro 1776–1856

1811 חוק אבוגדרו: כל הגאזים בטמפרטורה, נפח ולחץ שווה מכילים אותו מספר מולקולות



Jöns Jakob Berzelius 1779-1848

1811 כוחות חשמליים וכימיים – הם אותם הכוחות. האטומים טעוני מטען חשמלי.



Humphry Davy 1778 –1829

1812 מחבר ספר כימיה בו בנוסף לדרגות חופש קינטיות של תנודות גליות הוסיף תנועה סיבובית (תנע זוויתי).

François Delaroche 1775–1813 and Jacques-Étienne Bérard 1789-1869

1812 מדדו חום סגולי של מספר רב של גאזים שהתאימו לתחזיות של לפלאס, אוששו את התורה הקלורית ותורת קרנו, ועודדו פיתוח הטרימודינאמיקה. הם זכו על כך בפרס המכון הצרפתי למדעים.
הם דווחו (בטעות) על ירידת החום הסגולי של אויר בעלית הלחץ.

Peter Ewart 1767 –1842

1813 מטפל בחיבורו בשימור אנרגיה: השפיע על דלתון וג'אול

Pierre-Louis Dulong 1785-1838 and Alexis Thérèse Petit 1791-1820

1819 מודדים חום סגולי בלחץ קבוע ותחום רחב של טמפרטורות למתכות, ומראים שמכפלת החום הסגולי במסה האטומית קבועה:
חוק דולונג-פטי – Law of Dulong and Petti. חום סגולי של כל האטומים זהה

John Herapath 1790 –1868

1820 מסיק גדלים מהתורה הקינטית של הגאזים: חום הוא תנועה, לא נוזל (קלוריק). בטעות משייך טמפרטורה לתנע ולא לאנרגיה קינטית. מאמרו נדחה והתקבל שנה אח"כ, אך מלבד ז'אול התעלמו מעבודתו. למרות זאת, מ-1821 התורה הקינטית של החום הדיחה את תורת הנוזל הקלורי.



Thomas Johann Seebeck 1770-1831

1820 מגלה את תהליך יצירת חשמל מחום ע"י הפרשי טמפרטורות בין שתי מתכות המחוברות בצומת – אפקט טרמו-חשמלי thermoelectrictiy צמד טרמי thermocouple מלבד החשיבות כטכנולוגיה נוחה למדידת טמפרטורה, חשיבות לגיבוש מושג האנרגיה ומופעיה השונים במכאניקה, חום וחשמל.



Jean Charles Athanase Peltier 1785 1845

גילה באפן בלתי תלוי את האפקט הטרמואלקטרי אפקט סייבק-פלטייה חימום או קירור (תלוי בכוון הזרם) במעבר זרם בצומת שתי מתכות. התופעה ההפוכה לאפקט הטרמו-חשמלי של Seebeck. משמש כיום לקירור מעבדי מחשבים, מצלמות CCD מקרר במכונית ועוד.

Charles Cagniard de la Tour

1822 מוצא שמעבר פאזה מגאז לנוזל תלוי בלחץ ובטמפרטורה, ומגלה את הנקודה הקריטית.

Pierre-Simon Laplace 1749-1827

1822 מפרסם כמה מאמרים השוללים רעיון של ניוטון שגאזים נוצרים מדחיה בין המולקולות.

Marc Séguin

1822 סגוין כותב להרשל ותומך בשימור אנרגיה ובתורה הקינטית.

Poisson

1823 פואסון מפתח תורה לגאזים בה הדחיה בין אטומים נובעת מ"אטמוספירה" של קלוריק (חום) המקיפה את האטומים.

1824 ממציא את הפוטנציאל הסקלארי המגנטי וצפיפות קטבים במשטח ובנפח.
גם מחשב את השדה המגנטי במרכז כדור מתכת מגנטית חלול.

Thomas Graham

1929–33 חוק גרהם: דיפוזיה של שני גזים אחד לתוך השני–התערבבות ספונטאנית של נפחים איפיניטסימאליים של שני הגזים במגע, במהירות התלויה יחסית הפוך לשרש צפיפותם.

הוא גם ציין שניתן להפריד בין גזים שונים ע"י דיפוזיה: כך הופרדו האיזוטופ הבקיע של אורניום, 235 מאיזוטופ 238 אכן נעשה במחה"ע השניה בפרוייקט מנהטן בצנטרפוגות.

Franz Ernst Neumann

1831 מרחיב את החום הסגולי (היחסי הפוך למשקל אטומי) מגזים למוצקים. החום הסגולי של מסג הוא סכום של מרכיביו.

Gauss

1830 גאוס מפתח ביטוי למתח פנים המכיל את כל הכוחות בין חלקיקים.

Macedonio Melloni

1830 צמד-טרמי, יוצר מתח מהפרשי טמפרטורות, ומאפשר למדוד טמפרטורה.
1831 מדגים שקרינת גוף שחור ניתנת להחזרה, שבירה וקיטוב כמו אור.

Émile Clapeyron

1834 בעקבות נסיונות במנועי קיטור, ניסוח ראשוני לחוק השני של הטרמודינאמיקה.
מפיץ את תורת קרנו.

von Suerman

1837 נסיונות באויר בלחץ נמוך מאשרים גירסת קלפיירון לנוסחת קרנו.

James Prescott Joule 1818-1889

1841 ג'אול מראה ששימור אנרגיה במעגל חשמלי כוללת זרם, חום והתמרה כימית.
1843 מבלי לדעת על עבודת מאייר, מודד את השקול הטרמי של עבודה. שימור אנרגיה כולל חום. מגדיר חום כמוס במעברי פאזה (כמו קרח למים לאדים) כשינוי אנרגיה פנימית בין המולקולות. פורסם רק ב-1847.
1847 מפרסם על שימור אנרגיה כולל נסיון למדידת השקול הטרמי של עבודה.

Julius Robert von Mayer

1841 מאייר, מדען חובב, טוען שחום ועבודה שוי ערך. הקשר בין חום ועבודה - החוק הראשון של הטרמודינאמיקה ושימור אנרגיה.
אנרגיה, מושג ללא תפישה חמרית, לא התקבל בקלות.
1842 כותב מאמר על שימור אנרגיה שלא התקבל לפירסום.
1843 שימור אנרגיה מפורסם ע"י טומסון, **William Thomson**

William Thomson (Lord Kelvin)'s 1824-1907

1842 זרימת חום בחמר אחיד.

William Robert Grove

1842 מדגים פירוק מולקולות בחום ממרכיביהן: כגון קיטור למימן וחמצן ולהפך.

John James Waterston

1844 מפרסם ללא שמו כמחבר הגיגים על תיפקודי הנפש, עם הערה על התורה
הקינטית של גאזים, הכוללת פילוג אנרגיה שוה energy equipartition ומושג דרך
חפשית ממוצעת בין התנגשויות. התעלמו כליל מהעבודה.

Karl-Hermann Knoblauch 1820–1895

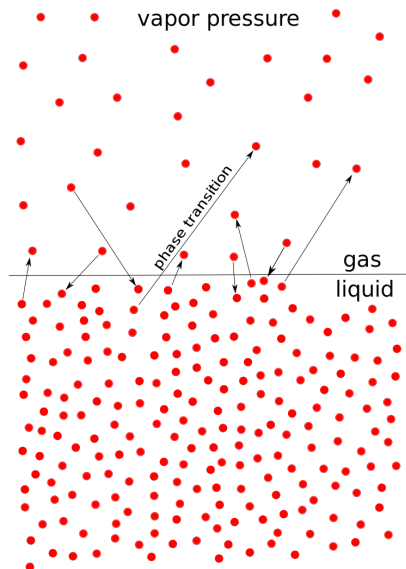
1846 מפרסם מאמר על קרינת חום.

Grove

1846 מפרסם סיכום על תורה כללית לשימור אנרגיה.

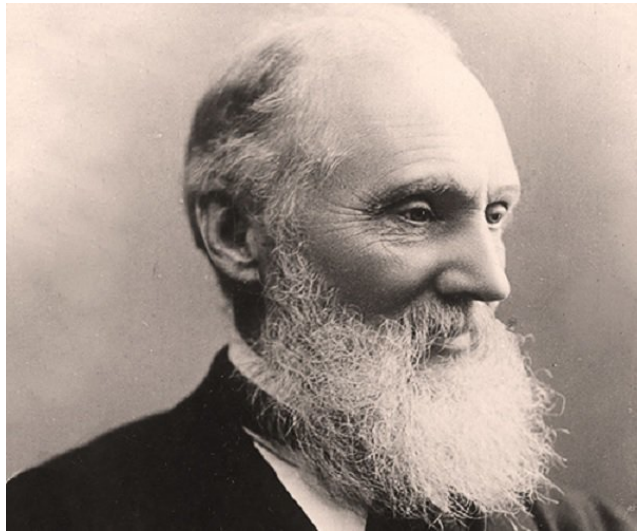
Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz 1821-1894

1847 באופן בלתי תלוי בג'אול מפרסם ניסוח מתמטי לחוק שימור האנרגיה, והחוק הראשון של הטרמודינאמיקה. במאמרו על "שימור כוחות" מתאר כי אנרגיה קינטית ופוטנציאלית יכולה להיות מותמרת לחום. לפי רומפורט מאייר וג'אול, Rumford, Mayer, and Joule וכל צורות אנרגיה יכולות להיות מותמרות לאנרגיה כימית, חשמלית ומגנטית. העולם מורכב מחמרים וכוחות. הרצאתו התקבלה בספקנות, ומאמרו לא התקבל לפירסום..



Lambert Heinrich von Babo 1818–1899

1 המסת חמר בנוזל, כמו מלח במים) מורידה את לחץ האדים שלו באופן יחסי לריכוז בחמר המומס.



William Thomson (Lord Kelvin)

1848 מרחיב את מושג האפס המוחלט מגאזים לכל החמרים. בהסתמך על קרנו ונסיון רנו על קיטור מציע סקלת טמפרטורות אבסולוטית. אחרי 1892 נקראת סקלת קלוין (במצוות הפרלמנט הבריטי...). מקבל את החוק השני של הטרמודינאמיקה בהסתמך על מכונת קרנו. באפס המוחלט יעילות מכונת קרנו מתאפסת. קלווין מגלה באופן בלתי תלוי את האפס המוחלט. 149 שנים אחרי חוק אמונטונס **Guillaume Amontons** לשינוי לחץ גאז בטמפרטורה, ומתוך חוק צ'רלס שהמציא אותו מחדש ומחייץ (עושה אקסטרפולציה) ערך של -273°C לאפס המוחלט. מציע שאנרגית המולקולות מתאפסת.

Joule

בהרצאה על סמך התורה הקינטית של הרפט **Herapath** תוצאות כמותיות המתפרסמות רק ב-1851 ומופצות בקהיליה המדעית האמצעות ציטוט של קלאוסיוס **Clausius** ב-1857

Rudolf Clausius, Kelvin

1850-1 החוק השני של הטרמודינאמיקה.

John William Draper

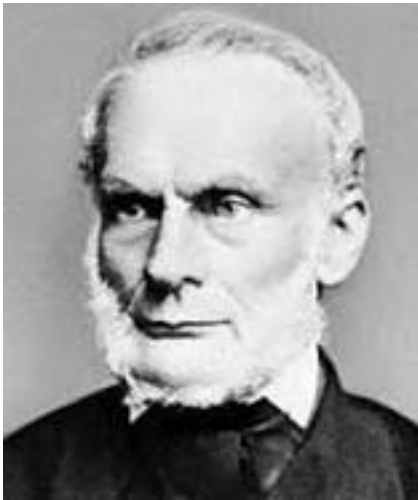
1847 מגלה שכל החמרים מתחילים להקרין ב- 525°C באדום, ובעלית הטמפרטורה הצבע מוסט ללבן.

James Thomson

1849 בהסתמך על קרנו, מחשב את נקודת הקפאון של מים תחת לחץ. קלוין טבע את השם "טרמודינאמיקה" כשהרצה על קרנו. זנח את התורה הקלורית של החום.

William John Macquorn Rankine

1849 מחשב קשר בין לחץ אדים וטמפרטורה.
1850 מיישם את תיאורית המערבולות שלו לקשר בין טמפרטורה, לחץ, וצפיפות לגאזים, וחום כמוס לאיוד נוזל. מנבא שהחום הסגולי של קיטור רווי הוא לכאורה שלילי (עקב ניזול חלקי).



Rudolph Julius Emanuel Clausius 1822-88

1850 מנסח לראשונה בבהירות את שני חוקי הטרמודינאמיקה. מרחיב עקרונות קרנו לאנטרופיה – מידת הסדר במערכת. החוק השני של הטרמודינאמיקה – אנטרופיה יכולה רק לעלות: חוק הטבע שדברים רק מתיישנים ומתבלים... חום עובר מטמפרטורות גבוהות לנמוכות. מולקולות גאז נעות אקראית באנרגיה קינטית זהה.
1851 טומסון נותן ניסוח אחר לחוק השני.
1870 מוכיח scalar virial theorem המקשר בין הממוצע הזמני של האנרגיה הקינטית הכוללת למערכת רב חלקיקית, לכוחות שפועלים עליה.

Joule & Thomson (Kelvin)

1852 מדגימים קירור גז בהתפשטות מהירה – אפקט ז'אול-טומסון (או קלוין).

Henri-Victor Regnault

1852 מדגים סטיות מחוק בויל בטמפרטורות נמוכות. שחייץ (עשה אקסטרפולציה) לאפס מוחלט של -273°C .

Hendrik Roozeboom

1854 ממדידות מסיק חוק הפאזות, שהוסק תיאורטית אח"כ ע"י גיבס.

Helmholtz

1854 מציע מוות טרמי של היקום.

Rudolf Julius Emanuel Clausius 1822–1888

1854 מבסס את תיאורית קלאוזיוס ל- dQ/T אך עדין לא קורא לו בשם אנטרופיה.
1857 חיבור מקיף על התורה הקינטית של גאזים והמקור הקינטי של חום בפילוג
תנועה סטטיסטי בין חלקיקים. 1858 דרך חפשית ממוצעת נובעת מהמודל הקינטי.

Rankine

1854 מציג פונקציה טרמודינאמית שתקרא בהמשך אנטרופיה.

Karl Krönig 1822-79

1856 מפרסם מאמר בתורה הקינטית המתאר מולקולות גאז הנעות בקוים ישרים בין
התנגשויות, כנראה בעקבות קריאת עבודות ווטרסטון Waterston.

Rudolf Julius Emanuel Clausius 1822 –1888

1857 משוואת קלאוסיוס לגאז לא אידיאלי
דומה לתיקון ואן דר ואלס
מיחס אנרגיות של לא רק מהירות אלא גם סיבוב ותנודה למולקולות גאז. שיקולים פיזיקאליים לתמיכה בחוק אבוגדרו.
מניח פילוג מהירויות ומסביר התאדות מנוזל בגין מולקולות מהירות הבורחות משטח הפנים.
1862 אנטרופיה.
1865 אנטרופיה והחוק השני של הטרמודינאמיקה
משתמש בתורת קרנו לקבל אנטרופיה בהגדרתה המודרנית,
ושני חוקי הטרמודינאמיקה (בלי קלוריק).

$$RT = \left(P + \frac{a}{T(V_m + c)^2} \right) (V_m - b)$$

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Gustav Kirchhoff

1859 על סמך החוק השני של הטרמודינאמיקה מראה שספקטרום קרינת גוף שחור תלויה רק בטמפרטורה ולא בחומר הפולט.

Sir Joseph Swan

1860 מנורת להט עם חוט פחם.

Maxwell

1860 צמיגות גז אינה תלויה בלחץ או צפיפות.

1877 מגלה שבתערובת גזים בצנטרפוגציה צפיפות כל גז אינה תלויה באחרים – מאפשר הפרדת גזים בצנטרפוגה , כך הופרד אורניום רדיואקטיבי לייצור פצצת האטום).

John Tyndall

1863 חום כמודל לתנועה – מפיץ רעיון מקסוול לחום.

Henri Becquerel

1864 מציע פירומטר אופטי.

Calender-Van Duesen

1885 טרמומטר מבוסס על התנגדות חוט פלטיניום.

Henri-Louis Le Chatelier

1892 בונה פירומטר אופטי ראשון – מדידת טמפרטורה של גופים לוהטים שלא ניתן להתקרב אליהם פיזית.

Josef Loschmidt's 1821-1895

1865 משתמש בתורה הקינטית של גאזים של מקסוול להעריך צפיפות ומספר של מולקולות וצמיגות גאזים.

1876 מבקר את H theorem של בולצמן מאחר ואינה תואמת להפיכות (רוורסיביליות) חוקי הפיזיקה שבבסיסת התורה הקינטית הם הפיכים בזמן, אך התורה הקינטית של בולצמן אינה הפיכה. Loschmidt's reversibility paradox

Ludwig Boltzmann 1844-1906

1868 מרחיב את התורה הקינטית של הגאזים של מקסוול: פילוג האנרגיה הקינטית בין חלקיקים מתנגשים לפי תורת ההסתברות ואנליזה של צרופים (קומבינציות). הפילוג האקספוננציאלי (פקטור בולצמן) הוא הבסיס למכאניקה סטטיסטית. 1872 בולצמן מנסח את משוואות תלויות הזמן של פונקציות הפילוג distribution functions במרחב הפזות. מפרסם H-theorem – במערכות מבודדות עולה האנטרופיה. משתמש ברמות אנרגיה בדידות, ומשאיף את ההבדל בין רמות לאפס. למאמר גל התנגדות רחב.

1877 הקשר בין אנטרופיה והסתברות: אנטרופיה היא לוגריטם של נפח מרחב הפזות המתמלא ע"י מצבי מערכת. מנסח את הגירסה של מכאניקה סטטיסטית לחוק השני של הטרמודינאמיקה.

Boltzmann, Gibbs

1871–89 פיתוח המכאניקה הסטטיסטית.

Josiah Willard Gibbs 1839-1903

1873 שיטה גראפית לטרמודינאמיקה של נוזלים.

1873 המשוואה היסודית המקשרת שינוי אנטרופיה ואנרגיה פנימית: $dU = TdS - PdV$

Thomson

1874 מציג רשמית את החוק השני של הטרמודינאמיקה.

Planck

1879 מתנגד לרעיון שהחוק השני של הטרמודינאמיקה תלוי בצופה, או בידיעות שלו.
מכאן אי-הפכיות היא חוק טבע.

Josiah Willard Gibbs

1876 ? גיבס מפרסם חלק ראשון של מאמר על שוי משקל במערכות הטרודגניות – מעברי פאזה, צברים (אנסמבל) סטטיסטיים, אנרגיה חפשית כמניע ריאקציות כימיות, וטרמודינאמיקה כימית.
1878 פירסום החלק השני.
1883 טובע את המושג "מכאניקה סטטיסטית" ליישום תורה הקינטית בטרמודינאמיקה.

Henri-Louis Le Chatelier

1884 עקרון לה שטליה מגדיר שינוי במערכת בשוי משקל בתגובה להפרעה חיצונית, בכוון שינסה להקטין את השינוי החיצוני. החוק נוסח תחילה לגאזים ושינויי לחץ או טמפרטורה, אך הוכלל לריאקציות כימיות. למשל לתהליך הבר ליצירת אמוניה מחנקן ומימן

$$\text{N}_2 (\text{g}) + 3\text{H}_2 (\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{NH}_3 (\text{g}) + \text{heat}$$

תוספת מימן "דוחפת" את המערכת ימינה, הורדת אמוניה – ימינה, וחימום – שמאלה.

Ernst Zermelo 1871-1953

לאחר שלוקסמיט Josef Loschmidt ביקר את עלית האנטרופיה של בולצמן בגלל היפוך זמן, שאז האנטרופיה תרד, הקיים באופן מיקרוסקופי, זרמלו המתמטיקאי הציג פרדוקס משלו ב-1896 המבוסס על פואנקרה, שחקר בעית 3 גופים, והוכיח מחוקי שימור שלמרות שאין לבעיה פתרון אנליטי, המערכת חוזרת לעצמה במרחב הפזות (מקום וזמן) בקירבה אפסילונית בגלל חוקי שימור. 1890 הוא הוכיח זאת גם למערכת של n גופים: "Poincaré recurrence time" מה שאומר שהאנטרופיה לא עולה אלא חוזרת לערכה ההתחלתי. תשובת בולצמן: עלית האנטרופיה היא סטטיסטית: הינו ממוצעת על צבר כל המערכות האפשריות. רק בחלק זעיר מהצבר וברגע קצר של זמן אמנם יהיו מערכות עם אנטרופיה נמוכה.

Faraday

1823 מגלה ניזול של גאז כלור באלקטרוליזה (בגלל לחץ, ובטמפרטורת החדר).

Karl Paul Gottfried von Linde

1881 לינדה בונה את המקרר הפרקטי הראשון עם אמוניה נוזלית.

James Dewar

1892 ממציא את מיכל הזכוכית המבודד בואקום ומצופה כסף - הדיואר.
1898 מנזל מימן בדיואר.

Cailletet and Raoul Pictet

1896 מנזלים חמצן (אחרי 100 שנים של נסיונות).

טכנולוגיה

תעופה, רכבות וספינות

התפתחות הטייס

Etienne Gaspar Robertson and Lhoest

1803 עולים מהמבורג בבלון לגובה 7,280 מטר.

Frenchman André-Jaques Garnerin

1803 עף מרחק 395 ק"מ מפריז לקלזון בבלון מונטגולפייר.

Joseph-Lois Gay-Lussac and Jean Baptiste Biot

1804 סדרת מדידות כח הכבידה, המפריכות את ההנחה הנפוצה שהוא יורד בגובה.

J. Kaiserer

1804 מציע לתמרן תנועת מונטגולפייר Montgolfière בעזרת נשרים מאולפים.

Sir George Cayley

1804 מנסה בהצלחה דאון עם משטחים ניתנים לכוון כהגאים של מטוס מודרני.

Jakob Degen

1807 השען הוינאי עורך ניסיון במעוף כנפיים המונעות בשסתומים.

1808 מנסה לשלב את הכנפיים הממונעות במונטגולפייר.

1809 דגן מסיע בלון מימן ע"י מדחפים.

Sir George Cayley

1809 מפרסם ספר "שיוט אירי" בו לראשונה מציג עקרונות פיזיקאליים לתעופת גופים הכבדים מהאוויר.

Albrecht Ludwig Berblinger

1811 ברבלינגר, הנקרא "החיט מאולם" מתרסק לדנובה עם העתק מכונת התעופה של דגו.

Charles Green

1812 שימוש במנורת גאז למילוי מונטגולפייר.
1836 מרחף במונטגולפייר המוסק בגאז פחם (תערובת מימן, מתאן ופחמן חד-חמצני) מלונדון לוילבורג, מרחק 722 ק"מ עם שני נוסעים.

Samuel Morey

1826 מנוע שריפה פנימית.

John Wise

1838 וייס האמריקאי בונה מתקן לנעילת מונטגולפייר בעזרת עוגן, כדי שבירידתו לא יגרר ברוח.

Charles Green and the astronomer Spencer Rush

1839 עולים בבלון לגובה 7,900 מטר.

William Samuel Henson

1842 המהנדס האנגלי משרטט מטוס מונע במנוע קיטור, הממשיך את קיילי בדאון עם הגאים.
בית הנבחרים האנגלי דוחה בליגלוג הקמת "חברת תובלה אווירית".

1849 בלון מעופף אוסטרי מפציץ את ונציה.

Francisque Arban

1849 מרחף מעל האלפים ליד טורינו.

Sir George Cayley

1849 בונה אווירון נושא אדם עם 3 כנפיים שנגרר במורד כמו דאון.
1853 רחפת בלון עם הרכב שלו כעוזרו הנווט.



Henry Giffard

1852 ספינת אויר המונעת בקיטור מגיעה למהירות 10 ק"מ לשעה.

1852 הקמת החברה האירוסטטית הצרפתית.

brothers du Temple de la Croix

1857 מגישים פטנט על אוירון ממונע במנוע קיטור ,
אחרי נסיונות מוצלחים במודלים.

Captain Jean Marie Le Bries

1857 עף במתקן אותו בנה אחרי שחקר את תעופת האלברוס-
צפור שחוצה אוקיאנוסים במעופה.

Nadar

1858 צילום אוירי ראשון.

John Wise and 3 companions

1859 מרחפים למרחק 1,292 ק"מ מסנט לואיס לניו-יורק.



The aeronaut Coxwell and the physicist Glaisher

1862 נוסקים לגובה 9,000 מטר.

Jules Verne

1865 ספרו "המסע לירח" מתאר שיגור רקיטה מכף קנברל בפלורידה, משם כעבור כמאה שנים
האמריקאים שלחו אדם לירח.

d'Esterno

1865 בסיפרו "על תעופת צפרים" מציין שריחוף כדאון אופייני לצפרים כבדות, וגם אדם יוכל לדאות ברוח.

Louise Pierre Mouillard

1865 איכר ואמן צרפתי עף בדאון. מפרסם ספר "אימפרית האויר" על תעופת צפרים. חושב שדאיה ושיוט אך לא משק כנפיים יאפשרו טיסה.

Henry Giffard

1867 בונה בלון ל-20 אנשים בתערוכה הבינלאומית בפריז.

M.Boulton

1868 מגיש פטנט על תעופה בכנפיים. תערוכה ראשונה לתעופה בלונדון (ארמון הקריסטל).

1870-1 במלחמה הצרפתית-פרוסית בלונים משמשים לשבירת המצור על פריז.



Alphonse Pénard

1871 בונה מודל דאון עם מדחף המונע בגומיה.

Wenham and Browning

1871 נסיונות במנהרת אויר.

Dupuy de Lome

1872 מהנדס ימי שמגיע למהירות 9-11 ק"מ לשעה במטוס מונע בכח השרירים.

Paul Haenlein

1872 בדיקת ספינת האויר הראשונה עם מנוע גאז בברון, גרמניה, המגיעה למהירות 19 ק"מ לשעה.
הנסיונות נפסקו מחסר תקציב.

Vincent de Groof

1874 נהרג בתאונת תעופה עם משק כנפיים.

Otto and Gustav Lilienthal

1874 נסיונות עילוי וסחיפה של כנפיים שפורסמו ב-1889, וכוללים יתרונות משטח כנף קמור.

Thomas Moy

1875 בוחן מטוס ממונע קשור עם מוטת כנפיים של 4 מטר.

Gaston Tissandier

1875 טיסה מדעית של מונטגולפייר "זניט" לגובה 8,000 מטר מסתיימת במוות שני ארונאוטים.

Penaud and Gauchot

1876 מגישים פטנט למטוס ממונע מנגנון קיפול התושבות, כנף מוטה מעלה, והגה כוון.

Enrico Forlanini

1877 טיסה ראשונה של הליקופטר מונע בקיטור.

Victor Tatin

1879 בונה מודל מטוס עם מנוע אויר דחוס עם שני מדחפים, הנוסק מהקרע.

Alexander Fjodorowitsch Moshaiski

1881 מקבל פטנט למטוס מונע בקיטור.
1882 "החברה הגרמנית לקידום תעופה" מוציאה עיתון.

Gottlieb Daimler

1883-6 ממציא מנוע שריפה פנימית של בנזין מהיר המתאים למטוסים בגלל יחס כח למשקל.



Gaston Tissandier & brother, Renard and Krebs

1883-4 ספינות אוויר עם מנוע חשמלי של סימנס. רנרד וקרנס הצליחו לנסוק ולנחות באותה נקודה. מעיפים ספינה למרחק 8 ק"מ ב-23 דקות.

Horatio F. Philipps

1884 פטנט לפרופיל כנף מעוקם.

Hervé and Alluard

1886 תעופת מונטגולפייר באורך 24 שעות.

Otto Lilienthal

1889 "מעוף צפורים כבסיס לתעופה" מנתח יתרון מבנה כנפיים מקושתות.

Ader

1890 מטוס שקרא לו "Eole" ממריא בצרפת.

Otto Lilienthal

1891 עף 25 מטרים, ונחשב לדאיה הבטוחה הראשונה ללא קפיצה למטוס לשם טיסה.

Hargrave

1893 מדגים באוסטרליה עפיפון קופסא שהווה דוגמא לתכנון עפיפונים ומטוסים.

Philipps

1893 נסיון שנכשל להעיף מטוס בעל 50 כנפיים, ואח"כ 4 מערכות כנפיים.

Berson

1894 המטאורולוג הגרמני מטפס בבלון לגובה 9,155 מטר.

H. S. Maxim

1894 מדגים האצה על הקרקע לפני נסיעה במטוס גדול. כשהתרסק הפסיק נסיונותיו מחוסר מימון.

Otto Lilienthal

1894 בונה באופן סידרתי דאונים ומגיע בדאיה למרחק של 250 מטר.

Octave Chanute

1894 עורך ספר "התקדמות התעופה" המסכם את הטכנולוגיה הידועה.

Percy Sinclair Pilcher

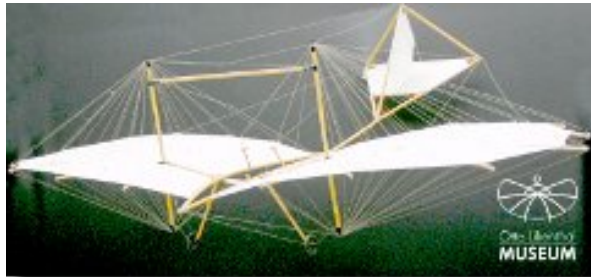
1895-9 באנגליה מפתח דאונים ממונעים, אך נהרג בתאונת תעופה.

Prof. Samuel Pierpont Langley

1896 באמריקה, הטיסה הראשונה במטוס עם מנוע קיטור למרחק 1 ק"מ.

Otto Lilienthal

1896 נהרג בתאונת התרסקות.



Octave Chanute

1896 מארגן מחנה טיסה ליד אגם משיגן, הדאון עם שתי כנפיים שפיתח היה בסיס לפיתוחים בהמשך.

August von Parseval and Bartsch von Sigsfeld

1896 בגרמניה ממציאים בלון-עפיפון השימושי ברוחות חזקות, לצורך תצפית.

S. A. Andrée, N. Strindberg and K. Fraenkel

1897 יוצאים משפיצברגן למסע תגליות בקוטב, ונמצאו מתים שלש שנים אח"כ, אך הסרטים שצילמו נשמרו.

Friedrich Hermann Wölfert

1897 מטוס מונע במנוע בנזין מתלקח וגורם למותו.

David Schwarz

1897 ההונגרי מתכנן מטוס אלומיניום אותו מטיס בברלין.

Gustave Whitehead

1899-1901 בקונטיקט טוען לטיסה במטוס עם מנוע קיטור למרחק 500 מטר. אין אישור להשג זה.

the Wright brothers

1900-3 נסיונות של דאיה, מנהרות אויר, בקרה ומנוע קל מובילים להצלחה בטיסה במטוס הכבד מהאוויר.

Ferdinand Earl of Zeppelin

1900 הרחפה הראשונה בבלון מתכת.

Berson and Süring

1901 ברחפה למחקר מטאורולוגי מגיעים לגובה 10,800 מטר.

Alberto Santos-Dumont

1901 הברזילאי מרחף סביב מגדל אייפל ונוחת בנקודת הנסיקה. זוכה בפרס Deutsch בסך 100,000 פרנק.

W. Kress

1901 מטוס ימי שבנה מתרסק בנסיקה.

Prof. Langley

1901 הטיסה הראשונה במטוס המונע במנוע בנזין.

The Wright Brothers

1899 מתחילים בנסיונות לשלוט בתנועת מטוס ע"י הזזת כנפיים והגאים.

1901 משפרים את מבנה הכנפיים במדידות במנהרת רוח.



האחים רייט למדו מכשלונות קודמיהם בעיקר בצורך לייצב את המטוס ע"י יצירת כוח הנוגד להטית הכנפיים ע"י מבנה הכנף והיגוי ע"י שינוי זווית קצה הכנף בדומה לציפורים.

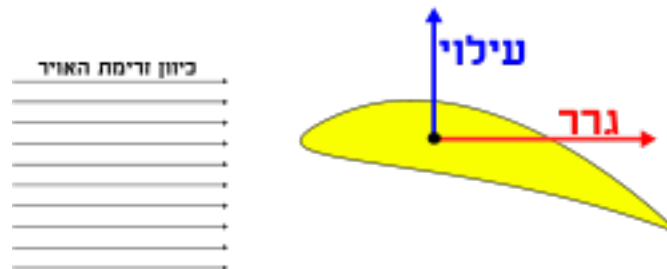
תרגילי הערכה באירונותיטיקה

חשבו את המשקל המכסימאלי שניתן להרים בכדור פורח בעל קוטר של 10 מטר, הממולא:

1. באויר חם בטמפרטורה 150 מעלות צלזיוס
2. במימן.

חפשו את הנתונים להם אתם זקוקים בחיפוש במרשתת.

חשבו את כוח העילוי הפועל על מטוס הנע במהירות 30 קמ"ש ושטח הפנים של כנפיו 40 מ"ר. מה צריך כדי שיתקיים כח שקול של עילוי על הכנף?



רכבות ומנועי מכוניות

George Stephenson

1814 סטיבנסון בונה את הקטר הראשון.

1825 השלמת קו המסע הראשון **Stockton and Darlington Railway**.

הנוסעים נלקחו מהתחנה במרכבות סוסים...

1829 קטר קיטור.

Charles Fox

1832 פטנט למחלפים של פסי רכבת.

John Deere

1837 מחרשת פלדה.

Robert Davidson

1837 קטר חשמלי.

Rudolf Diesel

1895 מנוע דיזל.

Nikolas August Otto

1876 מתכנן את המנוע בעל 4 פעימות.

רכבות וספינות נהר

John Scott Russell

1834 תכנן עגלת קיטור. 6 עגלות ניבנו ושימשו בקו גלזגו-פייסלי כל שעה, ושתיים נשלחו ללונדון ושימשו בקו לגריניג'. עגלות הסוסים טענו נגדם שהם הורסים את הדרך (כובד מנוע הקיטור?) והקו נפסק כשעגלה התהפכה וגרמה למות נוסעים.

1834 במחקר גלים במים הנגרמים ע"י דוברות הנמשכות ע"י פרדות בתעלות תובלה, כדי לשפר פרופיל הדוברות, מבחין ב"גל בודד" soltary wave הנוצר לאחר עצירת הדוברת והמכיל תנועת "הר" מים מהירה בהמשך התעלה. הוא בונה טנק מים בביתו וחקר התופעה.

חוקיה: גל שמהירותו וגובהו תלויים בעומק התעלה, ושני גלים אינם מתאבכים אלא הגדול משתלט על הקטן. התופעה מניעה פתרונות חדשים למשוואת הגלים (ריילי 1876) הכוללת לא ליניאריות ורוויה: "סוליטונים" קיימים בסיבים אופטיים, ובדינאמיקה של חלבונים.

1848 נסיונות המאששים אפקט דופלר (מ-1842).

1873 תכנן את הרוטונדה לתערוכה הבי"ל בוינה - כיפה בקוטר 108 מטר ללא תמיכות מלבד בהקף.

נחלים

מכניקת הנוזלים – הידרודינאמיקה

ההתקדמות במתמטיקה, בעיקר ניסוח משוואות דיפרנציאליות ויישומן לבעיות דינאמיות תלויות בזמן ובמקום, איפשרה לפתח את התשתית הכמותית להתנהגות ותנועת נוזלים.

בתחילה הוגדרו בנוזל משתנים המאפיינים את מצבו: כגון לחץ, מהירות זרימה, וצפיפות. כשנוסחו החוקים במצבים סטאטיים, ההרחבה לזרימת נוזלים גילתה תכונות לא צפויות, כגון ירידת לחץ הנמדד בחריר אנכית לזרימה (צינור ונטורי, המשמש עד היום למדידת מהירות מטוסים). כדי לתאר תופעות אלה ניסחו חוקי התנועה לנוזל שהתבססו על חוקי שימור ורציפות ל"אלמנט" של נוזל הנע בזרם, ויושמו חוקי ניוטון לחישוב מהירות תנועתו, והשפעת החיכוך עליו בדפנות הצינור בו הוא זורם.

לפיתוח משוואות התנועה של נוזלים היתה השפעה מכרעת על פיתוח משוואות האלקטרודינאמיקה (מלכתחילה כאילו תיאור זרימת האתר).

נקודות ציון בעבר – מכאניקה של נוזלים FLUID MECHANICS

הבנת אינטואיטיבית של תכונות נוזלים מתבטאת בתכנון חיצים, ספינות ומערכות השקיה.
212–287 לפה"ס ארכימדס – חוק הציפה. אטומי הנוזל מפעילים כוח שווה לכל הכוונים. משאיבת מים (בורג ארכימדס).

120 לפה"ס באלכסנדריה של בית תלמאי סיפון ומשאיבת דחיסה עם שסתום פותחו ע"י הירווקטסיביוס Hero – Ctesibius
במצריים היה נפוץ גלגל עם דליים לשאיבה, והשתמשו בשסתומים בדליים כדי שישקעו בקלות במים

Sextus Julius Frontinus 40-103 B.C.

הסנטור פרונטינוס – תכנון אמות אספקת המים של רומא
הבין שכמות המים היוצאת מחריר תלויה לא רק בגודל החריר אלא גם בגובה המים

Al-Khazini 1115–1130 Abu Rayhan Biruni 973–1048

שיטות נסיוניות לחקר נוזלים. בירוני מבחין בהפרש המשקל הסגולי של מים מתוקים ומי מלח, ושל מים חמים וקרים.

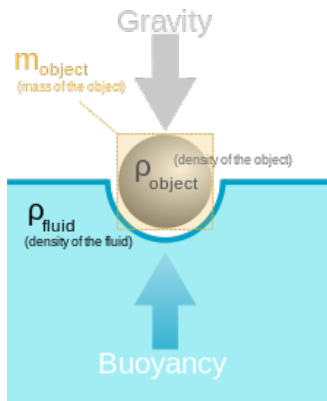
במאה ה-9 האחים בנו מוסה Banū Mūsā

Al-Jazari 1206

ספרי המצאות המכילות מערכות הידראוליות עם היזון חוזר, משאבות מרימות מים עם שני צילינדרים ושסתומים צמודים (אחד סגור שני פתוח).

1452–1519 **ליאונרדו דה וינצ'י** מתאר נימיות (קפילריות)

1564–1642 **גלילאו גליליי** דינאמיקה של נוזלים, נפילה בנוזל, סיפון, זרימת מים בנחלים ובצינורות



מאה 17

1608–1647 אוונגליסטה טוריצ'לי **Evangelista Torricelli**, (תלמידו של גליליי)

1643 חוק טוריצ'לי – לחץ תלוי רק בגובה הנוזל מעל.

1648 אושר נסיונית ע"י **Raffaello Magiotti**

1629 זרימת מים בתעלות ובצינורות **Castelli**

1620–1684 אדמה מריוט **Edme Mariotte** מזרקות בוורסיי.

1623–1662 בלייז פסקל מושך מים ממגדל. כספית יוצרת ואקום.

Domenico Guglielmini 1655–1710

חיכוך נוזל הזורם עם דפנות התעלה או הצינור.

1642–1727 **ניוטון** מגדיר מאמץ גזירה במוצק ובנוזל, זרימה מחרירים, חקר גלים בנוזל.

מאה – 18

Henri de Ptiot – הנרי דה פיטו 1695–1771

צינור פיטו יוצר תת לחץ אנכי לזרימה.

Daniel Bernoulli – דניאל ברנולי 1700–1782

עקרון ברנולי – בעלית מהירות הזרימה יורד הלחץ. סילון.

Leonard Euler – ליאונרד אוילר 1707–1783

משוואות רציפות בנוזל צמיג.

Jean de Rond d'Alembert ד'למבר 1717–1783

רפרקציה בנוזל, פרדוקס ד'למבר: אפס כוח על כדור בנוזל חסר צמיגות.

Pierre Louis Georges Dubuat 1734–1809

כוחות החיכוך בנוזל זורם עם המיכל ועם עצמו מאזנים את כוחות הכבידה ולכן מהירותו קבועה.

Chézy, שזי, 1718–1798

מהנדס הידרולוגיה, מנסח משוואת זרימה בצינור ובתעלה.

Jean Charles Borda בורדה 1733–1799

מהנדס ימי, שיפר גלגלי מים ומשאיבות. קוי זרימה – שימושים לספינות.

Joseph-Louis Lagrange 'לגראנג' 1736–1813

הרחבת הידרוסטטיקה להידרודינאמיקה. הכוח שמפעיל נוזל בזרימה על גוף.

Giovanni Battista Venturi ונטורי 1746–1822

חוק ונטורי, צינור ונטורי.

Pierre-Simon Laplace לפלס 1749–1827

משוואת לפלס: משוואת רציפות לדינאמיקה של נוזלים.

מאה – 19 (ראה פרטים בשקפים להלן)

George Gabriel Stokes (1819-1903) Irland

Claude Louis Marie Navier נאוויאר 1785–1836

משוואת סטוקס–נאווייר לתנועת כדור הנופל בנוזל.

Augustin Louis de Cauchy קושי 1789–1857

משוואת קושי–רימן לשדה וקטורי לתנועת נוזל – התקדמות גלים בנוזל.

Hermann von Helmholtz הלמהולץ 1858

חוקר תנועת נוזלים במערבולות.

Gaspard Riche de Prony 1755–1839

אסף עבודות על מהירות זרימת מים וערך משוואות נסיוניות.

Johann Albert Eytelwein 1801

אסף עבודות על יציאת מים מצנורות ומיכלים והתנגשות עם מוצקים. לגלגל מים יעילות מכסימאלית כשמהירותו ההקפית חצי ממהירות סילון המים.

Jean Nicolas Pierre Hachette 1816–7

יציאת מים בחרירים ממיכל.

Andreas Rudolf Harlacher 1872–5

זרימה בנהרות.

Adolf Eugen Fick 1829–1901

1855 שני חוקי פיק לדיפוזיה של גאז או מוצק המומס בנוזל:

1. השטף יחסי לגרדיאנט הריכוז של החמר המומס:

$$J = -D \frac{d\varphi}{dx}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$$

2. שינוי הריכוז בזמן לפי משוואת הדיפוזיה

Gotthifl H. Ludwig Hagen האגן 1797–1884

טובע את השם "הידרודינאמיקה". הנדסת מים. מוצא חוק פואסיי לזרימה בצנור עגול באופן בלתי תלוי – משוואת האגן-פואסיי.

Jean Louis Poiseuille פואסיי 1799–1869

משוואות זרימת נוזל צמיג בצנור עגול.

1805 לפלס ויאנג מנסחים משואה לנימיות הקשורה במתח פנים וזוית הרטבת הנוזל את הזכוכית wetting angle.

1830 גאוס כותב את המשוואות הדיפרנציאליות לנימיות.

Henri Philibert Darcy דארסי 1803–1858

זרימת נוזל התווך נקבובי, כמו חול ושכבות קרקע, חשוב למים ולנפט.

Julius Weisbach וויסנבך 1806–1871

משוואת דארסי-וויסנבך: זרימת נוזל בתווך נקבובי (חול ושכבות קרקע) חשוב למים ולנפט. בנה מערכת אספקת מים לדיז'ון.

1810–1879 פראוד William Froude התנגדות המים למבנה הספינה.

1816–1897 מנינג Robert Manning מהירות זרימה בתעלות פתוחות.

1819–1903 סטוקס George Gabriel Stokes כדור נופל בנוזל. משוואות נאוויאר-סטוקס.

1838–1916 מאך Ernst Mach מהירות מאך – יחס למהירות הקול. גלי הלם. בום עלקולי.

Osborne Reynolds ריינולדס 1842–1912

1883 ריינולדס חוקר זרימת מערבולות (טורבולנטית), מספר ריינולדס, קוויטציה.

Lord Rayleigh–John William Strutt ריילי 1842–1919

אי יציבות סילון. משוואת ריילי פלסט וקריסת בועות.

*** **לורד קלוין (ויליאם טומסון)** תיאוריה שאטומים הם מערבולות באתר. אמנם התיאוריה אינה נכונה אך חישובים על משיכה בין מערבולות משכו ענין מכמה חוקרים.

Walter Gröbli J. L. Synge E. A. Novikov H. Aref

Vincez Strouhal שטרוהאל 1850–1922

היפר-סוניק. גלים הנעים במערבולות מספר שטרוהאל לתנודות בנוזל.

Edgar Buckingham בקינגהם 1867–1940

דיפוזיה של גאז בקרקע התלוי בלחות ובנימיות.

Mortiz Weber וובר 1871–1951

מספר וובר לזרימת תערובת נוזלים שאינם מתערבבים כמו מים ושמן, הנותן חסם ליצירת בועות. מתח בגבול נוזל-גאז או נוזל-נוזל.

Ludwig Prandtl פרנדטל 1875–1953

אירודינאמיקה של כנף מטוס – עילוי וסחיפה. מתאר שכבת הגבול בין נוזל לדופן.

Lewis Ferry Moody מודי 1880–1953

דיאגרמת מודי-תלות זרימה בחיספוס פני הצינור.

Theodor von Karman קרמן 1881–1963

זרימת אויר סופרסונית והיפרסונית. זרימה במהירות מעל לקול, הליקופטר, מנהרת רוח, רקיטות דלק מוצק.

Paul Richard Heinrich Blasius בלסיוס 1883–1970

סחיפה של משטח הגבול בנוזל, משפט בלסיוס לסחיפת גוף בנוזל. זרימה למינארית וטורבולנטית.

Hagen-Poiseuille equation

Jean Louis Marie Poiseuille 1797- 1869 French physicist/physiologist

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen 1797 –1884

התעניין בזרימת דם בעורקים וורידים

משוואת האגן-פואסל: נפילת הלחץ P בזרימה למינארית של נפח נוזל לשניה Q

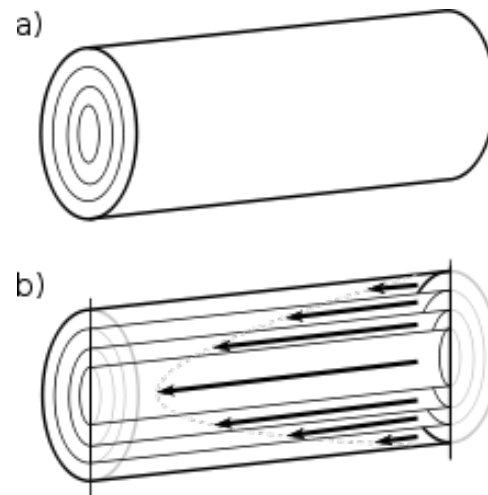
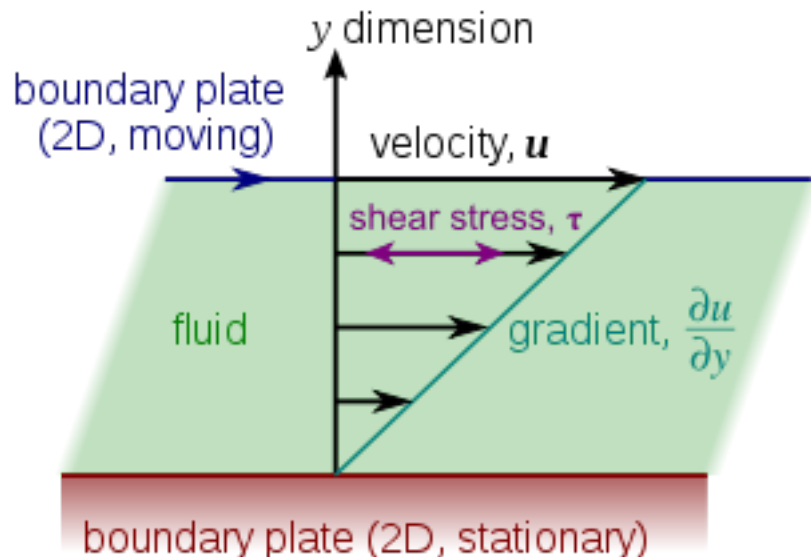
בצינור באורך L ורדיוס r צמיגות הנוזל μ

$$\Delta P = \frac{8\mu LQ}{\pi r^4}$$

יחידת הצמיגות, פואז Poise נקראת על שמו.

מדידת צמיגות – מהכוח F הדרוש להסיע משטח ששיטחו A במהירות u אם גובה y של הנוזל מפריד בינו לבין משטח קבוע

$$F = \mu A \frac{u}{y}$$



Matthew Fontaine Maury in 1855

גיאוגרפיה פיזיקאלית. אוקינוגרפיה

Pierre Louis Georges Dubuat 1734–1809

הבין כי כוחות החיכוך בנוזל זורם עם המיכל ועם עצמו מאזנים את כוחות הכבידה ולכן מהירותו קבועה.

George Gabriel Stokes (1819-1903) Ireland

1843 סטוקס מצא את הכוח הפועל על כדור ברדיוס R הנע במהירות V בתוך נוזל צמיג.



תרומות אחרות של סטוקס:
במתמטיקה ובפלואורוסצנציה (ראה שם)

1843 סטוקס מצא את הכוח הפועל על כדור ברדיוס R הנע במהירות V בתוך נוזל צמיג

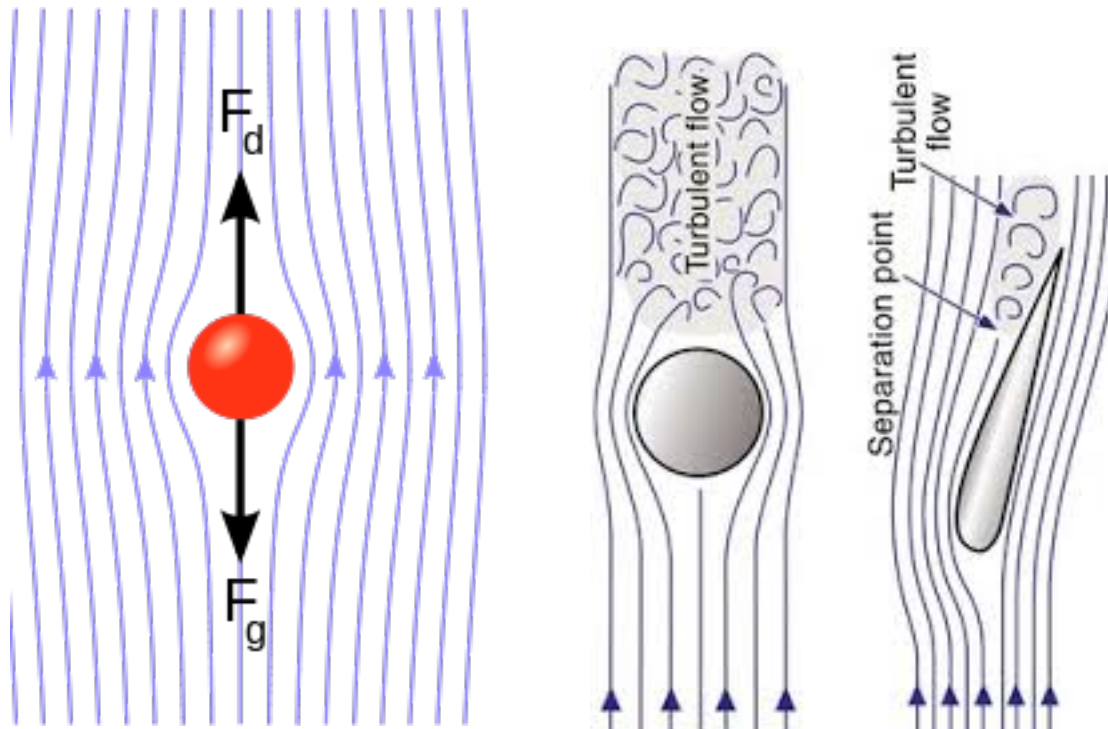
$$F_d = 6\pi \mu R V \quad \text{– חוק סטוקס:}$$

אם נתן לכדור ליפול, הוא יגיע למהירות סופית V התלויה בכוח העילוי של ארכימדס + המשקל + החיכוך עם הנוזל.

$$V = \frac{2}{9} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\mu} g R^2$$

צמיגות נוזל ליחידת משקל נמדדת בסטוקס:

$$\text{Stokes} = \text{Poise} / \text{fluid-density (gr/cc)}$$



אם נמשוך את הכדור מהר מאד נגלה שהוא יוצר מערבולות אחריו והכח הדרוש גבוה יותר מזה של משוואת סטוקס. כנפי המטוס מתוכננות שלמרות מהירותו לא יהיו מערבולות מאחורי הכנף. 1850 משוואת הכח על כדור נופל בנוזל של סטוקס מצוטטת ע"י קלוין. סטוקס מציג את הבעיה כחלק מבחינה לקבלת פרס סמיט Smtih. וכנראה ידע את ההוכחה. מקסוול שנבחן ופתר את הבעיה פירסם אותה אח"כ בשם סטוקס.

Osborne Reynolds 1842–1912

1883 חוקר התנהגות זרימה מעורבלת, טורבולנטית, בניגוד לזרימה למינארית) ומציג "מספר ריינולדס" המקשר תנועת הנוזל לכוחות צמיגות, וקובע את המעבר מזרימה למינארית לטורבולנטית. הרעיון הוצע כבר ע"י סטוקס 1851, אך נקרא ע"י ארנולד זומרפלד ע"ש ריינולדס שהפיץ את המושג. מספר ריינולדס הוא חסר מימד:

מספר ריינולד = יחס הכח האינרציאלי (מסה*תאוצה) לכח החיכוך (צמיגות*גרדיאנט מהירות*שטח)

$$R_e = \frac{(\rho L^3) \left(\frac{v}{t}\right)}{\mu \left(\frac{v}{L}\right) L^2} = \frac{(\rho L^3) \left(\frac{1}{t}\right)}{\mu \left(\frac{1}{L}\right) L^2} = \frac{(\rho L^2) \left(\frac{1}{t}\right)}{\mu} = \frac{(\rho) \left(\frac{L}{t}\right) (L)}{\mu} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}$$

$$R_e = \rho u L / \mu = u L / \nu$$

ההגדרה:

כאשר:

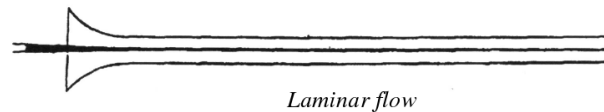
ρ צפיפות הנוזל

u מהירות הנוזל ביחס לגוף

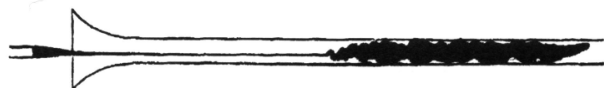
L מימד אורך אופייני

μ צמיגות דינאמית לנוזל

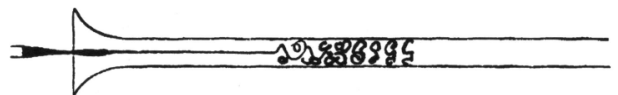
$\mu/\rho = \nu$ צמיגות קינמטית לנוזל



Laminar flow



Turbulent flow



Turbulent flow (observed with an electric spark)

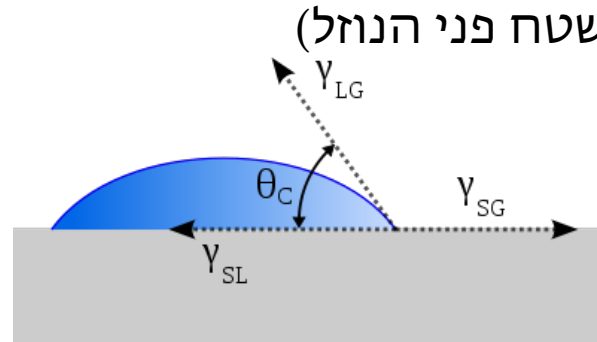
המעבר מזרימה למינארית לטורבולנטית קורה במספרי ריינולדס סביב 1000.





Pierre-Simon Laplace 1749-1827

1805 תיאוריה של נימיות נוזלים וזוית מגע של נוזל עם משטח



מתח הפנים γ (כח ליחידת אורך להגדלת שטח פני הנוזל)
ניתן לקבל מזוית המגע של טיפה θ_C
אנרגית מגע נוזל-מוצק ליחידת שטח

הפרש הלחצים בגבול נוזל אוויר Δp
הגורם לעלית הנוזל בקפילרה

עקמומיות ממוצעת H

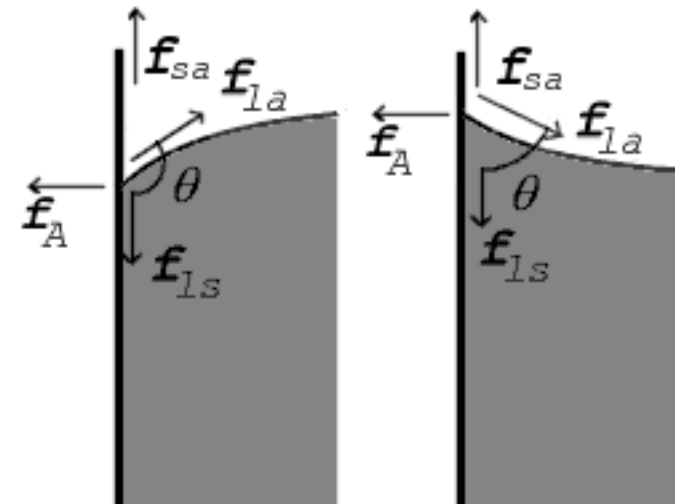
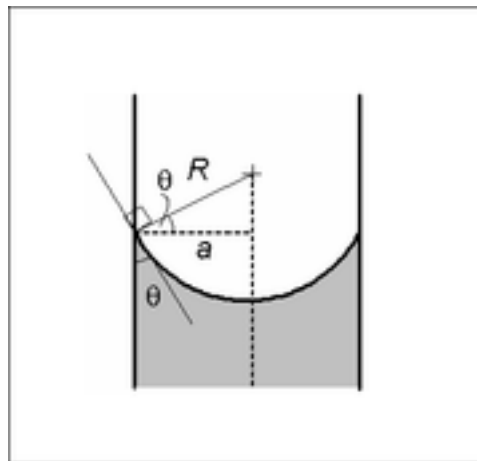
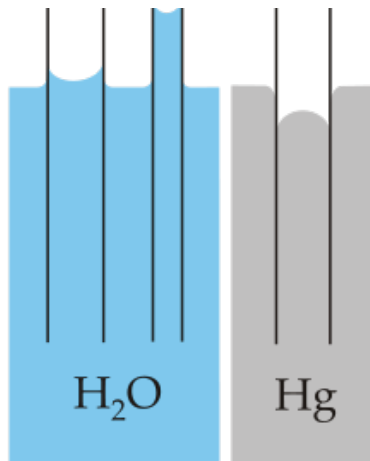
רדיוסים ראשיים R_1, R_2 (אנכיים זה לזה)
רדיוס הקפילרה a

זוית המגע בין הנוזל לקפילרה θ

$$\begin{aligned}\Delta p &= -\gamma \bar{\nabla} \cdot \hat{n} \\ &= 2\gamma H \\ &= \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)\end{aligned}$$

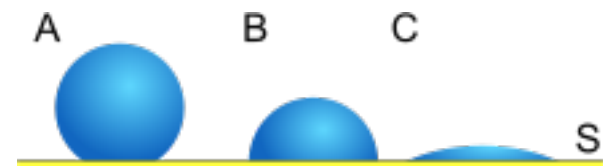
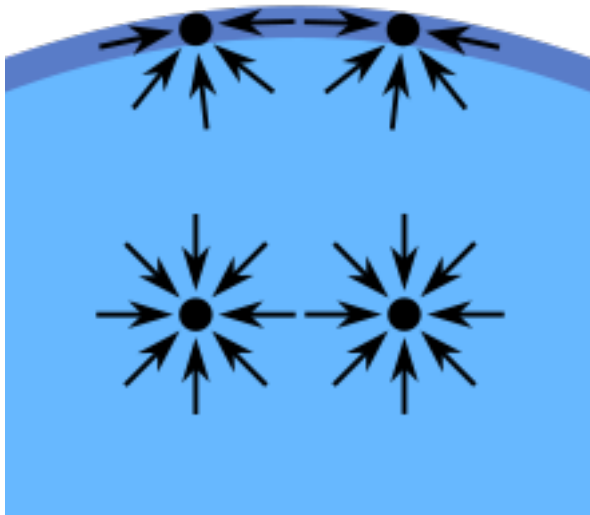
$$\gamma(1 + \cos \theta_C) = \Delta W_{SLV}$$

$$\Delta p = \frac{2\gamma \cos \theta}{a}$$



Joseph Antoine Ferdinand Plateau

1873 מראה נסיונית כי פני נוזל בשוי משקל יוצרים עקמומיות כדי למזער את שטח הפנים.

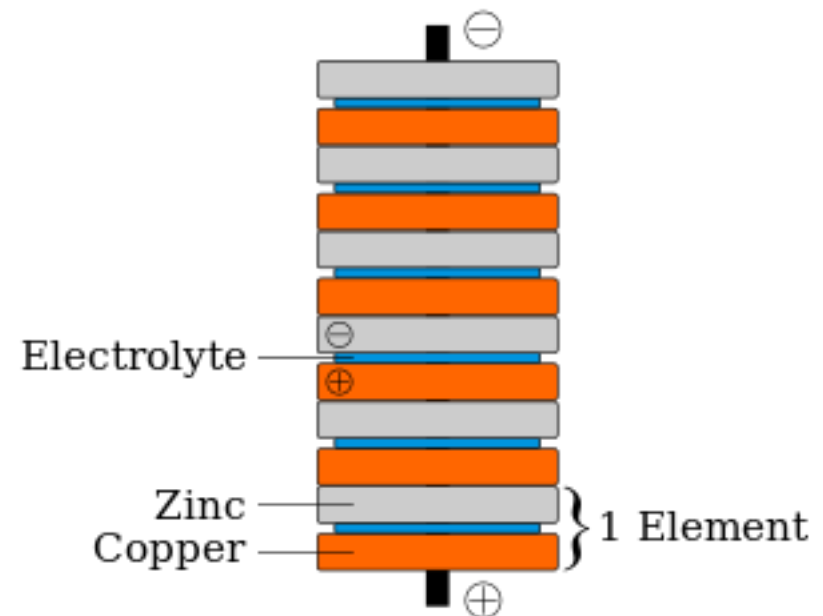


הבטריה

1800 גילה את המתח האלקטרוכימי ובנה בטריה מדיסקיות של אבץ ונחושת לסירוגין ובד טבול בתמיסת מלח.

על שמו יחידת המתח החשמלי – וולט

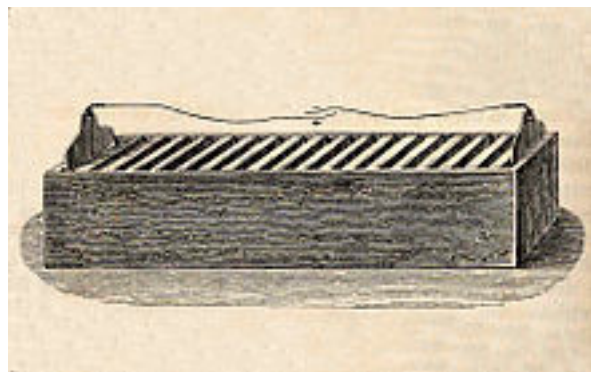
A portrait of a man with a serious expression, wearing a dark coat and a white cravat. He is holding a red book. In the foreground, there is a scientific instrument on a table, possibly a balance scale or a similar device.



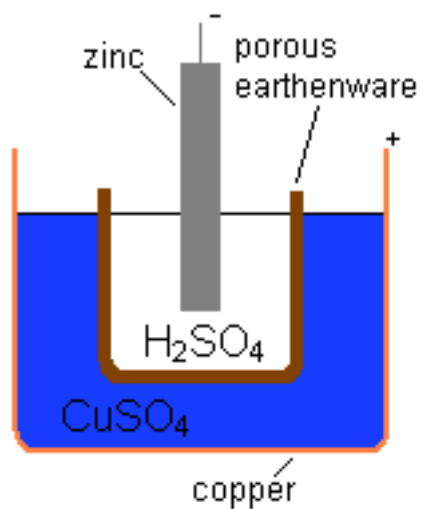
הסטוריה של הסוללה החשמלית (בטריה)

- 1748 בנימין פרנקלין טבע את השם "בטריה" סוללה של פלטות זכוכית טעונות
- 1780-86 לואיג'י גלואני הדגים את הבסיס החשמלי של אימפולס בעצבים
- 1800 אלסנדרו וולטה בונה צבר וולטאי - סוללה כימית רטובה, המקור הראשון הפרקטי לחשמל
- 1836 ג'והן דניאל בונה תא דניאל משתי אלקטרודות: CuSO_4 ZnSO_4 בטוח ולא מאכל כמו וולטה
- 1839 רוברט גרוב מפתח את תא הדלק הראשון מחמצן ומימן
- 1842 בונזן מפתח סוללות עם אלקטרודות נוזליות
- 1859 גסטון פלנט סוללת עופרת נטענת - עד היום שימוש במכוניות
- 1866 סוללות יבשות לקלאנש George Leclanché רושם פטנט לסוללת אלקטרוליט-אמוניום כלוריד, אבץ ותחמוצת מנגן האלקטרודות
- 1868 20,000 סוללות בשימוש בטלגרפים
- 1881 טיבו רושם פטנט לבטריה שהאלקטרודה השלילית והמיכל הנקבובי מחרס בתוך קופסת אבץ
- 1881 גסנר Carl Gassner ממציא את סוללת אבץ ומוט פחם - סוללה יבשה מסחרית
- 1899 יונגר Waldmar Jungner ממציא סוללה מיטענת ניקל-קדמיום
- 1899 תומס אלווה אדיסון ממציא סוללת אלקאלית
- 1949 יורי Lew Urry ממציא סוללה אלקאלית קטנה הנשמרת פי 8-5 מסוללת אבץ-פחם
- 1954 פירסון, פולר וצ'פין - Gerald Pearson, Calvin Fuller and Daryl Chapin ממציאים את התא הסולארי

תא עם נוזל אלקטרוליטי



תא דניאל



כדי ליידן-זכוכית



וולטה



סוללות בדיל למכוניות



סוללת ליתיום



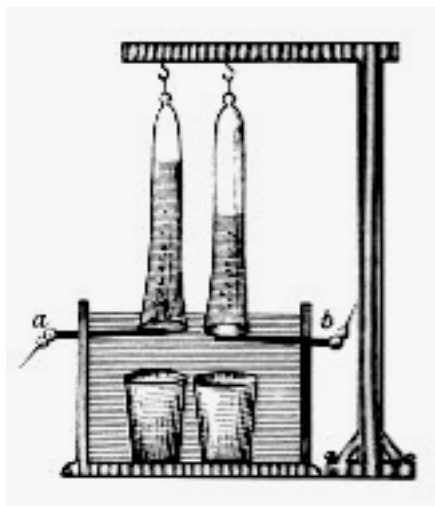
סוללות יבשות



סוללות ליתיום, (אנודה מליתיום מתכתי) יותר הספק למשקל קטן, אך יקרה. סוללות יוני ליתיום הן נטענות מחדש. הקטודה לרוב מתחמוצת המנגן.

חשיבות סוללות בחיים המודרניים: מכוניות להדלקה, מכוניות חשמליות, מטוסים, מחשבים ניידים, טלפונים סלולאריים, שעונים, מצלמות, לווניים (סוללות נטענות בתאי שמש)....
סוללות זולות יכלו להיטען בחשמל מתאי שמש ביום, ולספק חשמל בלילה. אך זו לא אופציה מסחרית.

בעיות ומגבלות: יוקר, זמן חיים קצר, קיבולת קטנה ליחידת משקל, זמן הטענה ארוך (חברה ישראלית טוענת לטעינה ב-2 דקות), צורך במתכות נדירות (מכרות הדרום אמריקה מתכלים), זיהום סביבה בסוף החיים.



אלקטרוליזה ובידוד יסודות

Joseph-Louis Proust

1799 מוצא שבתגובה כימית האטומים מתחברים ביחסים קבועים.
מכאן שאב דלתון בסיס לתורה האטומית Proust's Law.

Johann Wilhelm Ritter (1776-1809) Germany

1800 הראה שבאלקטרוליזה של מים נוצרים שני נפחי מימן לנפח חמצן
ביצע ציפוי אלקטרוליטי למתכות

William Nicholson and Anthony Carlisle

1800 הראו באופן בלתי תלוי בריטר הפרדת מים למימן וחמצן באלקטרוליזה בעזרת תא וולטה

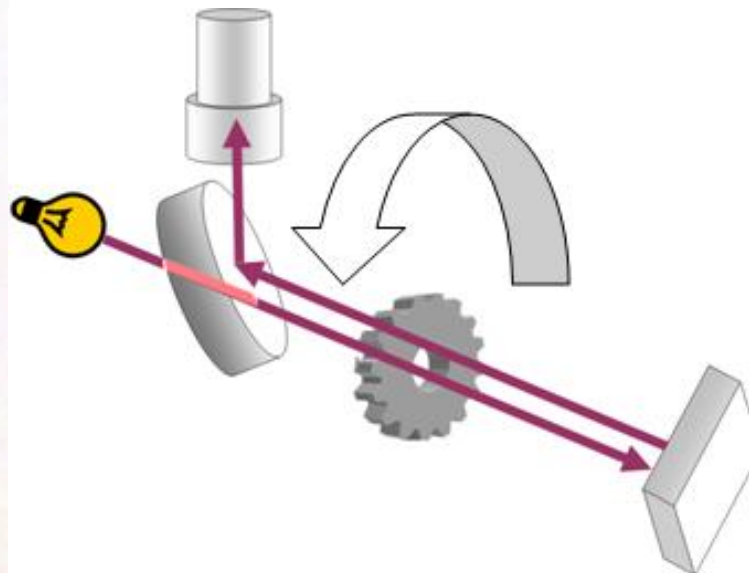
Humphrey Davy

1807 הבסיס לסוללה של וולטה הוא כימי: מים לא יוצרים מתח. האלקאליים הם תחמוצות מתכתיות. המימן נמצא בחומצות. יחסי משיכה כימיים הם חשמליים.
מבודד באלקטרוליזה אשלגן, נתרן, קלציום, סטרונציום, בריום, ומוכיח כי כלור ויוד הם יסודות. התגלית הראשונה של אלומניום.

אור וחשמל

Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819 -1896) French physicist

השתתף עם דופלר בניסוח אפקט דופלר לגלי קול, וניבא את ההזזה לאדום של אור כוכבים. שיפר פלטות צילום. עבד עם פוקו על התאבכות אור. אחרי מדידות מהירות האור האסטרונומיות של רומר היה הראשון למדוד על הארץ. פיזו השתמש בגלגל שיניים שהעביר ועצר את האור לסירוגין ומראה במרחק 8 ק"מ. 1851 מדד את מהירות האור בנוזל זורם, כדי לראות את אפקט "תנועת האתר" על המהירות. אם מהירות האור תלויה במהירות זרימת המים מצפים שתמונת ההתאבכות תזוז כשמתחילה זרימת מים.





Thomas Young 1773 –1829

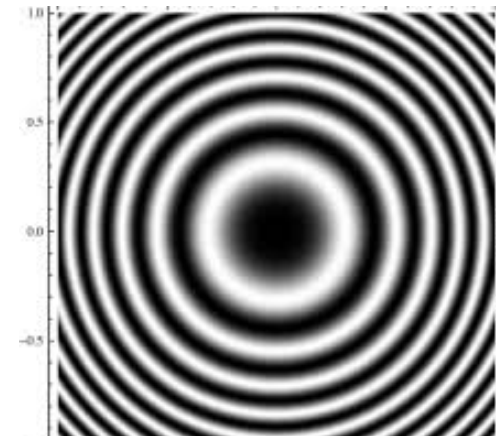
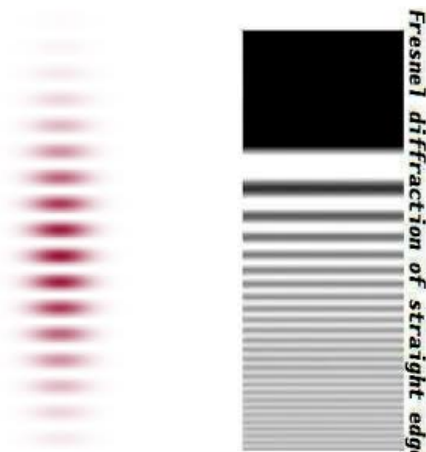
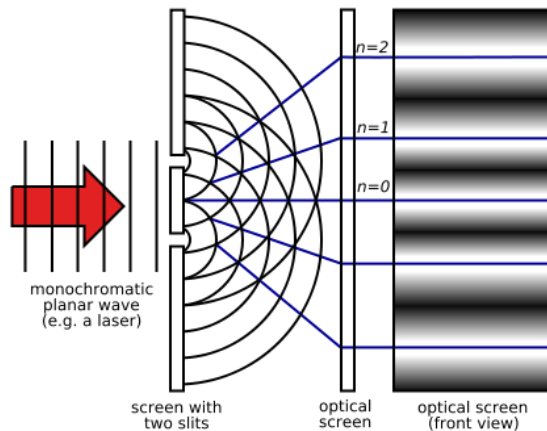
1801 האופי הגלי של האור – תמונת התאבכות: האזורים הכהים מסיכום פאזות הפוכות. השתמש בזכוכיות עם מנות שבירה שונות לתיקון אברציות crown flint sassafras.

1803 תמונת התאבכות ליד צל של גוף חד. מחזק תורה גלית של האור, אך מאחר ונחשב גל אורכי אין הסבר לשבירה כפולה במעבר אור בגבישים מסויימים.

1805 התאבכות בין שני סדקים. בזמן זה דגלו בתורת ניוטון לאור כחלקיקים.

1807 טובע את המושג "אנרגיה" בהרצאה על חום שגורם לתנועת חלקיקים בתורה הקינטית של דניאל ברנולי.

1809 גל האור הוא גל רחבי, (ולא יכול לעבור באתר – בנוזל אין גל רחבי מתקדם) האמין שתדירות האור הנופלת על הרטינה מעוררת עצבים שונים לשלשה צבעים עיקריים: Young-Helmholz theory הסביר אסטיגמטיזם בראיה.

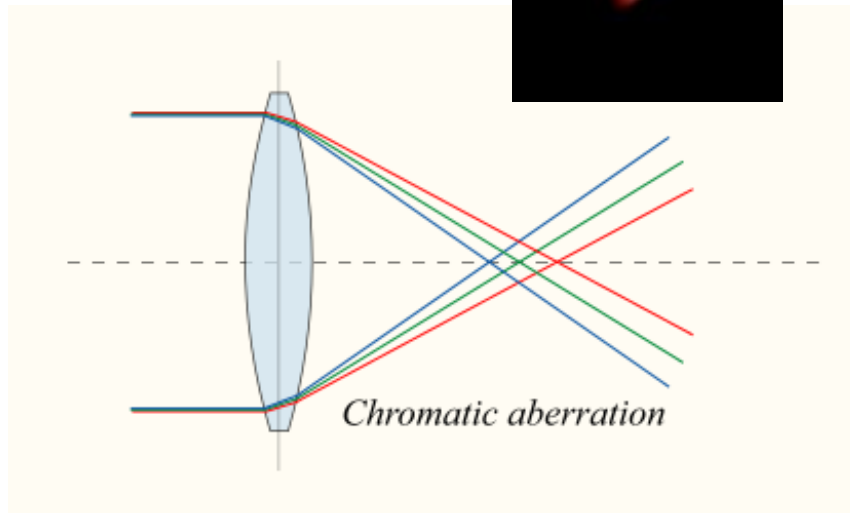
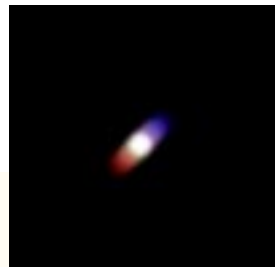


עוותי תמונה (אברציות) בעדשות

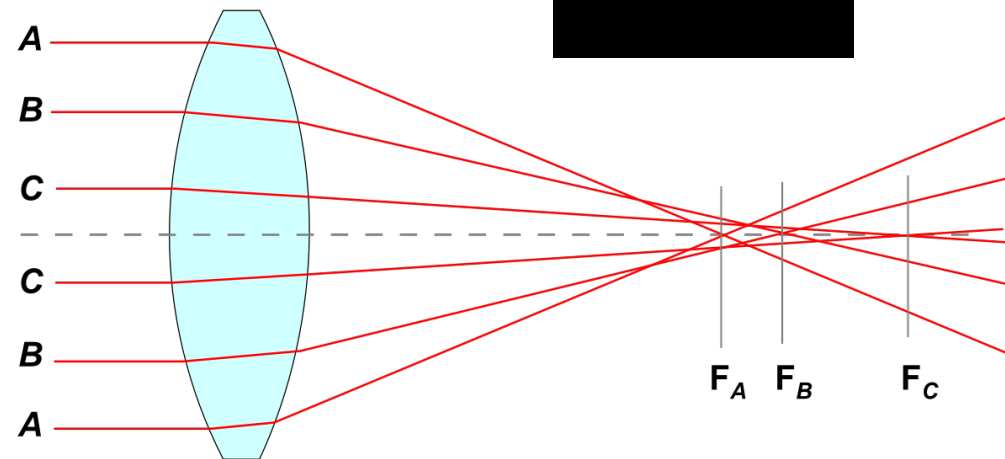
בקירוב לקרניים בזוויות קטנות $\sin a = a$ ובעדשות דקות ובגלל חוקי משולשים דומים כל הקרניים היוצאות בנקודה נשברות בעדשה ומגיעות לנקודה

לעומת זאת בעדשות אמיתיות הקרניים היוצאות מנקודת אור אינן נפגשות בנקודה – אברציות. לצורך סדר מסווגים את האברציות לציריות ואברציות שדה. הציריות נובעות מקרניים בזוויות גדולות (אברציות ספריות) ומקרנים בצבעים שונים מאחר ומנת השבירה של הזכוכית תלויה בצבע:

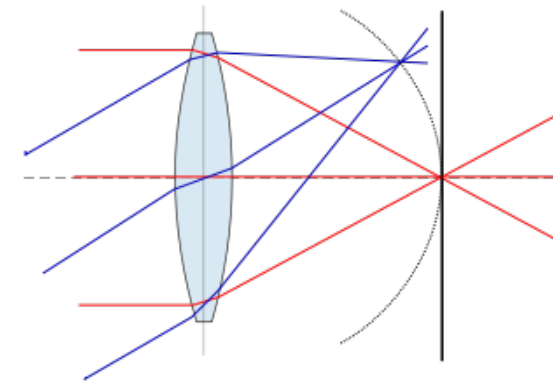
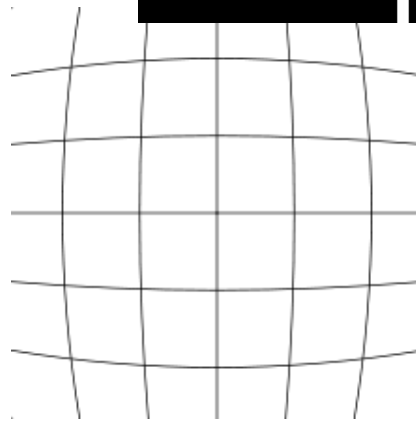
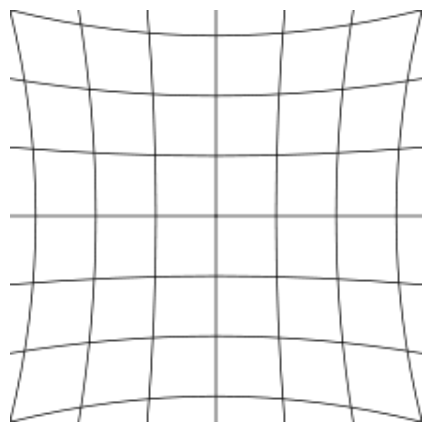
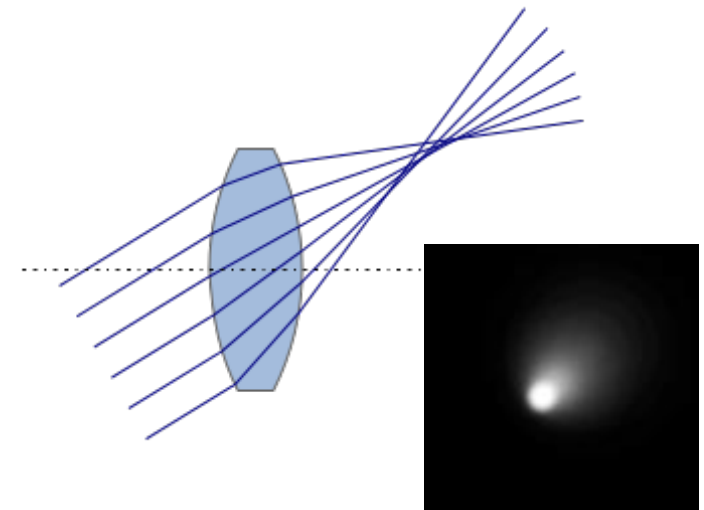
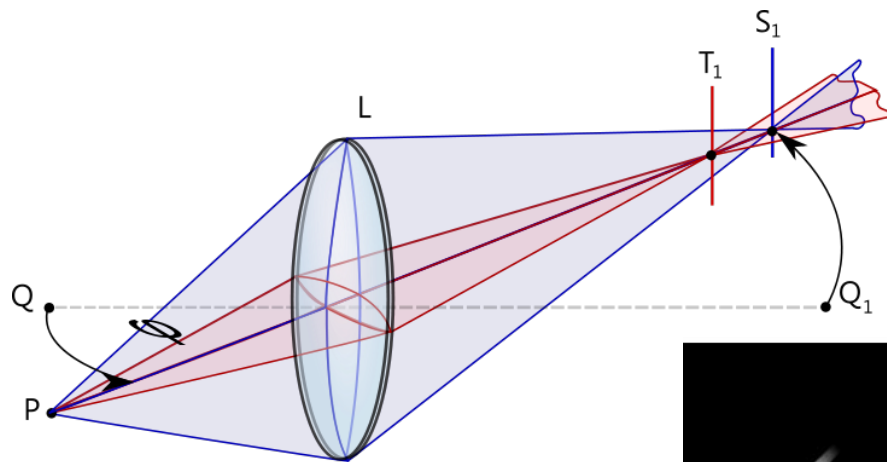
אברציות כרומאטיות



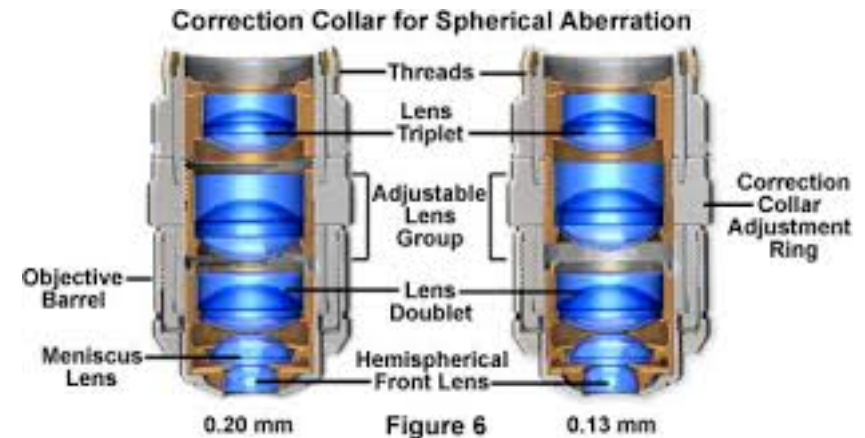
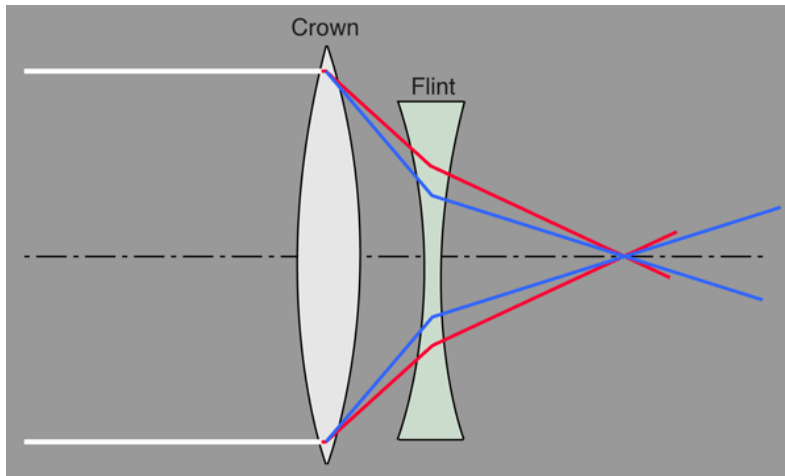
אברציות ספריות



אברציות שדה קיימות לקרניים היוצאות ממקור אור שאינו על הציר האופטי.
 קרניים כאלה לעיתים אינן נפגשות בנקודה גם אם קרניים ציריות כן נפגשות בנקודה.
 סוגי האברציות במקרה זה: אסטיגמטיות, פוקוס שונה לקרניים במישור אנכי ואופקי,
 מופיע הרבה בראיה ומתוקן ע"י מקפים עם עדשות צילינדריות, קומה, עוותי שדה
 תמונה שאינו מישור, ועוותי חבית וכר-סיכות, הגדלה התלויה במרחק מהציר
 (האופטי)



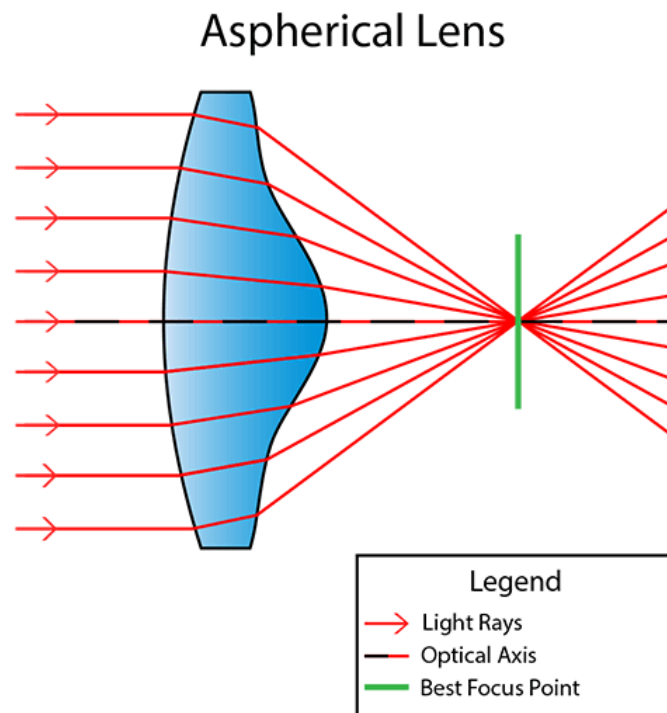
במשך 400 שנים נאבקו באברציות במיקרוסקופים ובטלסקופים ע"י שילוב מספר הולך וגדל של עדשות. למשל: הדובלט המורכב משתי עדשות קמורה וקעורה עם מנות שבירה שונות הקטין את האברציות הכרומאטיות.



במיקרוסקופים יש עד 13 עדשות באובייקטיב. לצורך התכנון הקים אבה בחברת צייס אולם של מפעילי (לרוב מפעילות...) מכונות חישוב FACIT שחישבו מסלולי קרניים במערכות אופטיות בעזרת חוק סנל, וביצעו אופטימיזציה ידנית של האברציות השונות.

גם עדשות מצלימות, בעיקר zoom-lens או wide-angle ניבנו ממספר רב של עדשות, והיו כבדות ומגושמות.

בעשור ים האחרונים יש פריצת דרך בתכנון עדשות ללא אברציות: חמרים פלסטיים עם מנות שבירה גבוהות (עד $n=1.8$) שאנו רואים הרבה במשקפיים לקצרי או רחוקי ראייה קיצוניים, שהיו כבדים ועבים ועתה הם קלים ודקים. בנוסף המגבלה של ליטוש עדשות כדוריות הוסרה ע"י עיבוד חמרים ממוחשב, המאפשר יציקת עדשות לא כדוריות בכל פרופיל רצוי, למשל עדשות מולטיפוקאליות. עדשות כאלה זולות ומדויקות, והשימוש הידוע ביותר שלהם במצלמות טלפונים סלולארים התאפשר גם בזכות פיתוח מצלמות ה-CCD)



Sir John Leslie 1766-1832

1804 מגלה כי קרינות חום ואור דומות, ומשטח שחור מט (לא מבריק) פולט חום טוב יותר ממשטח מבריק: קרינת גוף שחור.

Etienne Louis Malus

1 מודד קיטוב בהחזרת אור. קיטוב תלוי בזווית ההחזרה (ראה נוסחות פרנל). חוק מאלוס – עצמת האור העובר דרך שני מקטבים, מכריז על תחרות להסבר השבירה הכפולה, וזוכה בפרס ב-1810. שולל אפשרות שלאור כגל יהיו שני קיטובים.

François Jean Dominique Arago

1811 גבישי קווארץ מסויימים (חיתוך בכוון מסויים) משנים את קיטוב האור.

Biot

1811 מראה שגבישי קווארץ של Arago מסובבים את מישור הקיטוב.

Laplace

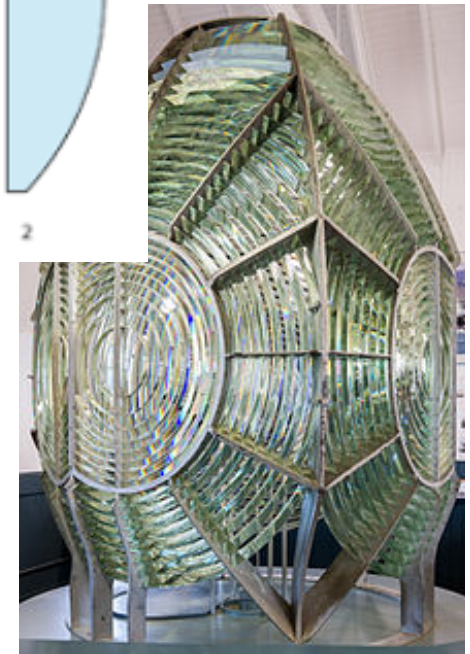
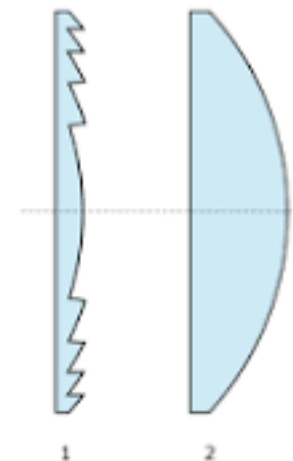
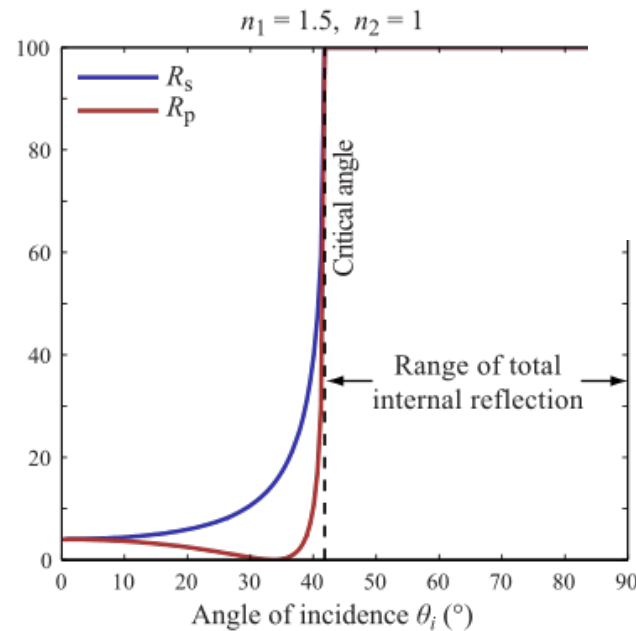
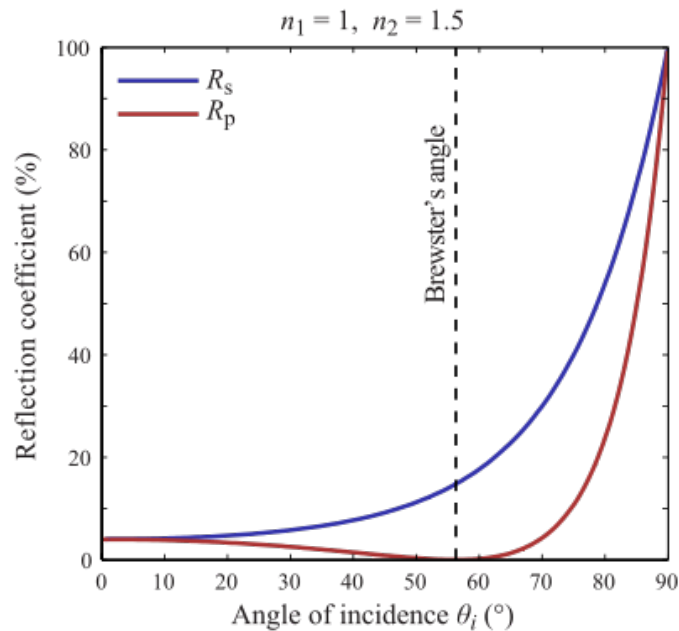
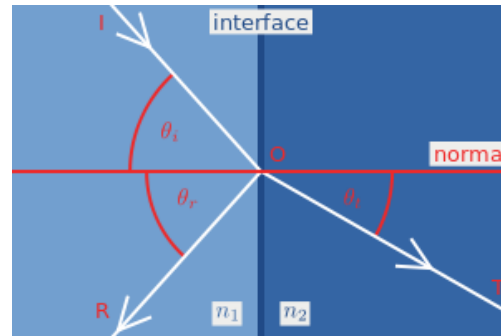
1808 מסביר שבירה כפולה של אור מתורת האור החלקיקית – למרות שיאנג שלל הסבר כזה.



Augustin-Jean Fresnel 1788 -1827

הראה שבשבירת והחזרה עצמת האור בשני הקיטובים –
אנכי ומקביל למישור ההחזרה, משתנה בזווית: נוסחאות פרנל.
הנוסחאות נובעות מרציפות השדה החשמלי והמגנטי בגבול.

המיוחד: זווית ברוסטר (להלן)
פרנל גם המציא את העדשה
הממקדת אור במגדלורים –
עדשת פרנל



Siméon Denis Poisson (1781-1840) France

probability, Poisson random variable, Poisson approximation, Poisson process

$$\nabla^2 \phi = -4\pi\rho$$
$$\nabla^2 \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\epsilon\epsilon_0}.$$

1811 משוואת פואסון: בסימון וקטורי:

ובקואורדינטות קרטזיות:

נותן את פתרון הפוטנציאל החשמלי סביב מטענים ρ

לזכרון: הפוטנציאל החשמלי סביב מטען בודד q הוא:

$$\psi = 1/4\pi\epsilon_0 \ q/r$$

רואים שבראשית $r=0$ לא ניתן לחשב את משוואת פואסון, אך ניתן לעשות זאת סביב

הראשית בכל עיגול קטן כרצוננו ולהשתמש

במשפט סטוקס (להלן).

פואסון דמיין שדה כנוזל.



John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh (1842-1919) England Nobel 1904

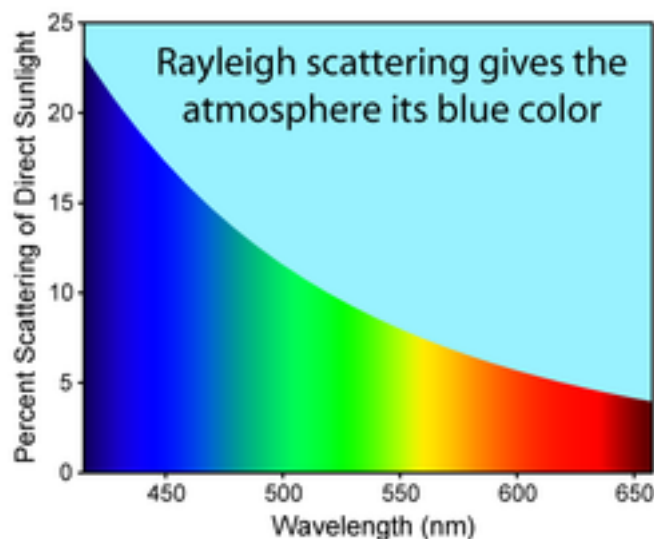
probability, Raleigh 's density function

1894 יחד עם **William Ramsay** גילו את הגאז האציל ארגון בספקטרוסקופיה אחרי שניקו אויר מחמצן וחנקן (חקרו את ההבדל במשקל חנקן מאויר ומאמוניה) נובל-1904.

1871 חישב את פיזור האור מחלקיקים קטנים מאורך הגל **Rayleigh scattering** $d \ll \lambda$

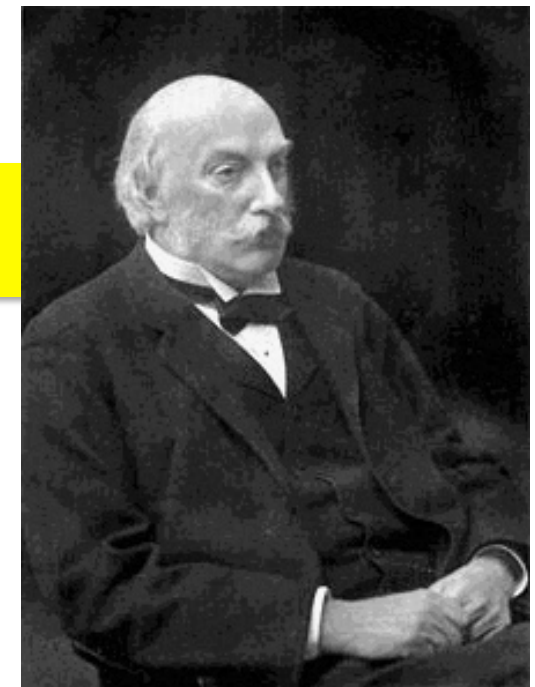
מנת שבירה, n , של החומר מהם הם עשויים
:
הפיזור הכללי (לכל הכוונים)
מתקבל באינטגרציה על כל הזוויות ויחסי ל- λ^{-4}

$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$
$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2$$



מדוע השמיים כחולים?
מדוע השקיעות אדומות?

1874 מתנגד לבולצמן בגלל אי-הפכיות של מערכות רבות חלקיקים למרות שתנועת כל חלקיק הפכית:
'reversibility paradox'



Gian Domenico Romagnosi

1802 מגלה כי מחט מגנטית מוסטת ליד בטריה. הממצא לא עורר הדים.

Hans Christian Ørsted (1777-1851) Denmark

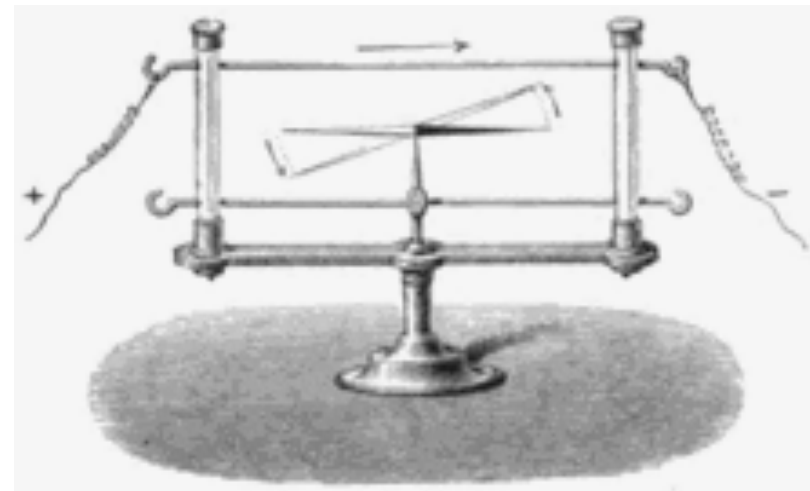
היה חבר קרוב להנס קריסטיאן אנדרסן

1820 גילה שזרם חשמלי גורם להסטת מחט מגנט, ושלשדה סביב תיל מוליך סימטריה גלילית. מסביר מגנט כלולאות זרם אנכיות לצירו. יחידת השראה מגנטית נקראת על שמו. הציע טלגרף.

1825 ארסטד בודד אלומיניום באלקטרוליזה.

Gauss

1833 מציע את הטלגרף החשמלי



Georg Simon Ohm 1789–1854 Germany Electricity

1827 חוק אוהם $V = IR$

הפרש המתחים על מוליך והזרם הזורם בו יחסיים זה לזה, ומקדם היחס היא ההתנגדות.





Joseph von Fraunhofer 1787–1826

1814 פראונהופר בנה ספקטרוסקופ מסדק ומנסרה (פריזמה) וקיבל מאור השמש קשת צבעים רצופה, וקוים שחורים בדידים במקומות קבועים

Augustin Jean Fresnel

1816 פרנל מסביר התאבכות ועקיפה בעזרת התורה הגלית של האור.

Fresnel and Dominique François Arago

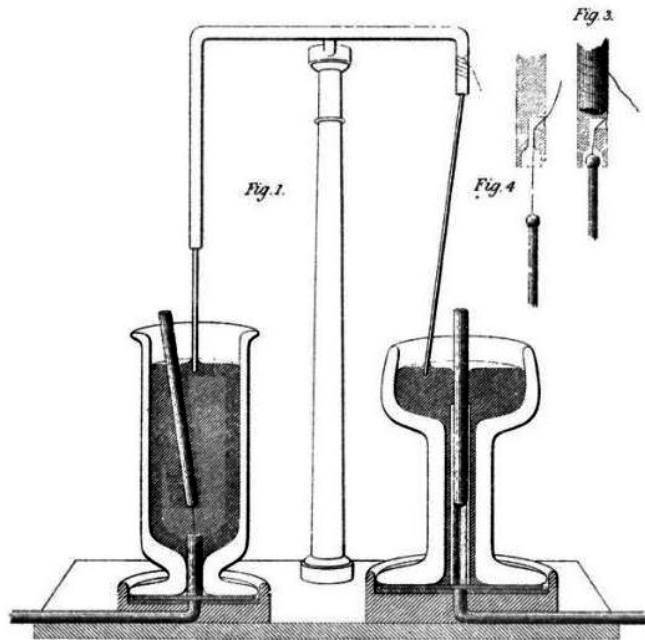
1816 פרנל ואראגו מראים שאלומות אור בקיטוב אנכי אינן מתאבכות – מביא לשלילת האור כגל אתר אורכי ותמיכה באור כגל רחבי. עוד מסמר בארון הקבורה של תיאורית האתר.

Fresnel

1821 פרנל מפרסם חוקי החזרה לאור במעבר מאויר למדיום: במעבר חד האור מקוטב קוי. במעבר הדרגתי האור מקוטב אליפטי. הוא גם מייצר קיטוב מעגלי.

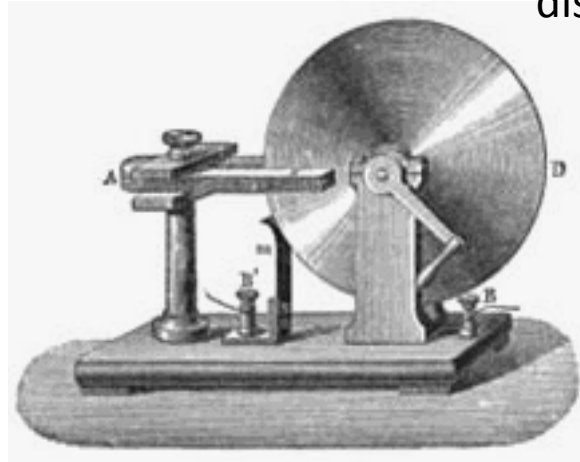
Wollaston

1821 וולסטון מסביר את המשיכה בין שני תילים מובילי זרם חשמל שגילה אמפר ע"י הנחת שדה צילינדרי סביב כל אחד מהם.



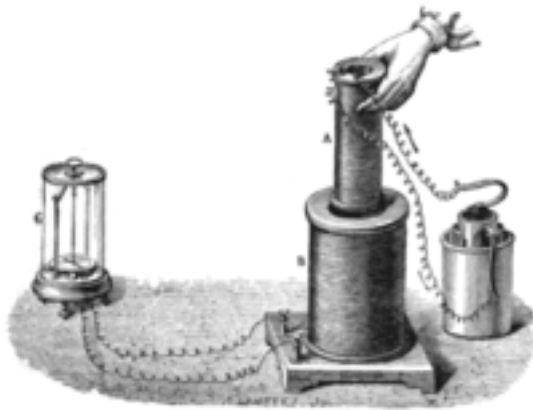
1831 – **Michael Faraday** 1791–1867 England

discovers electromagnetic induction



המנוע החד-פולארי הראשון.
הכוסות מלאות כספית
וכשמעבירים זרם המוט הטבול
בכספית מסתובב סביב
המגנט (הקבוע)

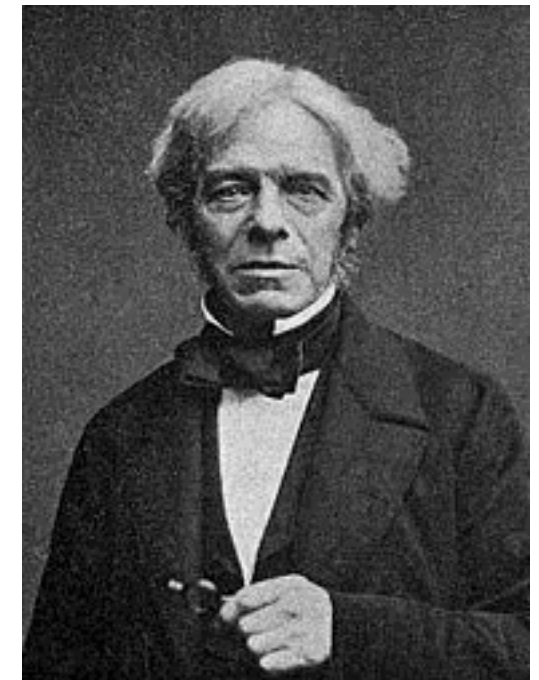
גנרטור דיסק הנע בין מגנטים
שיצר מתח בין מרכזו להקף, מתח שעלה בסיבוב מהיר יותר.



1831 הדגמת השראה חשמלית:
כשמוציאים או מכניסים
את המגנט מהסליל
זורם בו זרם

כשמתחילים להזרים זרם בסליל אחד יש זרם בסליל המושרה

כלוב פרדיי – רשת סביב נפח מבודדת את תוכו מהשראה



1818 פרדיי החל בנסיונות על מסגים של פלדה

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

מתח מושרה נובע משינוי בשטף השדה המכנטי

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

בסליל המתח המושרה מוכפל כמספר הליפופים

במנוע שינוי השטף יוצר כוח המסובב את הרוטור

1834 פרדיי מפרסם את חוקי האלקטרוליזה: יונים מתמיסה מוסרים או מקבלים מטען מהאלקטרודות והופכים לאטומים חופשיים.

החוק הראשון: במעבר זרם דרך תמיסות יוניות מספר המולים של חומר הנוצר באלקטרודה יחסי למספר האלקטרונים שזרמו במעגל ונמסרו לאלקטרודה.
החוק השני: כמות החומר שנוצר באלקטרוליזה יחסי למשקל הכימי האקויוולנטי.

טבע את המונחים "אלקטרודה" "קטודה" שלילית
אליה זורמים "קטיונים" "אנודה" חיובית אליה
זורמים "אניונים".

1823 יצר כלור נוזלי מאלקטרוליזה של חומצת נמלח HCl
וכן CO_2 NH_3 SO_2 שצבר במבחנות שלעיתים התפוצצו...

פרדיי בא ממשפחת חרשי מתכת שעברו ללונדון בתקווה למצוא פרנסה בפירזול פרסות סוסים. פרדיי עצמו עבד בכריכת ספרים, מהם למד את רוב הידע שלו. הוא שמע הרצאות של האמפרי דייוי אותן סיכם וניסה לפרסם, ופנה לעבודה לז'וזף בנקס נשיא החברה המלכותית למדע, אך לשוא. מזלו התמזל כשעוזר מעבדה של דייוי פוטר ודייוי שכר את פרדיי במקומו, תמורת גיני אחד לשבוע, חדר, דלק להסקה ונירות... דייוי, שראיתו נפגעה מהתפוצצות במעבדה, צרף את פרדיי למסע אירופאי בו פגש את גדולי המדענים הצרפתים והאיטלקים, מסע שנקטע עם יציאתו של נפוליון (שהיה תומך המדע, אפילו של אויביו האנגלים) לגלות.

פירסום המנוע החשמלי החד פולארי שלו פירסם את שמו אך גרם לביקורת של דייוי. אולי קינאה על פירסומו הבי"ל...

באנגליה הפך להיות המדען הניסיוני החשוב ביותר של זמנו, ולבסוף דייוי עצמו הציע אותו כראש המעבדה של המכון המלכותי, שם התרכז בחשמל. הוא הבין שאם חשמל יוצר מגנטיות, גם מגנטיות תיצור חשמל, והנסיונות לימדו אותו שהמגנטיות עצמה לא משרה שדה חשמלי, אלא רק תנועת מגנט: כך הגיע לתכנון גנרטור הדיסק.

בעקבות פירסומו ארסטד – וולסטון ודייוי הציעו לסובב לולאת תיל נחושת סביב מגנט, אך שיתפו את פרדיי כדי לעזור בפתרון הטכני איך לבצע זאת. פרדי מצא פתרון, כנראה ביקר את וולסטון כשלא היה בביתו, ופירסם אותו מבלי שציטט את וולסטון. זה גרם לתגובה חריפה, בעיקר מדייוי. פרדיי התנצל בפומבי, ועבר מחשמל לחקר פלדות אל חלד. למעשה פרדיי לא התעניין ביישום לאחר שפתר את הבעיה העקרונית, והיישום פותח באמריקה ע"י הנרי.

עם פירסום פליטת מימן וחמצן מאלקטרוליזה של מים, חזר פרדיי לנושא ופירסם את חוקי פרדיי.



Joseph Henry 1797-1878

1828-9 יוצר אלקטרומגנט חזק ע"י מספר גדול של ליפופי חוט נחושת סביב ברזל, ומשפר ביצועי **מנועים חשמליים**.

1831 שימוש אלקטרומגנט בטלגרף לרישום.

1846 נבחר כראש המכון הסמיטסוני בושינגטון Smithsonian Institute מחקר מתכות, והקמת המכון הלאומי למזג אויר תוך שימוש בטלגרף לדווח.





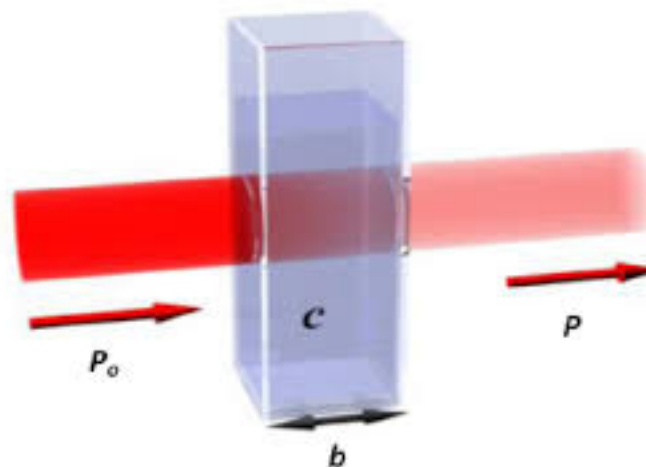
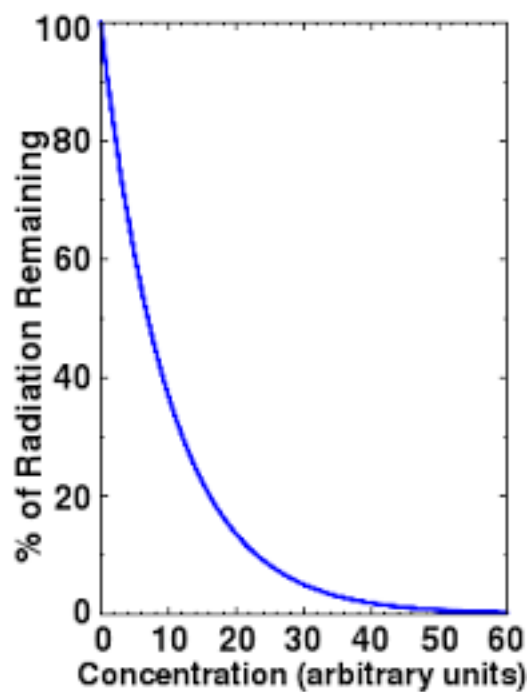
August Beer 1825-1863

1852 חוק ביר-למברט Beer-Lambert law מקשר בין בליעת האור לחומר שהוא עובר דרכו. מבוסס חלקית על עבודות

Pierre Bouguer and Johann Heinrich Lambert

ספקטרופוטומטריה מבוססת על חוק ביר:

$$-\log_{10}(P/P_0) = \epsilon C b$$



Christian Doppler 1803 –1853 Austria

1842 אפקט דופלר – הסחת תדירות האור לאדום בהתרחקות מקור אור כגון כוכב
(לא היו עוד רכבות לבדוק אפקט דופלר לקול...)

$$f = \left(\frac{c + v_r}{c + v_s} \right) f_0$$

ההסחה בהתרחקות השולח (מהירות v_s) או המקבל (מהירות v_r)
והיא יחסית למהירות האור c

היה מורה של גרגור מנדל – אבי הגנטיקה



James Clerk Maxwell 1831 –1879 Scotland

Theory of electromagnetism 1873



טבעות השבתאי (סטורן) אינן אבעות מוצקות או נוזליות
כי אלה לא ישארו יציבות, אלא אוסף חלקיקים קטנים
כל אחד מסתובב במסלולו היציב. האישור במסע

הוויז'ר Voyager ב-1980

1865 משוואות מכסוול: תיאור גלים אלקטרומגנטיים ללא אתר

חוק גאוס - מטען ρ יוצר סביבו פוטנציאל חשמלי E

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

חוק גאוס למגנטיות B - אין מקור (או קוטב נפרד)

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

חוק אינדוקציה של פרדיי
שינוי שדה מגנטי יוצר שדה חשמלי

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

חוק אמפר
זרם חשמלי (שינוי בשדה חשמלי)
יוצר שדה מגנטי

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

1873 נסוח המשוואות באמצעות שדות סקלארי ((חשמלי)
ווקטורי (מגנטי) ניתק את האלקטרומגנטיות מהאתר!!! למשוואות
פתרון גלי המתקדם במהירות קבועה (לא תלוית אורך גל) וניבא
לחץ קרינה.

1868 מפרסם "On Governors" החיבור המשמעותי הראשון על היזון-חוזר feedback.



מקסוול - המשך

משוואות מקסוול מתארות את כל הגלים האלקטרומגנטיים (הידועים היו רק אור, קרני-x הקצרים מהאור וקרני רדיו הארוכים ממנו התגלו יותר מאוחר).

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \qquad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0) \qquad \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi_0)$$

$$k = |\mathbf{k}| = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

או בסימטריה ספירית, לגל כדורי:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{r} \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - k \cdot r + \phi_0), \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{r} \mathbf{B}_0 \cos(\omega t - k \cdot r + \phi_0),$$

מכסוול טען שאם מטען יתנדנד מהר מספיק, הוא יקרין גל אור. לא עברו שנים רבות עד שאכן הובהר שהאלקטרונים סביב הגרעין אכן פולטים קרינה אלקטרומגנטית, ושאנטינות מקרינות קרני רדיו עקב תנודות מטען הקובעות את תדירותן עקב תהודה, ולכן תדירות הרדיו תלויה באורך האנטינה)

מקסוול – המשך

1855 רושם תזכיר המשלב קוי שדה של פרדיי עם מתמטיקה של טומסון המשתמשת באופרטורים של דיברגנט ו-curl

1861 מקסוול מפרסם מודל מכאני לאלקטרומגנטיות. מגנטים הם מערבולות ומטענים הם עוותים מכאניים. מהמשוואות מקסוול מקבל גלים הנעים במהירות קרובה לאור.

1864 תיאוריה דינאמית לשדה האלקטרומגנטי – המודל המכאני נזנח ונשארו המשוואות. שדה פוטנציאל וקטורי וסקלארי.

המודל המכאני אינו מסביר החזרה ושבירה בגלל תנאי שפה

1867-1868 מקבל שדות סקלארי ווקטורי

1869 חישוב שדה אלקטרומגנטי במדיום עם תדירויות טבעיות שגורמות למנת השבירה להיות עם מכנה רזוננטי.

1873 אור הוא תופעה אלקטרומגנטית

1873 מקסוול מסכם אלקטרומגנטיות כמקובל לשנה זו, ודן בטנזור מאמצים ומומנטום אלקטרומגנטי.

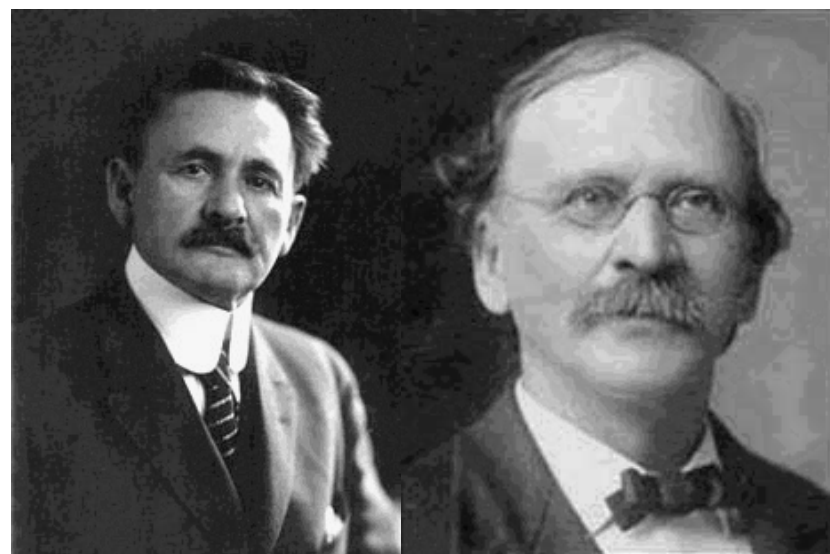
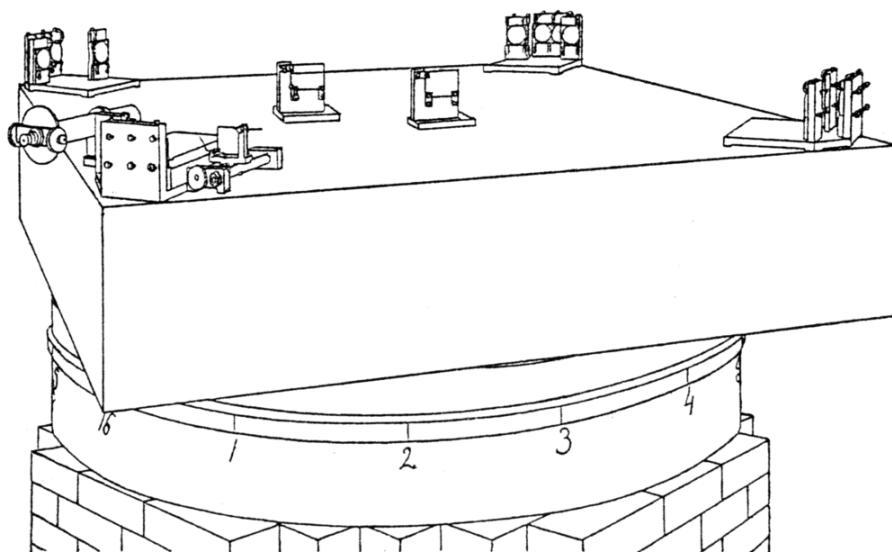
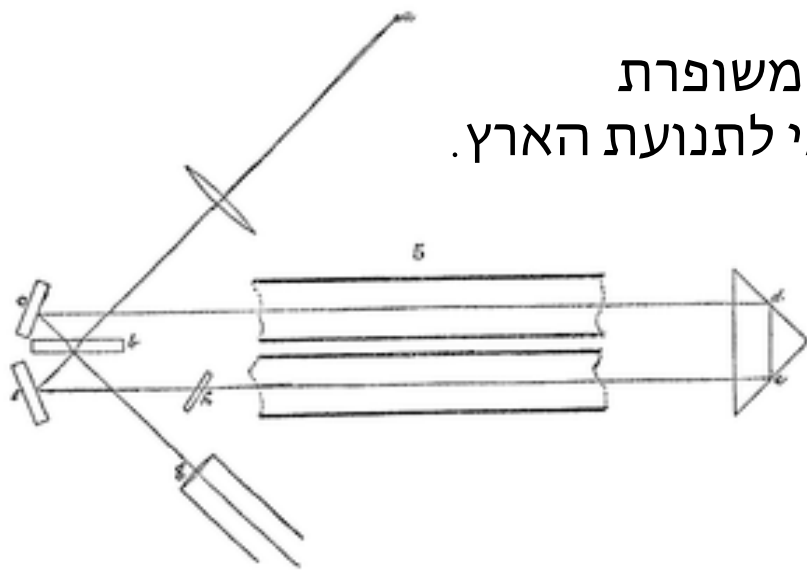
ראה גם מקסוול בטרמודינאמיקה

Albert A. Michelson 1852 –1931 and Edward W. Morley 1838 –1923

1882 מייקלסון מתאר אינטרפרומטר: מראה חצי מחזירה מפצלת ומאחדת שתי קרניים

1886 מדדו את מהירות האור בנוזל זורם בשיטה משופרת והשתמשו בה למדוד מהירות האור במקביל ואנכי לתנועת הארץ. הנסיון נעשה על שולחן שיש הצף על כספית לקבלת יציבות מכסימאלית.

הנסיון המפורסם ביותר עם תוצאה שלילית: היה הבסיס ליחסיות הפרטית של איינשטיין.



חשמל

William Hyde Wollaston

1801 מבסס שוויון חשמל גליוני והתנגדותי .equivalence of galvanic and frictional electricit

John Robison

1801 פירסום באנציקלופדיה בריטניקה של סיכום התורה האלקטרוסטטית לפי אפניוס

וקולון Aepinus and Coulomb

1822 מפרסם מתקן למדידת כוח חשמלי אותו פיתח ב-1770

חשמל

Simeon Denis Poisson

1812 פואסון מפתח מודל (לא נכון) לחשמל, המסביר שמטען בקבל מתפזר על שיטחו כך שהכוח בתוך הקבל מתאפס.

Michael Faraday

1812 פרדיי, כורך ספרים במיקצועו, מבקש מהמפרי דייוי להתקבל כעוזר מדעי. בראיון מגלה דייוי שפרדיי השכיל מקריאת הספרים שכרך, וקיבלו לעבודה.

Laplace

1813 מראה שהכוח החשמלי ליד מוליך אנכי למשטח

Karl Friedrich Gauss

1813 מגלה מחדש את חוק הדיברגנט של לגראנז' שנקרא "חוק גאוס"

ספקטרוסקופיה וגילוי יסודות כימיים

William Herschel (1738-1822) and Caroline Herschel (1750-1848)

1800 ויליאם הרשל מפצל קרינת השמש בפריזמה ומגלה קרינה אינפרה-אדומה ע"י חימום טרמומטר. החימום בתחום מעבר לאדום היה החזק ביותר.

Johann Wilhelm Ritter (1776-1809) Germany

אחרי שהרשל גילה קרינה מחממת (אינפרה אדום) חיפש קרינה מקררת בצד בסגול של הספקטרום

1801 מגלה קרינה אולטרה-סגולה בספקטרום השמש שלא קיררה, אבל פירקה כלוריד הכסף AgCl. הוא פיתח את חמר הצילום.

William Hyde Wollaston

1802 וולסטון מגלה קוים אפלים בספקטרום השמש. תגלית חשובה לא רק לתכולת הגאזים בשמש אלא למבנה האטום.

William Huggins

1863 אוסף ספקטרה מכוכבים ומראה שמכילים גאזים כמו השמש

Osmond Fisher

1895 מבודד הליום He שספקטרום הבליעה שלו נמצא בקרינת השמש ונקרא על שם אל השמש היווני – Helios

Thomas Young

1801 מציע שאור הפוגע ברטינה יוצר תנודות שלפי תדירותן מגיבים עצבי צבע – אחד לכל צבע ראשי.

גם מצא שהפרדת אור וחיבורו יותר קוי התאבכות שהסביר באמצעות האופי הגלי של האור המנדנד את האתר האלסטי – מה שהתנגד לאופי החלקיקי של תורת ניוטון.

אור

Fresnel

1814 תורה גלית של האור – התאבכות

David Brewster 1781-1868

1815 מוצא את הזוית בה החזרת אור מקוטבת לחלוטין –
זוית ברוסטר. (ראה פרנל)

גם מגלה שיש לא רק גבישים יוני-אקסיאלים אלא גם ביאקסיאלים
Uniaxial & biaxial crystal

בעוד בראשונים ניתן להסביר התנהגות האור כגל אורכי, זה לא
ייתכן בשניים.

1816 מגלה שבירה כפולה birefringence עקב לחץ על גביש
ממציא את הקליידוסקופ.

Francois Arago

1816 אראגו, שותף מחקר של פרנל, מבקר את יאנג ומציג לו נסיונות שהוכיחו שאור
מקיטובים שונים אינו מתאבק. יאנג מציע שגל האור רחבי ולא אורכי. כשהעביר רעיון
זה לפרנל ב-1818 הוא הבין איך לפתור קשיים שעלו בתורת הגלים של האור. 6 שנים
אח"כ הוכרז מותה של התורה החלקיקית של האור (עד איינשטיין).



אור

Augustin Fresnel

1817 במאבק האקדמיה הצרפתית בעד המודל החלקיקי של האור הציעו פרס להסברת עקיפת אור diffraction. למורת רוחם זוכה הפרס היה פרנל, שהסביר את התופעה בעזרת התורה הגלית של האור ברוח הויגנס.

Simeon Poisson

1818 פואסון מציע תחזית שבמרכז טבעות התאבכות מצל של טבעת תהיה נקודה בהירה

"Poisson-Arago spot" אבל פרנל דוקא מצא נקודה כהה

François Jean Dominique Arago

1818 אראגו אכן מוצא נקודה בהירה במרכז טבעות העקיפה – הסיבה: תיקון סטיות העדשה – אברציות ע"י דובלט של שתי זכוכיות עם מנת שבירה שונה.

John Herschel

1820 הרשל מראה שגבשים המסובבים את קיטוב האור בכוונים הפוכים הם בעלי מבנה גבישי שונה שטיבעו סלילי helical

מגנטיות

Hans Christian Ørsted

1820 ארסטד מגלה שמצפן מוסט ליד חוט מעביר זרם לכוון אנכי לחוט.

Andre Marie Ampere

1820 שבוע לאחר ששמע את תגלית ארסטד הראה ששני חוטים מקבילים נושאי זרם בכוונים הפוכים נמשכים ובכוונים זהים נידחים זה מזה

Jean-Baptiste Biot and Felix Savart

1820 מראים שכוחות מגנטיים מחוט נושא זרם דועכים בתלות במרחק מהחוט יחסית להיפוך המרחק ומכוונים אנכית אליו. הוכחות ליחסי גומלין (אינטראקציות) אלקטרו-מגנטיות.
ויטאקר Whittaker ממשיך באנליזה זו

חשמל

Faraday

1821 פרדיי חוזר על נסיונות ארסטד
1821 מקבל תורה אלקטרומגנטית של וולסטון – סיבוב קוטב סביב תיל או תיל סביב קוטב
מגנטי. התורה פתחה פתח למנוע חשמלי.

Humphrey Davy

1821 מראה שזרם עובר דרך קבל,
גם מראה שהתנגדות עולה בעלית הטמפרטורה.

André Marie Ampère

1822 מפרסם השערה שכל המגנטיות מקורה בזרמי חשמל.
1825 פירסום כל נסיונותיו במגנטיות, בצירוףמשוואות שמקסוול תאר כאחד מההשגים
החשובים במדע. נוסחאות אמפר חישבו את התרומה למגנטיות מאלמנט זרם, ששונה מנוסחת
Biot-Savart באבר נוסף שהאינטגרל שלו על מעגל זרם מתאפס.
למרבה הצער הנוסחה הזו הועדפה (גם ביחסיות) על זו של אמפר, למרות שהיתה יותר
מתוחכמת.

Augustin Fresnel

1825 פרנל נותן הסבר פנומנולוגי לפעילות אופטית circular birefringence
מראה ששילוב אור הנע במהירויות שונות בקיטובים הפוכים מסביר סיבוב מישור הקיטוב

אור

Georg Simon Ohm

1826 חוק אוהם $V=IR$. המתח גורם לזרימת זרם, בדומה למעבר חום במפל
טמפרטורות. עברו עוד שנים עד שהמתח שמדד אוהם הובן כפוטנציאל של פואסון.
1827 התנגדות R

Augustin Fresnel

1827 מפרסם עשור של מחקרים באור, המסבירים נפיצה התאבכות וקיטוב, שבירה
כפולה, חוק הסינוס והטנגנט לשבירת אור Fresnel's sine and tangent laws במעבר בין
תווך שקוף אחד לשני.

Claude Louis Marie Henri Navier

1827 מפרסם את המשוואה לתנודות בתווך אלסטי – שייושמה לתנועת אור באתר.

Charles Wheatstone

1833 ויטסטון מבין את תחושת העומק בראיה וממציא את הסטיריאוסקופ –

חשמל ומגנטיות

Humphry Davy (United Kingdom) 1778–1829

1812 ממציא את מנורת הקשת: חוט פחם שלהט כשחובר לסוללה.

Michael Faraday 1791-1867

פיזיקאי וכימאי, ממציא את טבעת ההשראה שבה חשמל נוצר בשינוי שדה מגנטי. הבסיס לשנאי, מנוע חשמל, גנרטור ואף טלגרף וטלפון. אך פרדי לא עסק ביישומים אלה. טבע מונחים: אלקטרודה, אנודה וקטודה, ויונים.

Joseph Henry (America) 1797–1878

באופן בלתי תלוי בפרדיי, מצא את עקרון ההשראה האלקטרומגנטית, ותאר מנוע חשמלי. ממציא את הממסר החשמלי המאפשר משלוח חשמל למרחקים.

Hippolyte Pixii (France) 1808–1835

בונה הדינאמו הראשון – גנרטור חשמל במנוי ממגנט המסתובב סביב סליל מוליך המלופף על גרעין ברזל.

Thomas Davenport(U.S.) 1802–1851

1834 ממציא המנוע החשמלי בזרם ישר.

Sir William Robert Grove(Scotland) 1811 1896

מפתח את תא הדלק הראשון: שילוב מימן וחמצן יוצר חשמל.

James Prescott Joule(England) 1818 –1889

מראה שימור אנרגיה במעגל חשמלי, הכולל זרם, חימום, והתמרה כימית
(אלקטרוליזה). על שמו יחידת אנרגיה.

J.C. Maxwell (Scotland) 1831–1879

תיאוריה מתמטית של השדה האלקטרומגנטי: איחוד חשמל, מגנטיות ואור.
ארבעת משוואות מקסוול הבסיס לרדיו וטלויזיה.

Charles Brush(U.S.) 1849–1929

ממציא את הדינאמו עם הסליל הפתוח, המייצר זרם חשמלי קבוע.
מפתח מנורת קשת המופעלת ע"י הגנרטור

Joseph Swan (England) 1828–1914

1878 ממציא את מנורת הלהט הראשונה שדעכה לאט.

Thomas Alva Edison (U.S.) 1847 1931

מייסד את "חברת אדיסון לחשמל ואור" בעיר ניו-יורק. רוכש פטנטים הקשורים לתאורה חשמלית, ומתחיל בפיתוח מערכת הפצת חשמל (בזרם ישר) בניו-יורק.

F. Savery

1827 גילה שהתפרקות מתח מכדור ליידין Leyden jar ממגנט מחט בשכבות עם כוונים מגנטיים הפוכים, ומסיק שההתפרקות נבנית מתנודות מהירות

אלקטרומגנטיות

George Green

1828 מרחיב את עבודת לגראנז' לפלאס ופואסון לטובע את השם " potential " לפונקציה הסקלארית המתארת שדות אלקטרומגנטיים. מנסח משפטי גרין וגאוס (משפט הדיברגנט) מבלי לדעת על עבודת גאוס. מצטט את Priestley לאינטגרציה של כוח הנופל כריבוע המרחק ממקור, וחוק Franklin מעבודתו הנסיוני על מטענים במיכל סגור שבתוכו יש סיכוך לשדה.

Augustine Louis Cauchy 1857-1789

1828 מפרסם עבודה דומה ל-Navier להתפשטות אור באתר, אבל מתבססת על תכונות אלסטיות (ולא מולקולאריות) ולכן משוואותיו כלליות יותר. לפי קושי לאתר אותה אינרציה אך אלסטיות התלויה במדיום.

Poisson

1828 פואסון מראה שלמשוואות נבייה וקושי פתרונות גלים אורכיים ורחביים. פיזיקאים ב-50 שנים הבאות ינסו לתאר תכונות אתר בו לא יתכנו גלים אורכיים.

William Nicol

1828 ניקול ממציא פריזמת ניקול – משני גבישי קלציט

אלקטרומגנטיות

Joseph Lister

1830 ליסטר מראה עדשות מתוקנות לסטיות (אברציות)

Michael Faraday, Ányos Jedlik

1831 גנרטור חשמלי

Joseph Henry

1831 הנרי יוצר מגנטים מסלילים עם ליפופים רבים

1832 מגלה באופן בלתי תלוי מאמפר זרם מושרה

1842 מדלה מחדש את תוצאות נסיונות סברי F. Savery על תנודות דועכות של שדה חשמלי בהתפרקות קבל.

Faraday

1831 מראה ששינוי זרם במעגל אחד משרה זרם במעגל סמוך לו. מסביר בדיאגרמות ע"י שטף מגנטי (ללא תיאור מתמטי).

יוצר חשמל משינוי שדה מגנטי – בעזרת סליל יצר מתח ריגעי בגליונומטר – דינאמו: הסביר ע"י חשמל הנאגר באתר.

1834 מגלה השראה עצמית של סליל

אלקטרומגנטיות

Faraday

1832 חוקי האלקטרוליזה
1833 פרדיי מתחיל מחקר בקשר בין כימיה לחשמל. מבין שלכל אטום מטען מוגדר.
1834 שני חוקי מעבר חשמל בתמיסות אלקטרוליטיות (יוניות)
1837-8 תורה מקיפה של חשמל המבוססת על קוי כוח הנפרשים במרחב – במקום מרכזים המפעילים כוח מרחוק.

Heinrich Lenz

1833 חוק לנץ: הזרם המושרה במעגל סגור זורם במגמה המנסה לבטל את השינוי.
מקביל אלקטרומגנטי לעקרון לה שטלייה Le Chatelier לכימיה (1885).
מגלה כי התנגדות עולה בעלית הטמפרטורה

George Biddell Airy

1835 איירי מחשב את תמונת ההתאבכות מחריר עגול. מתכנן עדשה גלילית לתיקון אסטיגמטיות (צילינדר) בראיה.

Weber

1835 השדה המגנטי של הארץ

אלקטרומגנטיות

Carl Jacobi

1834 מתאר uniformly rotating self-gravitating ellipsoids
מסביר שכוח כבידה בתוך גוף אליפטי קיים רק מהאליפסה הפנימית למקומו, בעוד
הכוח הנובע מהשכבות מחוץ לו מתאפס.

James MacCullagh and Franz Neumann

1835 משפט קושי Cauchy למדיום רציף מורחב גם למדיה גבישית. רצון להסביר
אלקטרומגנטיות בחוקים מכאניים!

אלקטרומגנטיות

Faraday

1837 קבוע דיאלקטרי -

George Green

1837 מטפל בתנאי שפה לתורה האלסטית של האתר, במקום התאמה לחוקי האופטיקה התאמה לחוקי הדינאמיקה.

Faraday

1838 מראה שהשראת מטענים במבודדים אנלוגית להשראת מגנטיות בחמרים מגנטיים. נקשר למשוואת פואסון
מגלה אזור חשוך בזוהר התפרקויות חשמליות ליד האלקטרודה השלילית

אלקטרומגנטיות

James MacCullagh

1839 אתר אלסטי בלי גלים אורכיים, בו האנרגיה הפוטנציאלית לעוות תלויה בסיבוב ולא בדחיסה. משוואת הגל זהה למקסוול.

William Thomson (Lord Kelvin)

1839 בהמשך למק-קף, ממציא מודל מכאני לאנרגית סיבוב, המכיל כדורים, מוטות, מגעים מתחלקים וגלגלי תנופה...

Cauchy and Green

1839 מסירים אפשרות לגלי אתר אורכיים ע"י דחיסות שלילית

F. Neumann and Matthew O'Brien

1842 מציעים שתכונות אופטיות נובעות מאופן זרימת האתר סביב חלקיקי החמר.

Christian Doppler

1842 מציע "אפקט דופלר" תדירות אנרגיה גלית תלויה בתנועת השולח והמקבל ואח"כ מפתח את התיאוריה.

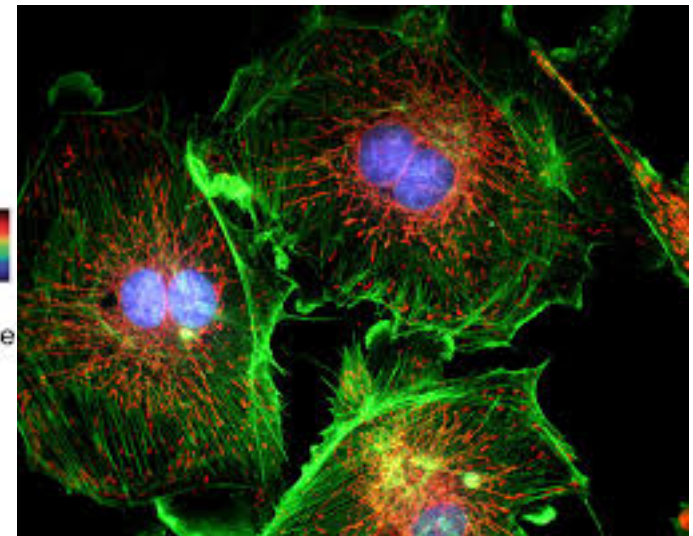
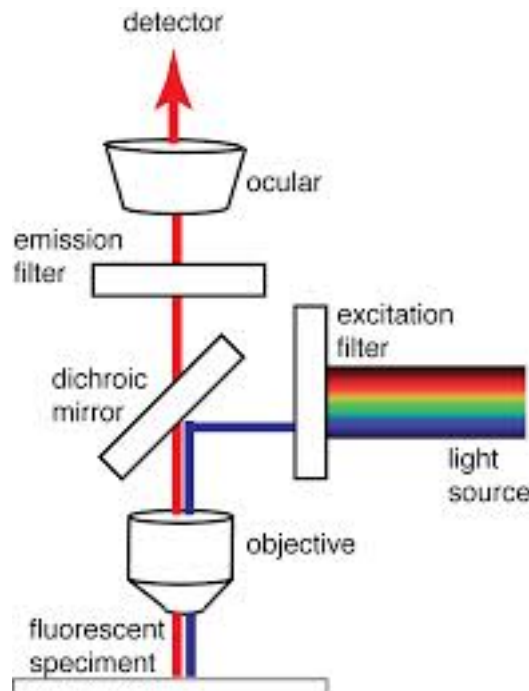
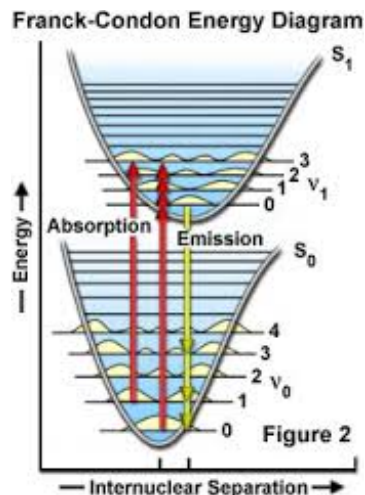
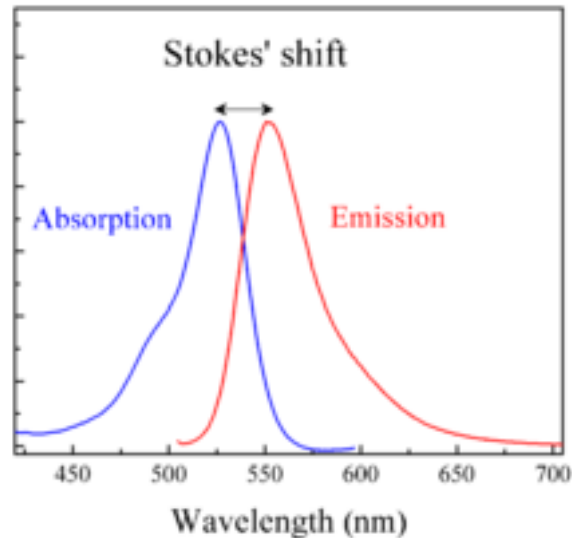
1842 לורד קלווין - מפתח גם אפקט דופלר

פלוואורוסצנציה George Gabriel Stokes (1819-1903) Ireland

1843 סטוקס מתאר הזזת ספקטרום הפליטה מספקטרום הבליעה של פלוואורוסצנציה של

זכוכית אורניום - "הסחת סטוקס" Stokes shift

המקרוסקופיה הפלוואורוסצנטית המודרנית מבוססת על הסחת סטוקס כדי להפריד בין האור המעורר את הצבעים, לפלוואורוסצנציה הנפלטת, החלשה ב-5-6 סדרי גודל בעצמתה מהאור המעורר.



תורת הגלים (לא אור)

John Russell 1808–1882

1843 בתכנון דוברות המוסעות עם סוסים בתעלות אנגליה מגלה גלים שאינם דועכים
soltion המתקדמים בתעלה אם הדוברה נעצרת. משתמש בטנק מים לחקור את
מהירות הגל כתלות במשרעת (אמפליטודה) ועומק במים. התיאור התקבל בחשד,
והסבר תיאורטי ניתן רק ב-1876 ע"י לורד ריילי Lord Rayleigh. לגל זה חשיבות
בסיבים אופטיים.

אלקטרומגנטיות

Michael Faraday

1844 סיבוב אור ואלקטרומגנטיות

1845 מגלה כי התפשטות אור בחומר מושפעת ע"י שדה מגנטי. מישור קיטוב האור מסתובב כשהוא עובר דרך "קוי השדה" של אלקטרומגנט –

סיבוב פרדיי rotation

1845 בתגובה לשאלת טומסון חוקר סיבוב קיטוב האור במעבר דרך זכוכית בשדה מגנטי. המגנט עובד על הקיטוב באמצעות הזכוכית.

מפתח את רעיון קוי השדה והכוח – את ההשראה קיבל מסידור נסורת ברזל ליד מגנט. מקסוול הימשיך בדרך זו.

W. Thomson

1845 בעקבות נסיונות פרדיי מסיק כי חשמל ומגנטיות קשורים.

אלקטרומגנטיות

Franz Neumann

1845 משתמש בחוק לנץ, מניח שהכוח האלקטרו-מניע יחסי לכוח המגנטי על אלמנט זרם, ומשתמש בשיקולים של אמפר לקבלת חוק פרדיי. הוא מגדיר פונקצית פוטנציאל שממנה ניתן לקבל את השדה החשמלי המושרה – משוואת מקסוול.

George Airy

1846 משנה את התורה האלסטית של האתר לפי מקולף MacCullagh כדי להסביר את סיבוב קיטוב האור בשדה מגנטי של פרדי.

Michael Faraday

1846 בעקבות הממצא שלו על סיבוב קיטוב האור מעלה השערה שהאור הוא גל אלקטרומגנטי רחבי. באותה שנה מגלה תופעת דיאמגנטיות (בביסמוט למשל)
1855 פורש בבית במימון המלכה עד מותו ב-1867
1860 מתאר הורדת נקודת הקפאון למים בלחץ

.

William Thomson

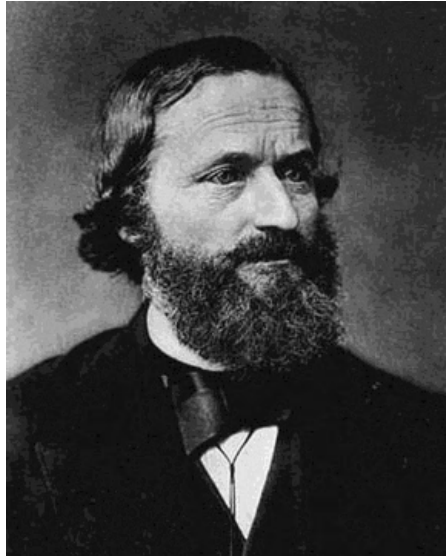
1846 מראה שהפוטנציאל האלקטרומגנטי של ניומן

אלקטרומגנטיות

Wilhelm Weber 1804–1891

1846 משלב שיקולי אמפר, פרדיי והנחת פשנר Fechner שזרמים מכילים מטענים חיוביים ושלייליים שוים ונעים בכוונים הפוכים בתורה אלקטרומגנטית המבוססת על כוחות בין מטענים התלויים במהירותם. אמנם התורה שגויה, אך תרמה לתורתם הנכונה של מקסוול ולורנץ, ולמבט חדש על כוחות הכבידה ע"י טומסון **William Thomson** בנסיון להסביר את הפרצבסיה של מסלול מרקורי. 1847 מציע שדיאמגנטיות היא חוק פרדיי הפועל על מעגלי זרם ברמה אטומית. מסביר נכון כי לחמרים פרה- ופרומגנטיים יש זרמים מולקולאריים חזקים.



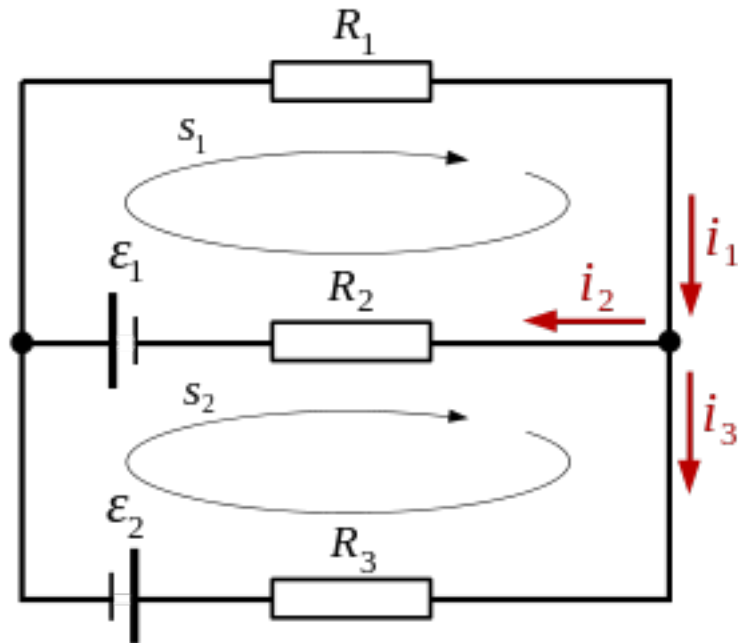


אלקטרומגנטיות

Gustav Kirchhoff

1848–9 מרחיב חוק אוהם למוליכות בחוט מוליך לשלשה ממדים.
מנסח חוקי קירחוב לרשתות, ומאחד את הכוח האלקטרוסטטי של אוהם עם הפוטנציאל האלקטרוסטטי של לגראנז' לפלס ופואסון.
הוכיח שזרמים חשמליים בשוי משקל מתפלגים באופן שמקטין את חימום ג'אול.

1857 מפתח את "משוואת הטלגרף" לכבל קואקסיאלי, שעבור התנגדות קטנה נותן משוואת גל עם מהירות קרובה למהירות האור. הוא מבין את הקשר של אלקטרומגנטיות לאור.



חוק קירחוב לקרינת גוף שחור-ראה להלן

חוקי קירחוב לרשת: סכום הזרמים בצומת = 0
סכום המתחים בכל מסלול סגור = 0

זה היתה בעית "חובה" בבחינות הבגרות בפיזיקה

אור

Armand Hippolyte Louis Fizeau and Jean-Bernard Foucault

1848 מיישם אפקט דופלר לאור – הסחה לאדום ולסגול.
1849 פיזו ופוקו חוזרים על נסיון גלילאו למדידת מהירות האור, עם גלגל שיניים מסתובב מהר, ומראה במרחק 9 ק"מ. תוצאה 290,000 ק"מ לשניה.
המדידה הארצית הלא אסטרונומית הראשונה.

Jean Bernard Léon Foucault

1850 פוקו משפר נסיון ומשתמש במראה מסתובבת למדידת מהירות האור באויר ובמים. מוצא שמהירות אור במים פחותה מבאוויר.

George Gabriel Stokes

1849 חוקר עקיפה על גבול גופים אטומים. מראה שתנודות האתר אנכיים למישור הפולריזציה.
1852 מגיע לאותה מסקנה מקיטוב אור המפוזר מהשמים, אך זה אינו עולה בקנה אחד עם נסיונות בגבישים. חלק מהקשיים נפתרים אם מניחים שאלסטיות האתר שווה בכל החמרים, אך האינרציה שונה בין חמרים שונים ואף תלויה בכוון – ולכן אנאיזוטרופיה בגביש.
מגדיר משתני סטוקס לקיטוב Stokes parameters of polarization
1867 מבצע נסיונות שהורגים את תיאורית ההתמדה (אינרציה) האנאיזוטרופית של עצמו.

אלקטרומגנטיות

Helmholtz

1851 ממציא אופטלמוסקופ - במגע עם העין מאפשר לראות כלי דם ברטינה.

1858 מתקן את תיאורית שלשת הצבעים של יאנג: כל אורך גל גורם לתגובת כל שלשת קולטני הצבעים בעין. מסביר מדוע אין רוייה בתגובה לצבעים "טהורים".

אלקטרומגנטיות

William Thomson (Lord Kelvin)

1850 קלווין ממציא את מושגי סוספטיביליות מגנטית χ_m ופרמיאביליות μ קבועי היחס בין שדה מגנטי למגנטיזציה של חומר

לדיאמגנטים χ_m שלילי. $M = \chi_m H$, $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$

1850 מנסח תיאוריה לאפקט הטרמוחשמלי של סיבק ופלטייה Seebeck and Peltier.

1853 משתמש בתורה המגנטית של פואסון לנוסחת האנרגיה המגנטית.

בטעות קובע שהכוח המגנטי על זרם תלוי בגרדיאנט השדה. מפתח תיאוריה למעגל

עם התנגדות, קיבול והשראה RLC המסביר תצפיות הנרי וסברי Henry and Savery.

1856 חשמל בתנועה הוא חום, וסידור במקביל של צירי סיבוב יוצר מגנטיות

1856 מסביר סיבוב קיטוב של פרדיי באמצעות סיבוב מולקולות החומר דרכו עובר

האור: ממשיך הנחת רנקין William John Macquorn Rankine's וטוען: סביב זרם יש

קוים ספיראליים המתעקלים ליד מגנט. יותר מאוחר טען ששינוי מעגלי זרם יוצר

מגנטיות.

אלקטרומגנטיות

Wilhelm Eduard Weber and Rudolph Hermann Arndt Kohlrausch

1856 וובר וקולראוך משתפים פעולה למדידת היחס בין יחידות אלקטרוסטטיות ואלקטרודינאמיות ומוצאים 3.1074×10^8 מטרים לשניה – דומה מאד למהירות האור.

חשמל ומגנטיות

Gustav Robert Kirchhoff

1859 קירחוב מבטא שני חוקי חשמל למעגלי זרם: סכום המתחים בלולאה = 0 ובצומת סכום הזרמים הנכנסים שווה ליוצאים.
1859 מראה שספקטרום קרינת גוף שחור תלוי רק בטמפרטורה ובתנועת הפולט – אך לא בחומר ממנו הוא עשוי.

Bernhard Riemann

1861 רימן מפתח וריאציה נוספת שגויה של התורה האלקטרומגנטית של וובר

Maxwell

1861 משוואות מקסוול המאחדות חוקי קולון, אמפר, פרדיי (השראה)

אופטיקה

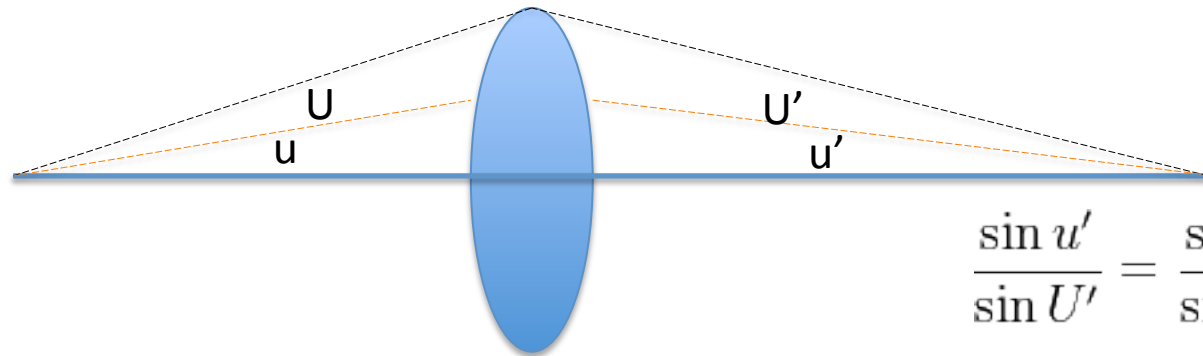
Ernst Abbe

1860 חוק הסינוס – פריצת דרך בתיכנון עדשות מיקרוסקופ שעד אז נעשה בניסוי וטעייה. חוק הסינוסים מבטיח תמונה חדה לשדה גדול.

1877 אבה מפרסם סידרת מאמרים על אופטיקה של מיקרוסקופ, והגדרת כושר ההפרדה בעדשה – $d = \lambda / 2NA$

חברת קרל צייס משתמשת בחוק ומשתלטת על שוק המיקרוסקופיה.

לשים לב: לעדשה דקה $\text{tag}(u')/\text{tag}(U') = \text{tag}(u)/\text{tag}(U)$



$$\frac{\sin u'}{\sin U'} = \frac{\sin u}{\sin U}$$



אלקטרומגנטיות

Joseph Boussinesq

1867 מציע שבמקום אתר המשתנה בסוג התווך, האתר זהה אך האינטראקציה שלו עם התווך שונה.

Riemann

1867 מציע משוואה חשמלית לאור המחליפה את משוואת פואסון

Ludwig Lorenz

1867 תיאוריה אלקטרומגנטית לאור המבוססת על שדות סקלארי ווקטורי מושהים. הם מקיימים את משוואות הגלים, וניתן לקבל מהם את משוואות מקסוול.

Ludwig Valentin Lorenz

1869 כתוצאה מהמחקר האופטי ומשוואת הגל קושר צפיפות וקיטוב למנת שבירה למים

Hendrik Antoon Lorentz

1878–80 מפתח אותו קשר באופן בלתי תלוי: משוואת לורנץ–לורנץ

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} N \alpha,$$

מנת השבירה n מספר המולקולות N הפולאריזביליות α

אלקטרומגנטיות

Helmholtz

1870 מקבל החזרה ושבירת אור ממשוואות מקסוול עם תנאי שפה של רציפות השדה הסקלארי והרכיב האנכי של השדה הוקטורי. הפיתוח מופיע בטיזה של לורנץ, וחוזרת לתיאורית MacCullagh–

Maxwell, Thomson, Kirchhoff, Bjerknes, Leahy, Fitz Gerald, Helmholtz, and Hicks.

1870-1900 מאמצים לתת מודל מכאני לאתר כדי שיתאים למשוואות מכסוול

E. Mascart

1872 מחפש תנועת אתר יחסית לארץ באמצעות סיבוב מישור הקיטוב בגביש קווארץ – אין תנועה (מדידה בדיוק רב).

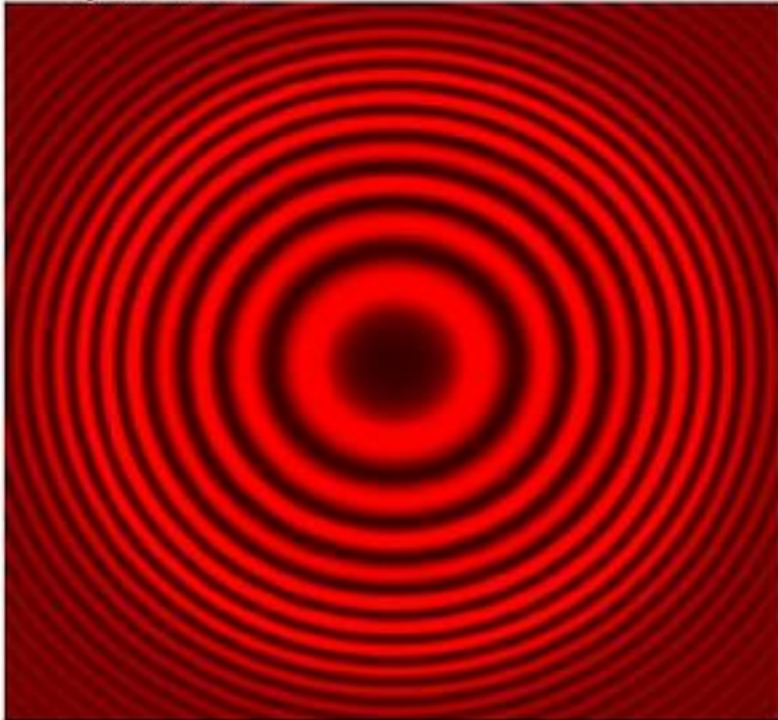
אלקטרומגנטיות

Marie Alfred Cornu

1874 מתאר את "ספירלת קורנו" לחישוב עוצמת אור בהתאבות פרנל.

חישוב סכום וקטורי האור (עצמה ופזה) הנתרמים מסדק

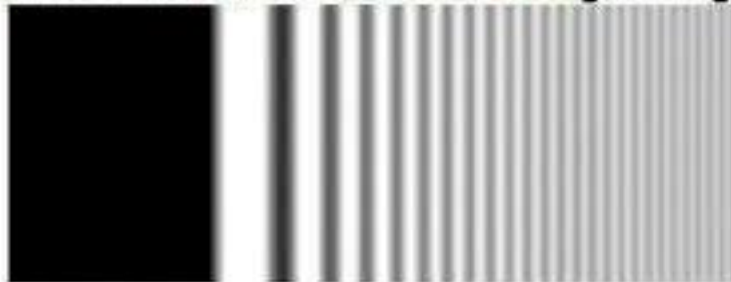
Fresnel diffraction of circular aperture"



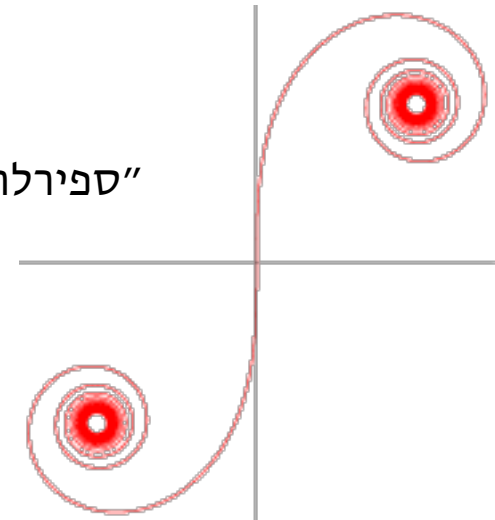
$$\psi_P \propto \int t(x, y) \exp \left(ik \frac{x^2 + y^2}{2R} \right) d\Sigma$$

$$\int_0^w \exp \left(\frac{i\pi u^2}{2} \right) du = C(w) + iS(w)$$

Fresnel diffraction of straight edge"



"ספירלת קורנו"



אלקטרומגנטיות

John Kerr

1875 מגלה שבירה כפולה בכמה נוזלים כשמופעל עליהם שדה חשמלי – תא קר.
הוכחה לקשר של שדה חשמלי לאור.

A. Bartoli

1876 מסיק קיום לחץ קרינת אור משיקולים טרמיים: קשר אלקטרומגנטיות
לטרמודינאמיקה.

Henry Rowland

1876 מבצע נסיון בהשראת הלמהולץ המראה לראשונה שזרם חשמלי הוא מטענים
נעים

Maxwell

1877 לתנודות מגנט תכונות דומות לאור ומתקדמות במהירות האור

אלקטרומגנטיות

Edwin Herbert Hall

1879 הול מבצע נסיון שהוצע ע"י רולנד Henry Rowland ומגלה אפקט הול – כששדה חשמלי אנכי למגנטי נוצר שדה חשמלי האנכי לשניהם. מוסיף תרומת הול להתנגדות אוהמית. האפקט הוסבר רק בעזרת תורת הקוונטים
1879 בולצמן משתמש באפקט הול להערכת מהירות נושאי המטען, בהנחה שכולם בסימן זהה

1880 רולנד מראה שסיבוב הקיטוב של פרדי מוסבר ע"י משוואות מקסוול + איבר אפקט הול במשוואת אוהם, בתנאי שזרם ההעתקה displacement current מתנהגים כמו זרמי מוליכות

1881 טומסון מנסה לאמת קיום זרמי העתקה בחפוש אפקטים מגנטיים המושרים משינויי שדה חשמלי של כדור טעון בתנועה

1881 פיטסג'רלד George Fitz Gerald מציין טעות של טומסון כשלא התחשב בתנועת המטענים על הכדור עצמו שמבטלים את האפקט של זרמי ההעתקה.

1883 פיטסג'רלד מציע לבדוק את תיאורית מקסוול ע"י זרם חילופין בתייל טבעתי (היום: אנטינת דיפול). הוא מגלה שצריך תדירויות גבוהות מאד, אותם הוא מקבל מאוחר יותר באותה שנה מהתפרקות קבל

קרינת גוף שחור

$$j^* = \sigma T^4.$$

Josef Stephan (1835-1893)

1879 משער כי הקרינה מחור, השקולה לקרינת גוף שחור, יחסית לחזקה רביעית של הטמפרטורה. חוק סטיפן-בולצמן לקרינת גוף חם מעריך טמפרטורת השמש ל- 5700°K ,
 $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$

Boltzmann (1844-1906)

1884 מפתח תיאורטית את חוק סטיפן משיקולים טרמודינאמיים

Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928)

1893 חוק ווין לספקטרום קרינת גוף שחור: אורך הגל עם מכסימום אנרגיה יחסי הפוך לטמפרטורה (בקלויין). משתמש בתנור עם פתח קטן כקירוב לגוף שחור.

קרינת גוף שחור

Gustav Kirchhoff

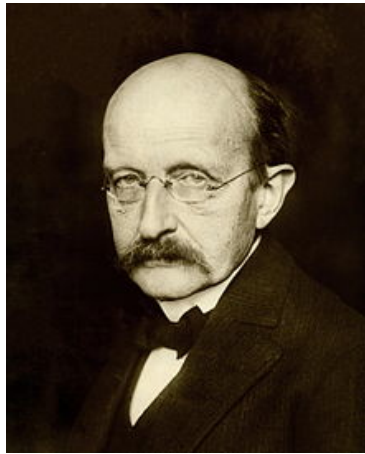
חוק קירכוב לקרינת גוף שחור – לא תלויה בחומר, רק בטמפרטורה
ואורך הגל

Lummar and Alfred Pringsheim

1899 לומר ופרינגשהיים מסיימים מדידות ספקטראליות מדוייקות מקרינת גוף שחור
שאינן תואמות את נוסחת ריילי-ג'ינס **Rayleigh-Jeans** (הקטסטרופה באולטרה-סגול)

Josef Stefan, Ludwig Boltzmann, John William Strutt, and Wilhelm Wien

מנסים למצוא את הפונקציה המתארת את ספקטרום הפליטה לגוף שחור אך מגלים
סטיות באדום ובסגול



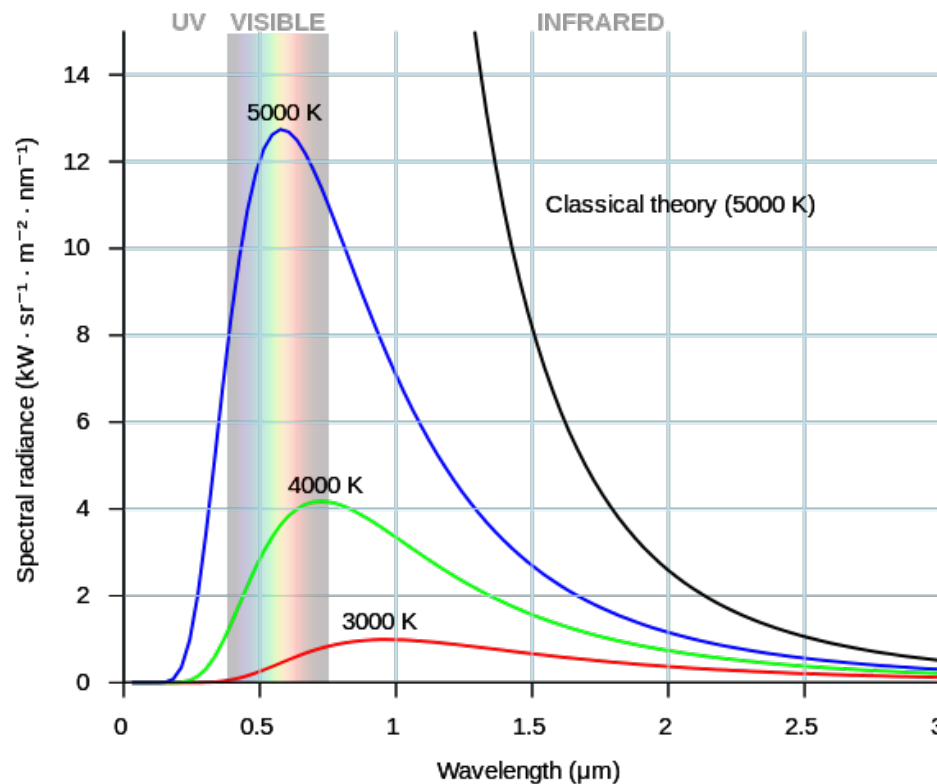
קרינת גוף שחור

Max Karl Ernst Ludwig Planck

1900 מציג את הפונקציה הנכונה:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

הנוסחא הפכה לנוסחה מכוננת בתורת הקוונטים, למרות שפלנק הציע אותה משיקולי התאמה לנסיונות בתחום ספקטראלי רחב



אלקטרומגנטיות

Helmholtz

1881 מציע בהרצאה שחלקיקים טעונים באטומים תואמים לתורת מקסוול ופרדיי, במקום מודלים של אתר.

Albert Michelson and Edwin Morley

1882 מנסים למדוד זרימת אתר דרך הארץ בתנועתו ע"י התאבכות, ולא מוצאים זרימה כזו. ההסבר שהם נותנים – כמו מודל סטוקס לתנועת כדור בנוזל – המהירות קרוב לפני הכדור יחסית לכדור היא אפסית.

John Poynting

1884 פוינטינג מראה שמשוואות מקסוול מנבאות זרימת אנרגיה דרך ריק.

אלקטרומגנטיות

Hendrik Anton Lorentz

1892 לורנץ מציג תורת אלקטרון ואתר המשלבת משוואות מקסוול עם חוק הכוח של לורנץ למטען בתאוצה. התיאוריה מבוססת על אתר נייח, ואינה עולה בקנה אחד עם נסיונות מייקלסון ומורלי.

Oliver Lodge

1892 לודג' מבצע נסיונות על התפשטות אור ליד דיסק מסתובב במהירות גבוהה כדי לבדוק סחיפת אתר – ולא מוצא אפקט.

George Fitz Gerald

1892 פיצג'רלד מציע התכווצות אורך גוף בתנועה כדי להציל את תורת לורנץ

Arnold Sommerfeld

1896 סומרפלד פותר את הדיפרקציה מחצי מישור מוליך

אלקטרוליטים

Walther Nernst

1888 תיאוריה לפוטנציאל חשמלי בתמיסות יוניות ובבטריות. שימוש חשוב בזרימת יונים דרך ממברנות ביולוגיות: פוטנציאל ממברנה

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{ion outside cell}]}{[\text{ion inside cell}]} = 2.3026 \frac{RT}{zF} \log_{10} \frac{[\text{ion outside cell}]}{[\text{ion inside cell}]}$$

R is the universal gas constant: $R = 8.314\,472(15) \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

F is the Faraday constant, the number of coulombs per mole of electrons:

$F = 9.648\,533\,99(24) \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$

z is the number of moles of electrons transferred in the cell reaction or half-reaction

1897 ממציא מנורת להט עם חוט קרמי, שהחליפה את מנורת חוט הפחמן של אדיסון,

ונרנסט התעשר בגינה. המנורה הוחלפה במנורת הטונגסטן ב-1905

1905 החוק השלישי של הטרמודינאמיקה – ליד האפס המוחלט

האנטרופיה שואפת לאפס

1909 נסע לפגוש את איינשטיין בבזל והשפיע על קבלת משרה

בברלין

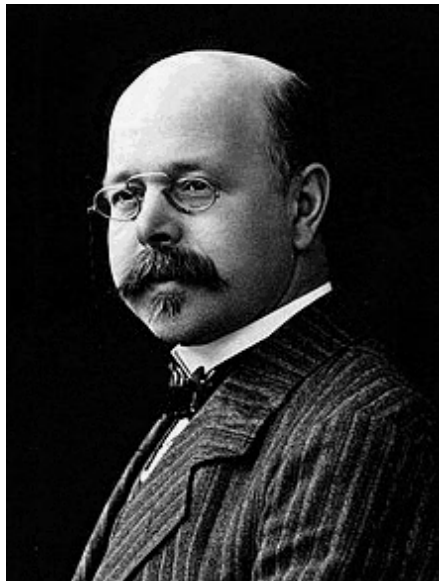
1918 הציע ריאקצית שרשרת, הצעתו לריאקציה כימית

מומשה אח"כ בגרעינית)

1920 נובל על תרומותיו בטרמודינאמיקה

1930 פיתח פסנתר חשמלי עם חברות בקשטיין וסימנס

(דומה לגיטרה חשמלית)



אלקטרוליטים

Svante August Arrhenius 1859–1927

1883 ארהניוס מיחס מוליכות תמיסות מלח בזרם אלקטרוליטים

1887 ארהניוס מסיק כי בתמיסות אלקטרוליטים דלילות מולקולות חומצה בסיס

ומלח נפרדות ליונים חיוביים ושליילים, לפי משוואת שוי המשקל של ונט-הוף.

1889 מציג את רעיון אנרגית אקטיבציה לתגובה כימית – משוואת ארהניוס מקשרת

אותה ל-rate constant $k = Ae^{-E_a/(RT)}$

לתמיסה מוגדר pH כמינוס לוגריטם הפעילות (היחסית לריכוז מולארי) של יוני H^+

$$\text{pH} = -\log_{10}(a_{\text{H}^+}) = \log_{10}\left(\frac{1}{a_{\text{H}^+}}\right)$$

נובל-1903



טכנולוגיות

טלגרף וטלפון



Samuel Finley Breese Morse (U.S.) 1791 –1872

1844 ממציא הטלגרף. משתמש בקוד משלו הדומה לסמפור

1844 הראשון לתאר "טלגרף מדבר" או טלפון

Faraday

1854 מטפל במהירות העברת סיגנאלים בקוי טלגרף הכוללת קיבול.

Thomson

1854 במכתב לסטוקס מנסח את משוואת הטלגרף עם התנגדות וקיבול תייל
ההולכה, אך ללא השראה. המשוואה דיפוזיונית ומהירות הסיגנאל אינה קבועה.

1848-9 - Gustav Kirchhoff

1857 מפתח את "משוואת הטלגרף" לכבל קואקסיאלי, שעבור התנגדות קטנה נותן
משוואת גל עם מהירות קרובה למהירות האור. הוא מבין את הקשר של
אלקטרומגנטיות לאור.

Wenham and Browning

1871 האנגלים וונהם ובראונינג עושים נסיונות אירודינאמיים במנהרת רוח



רדיו

Heinrich Rudolf Hertz 1857–1894

1884 גלים הנוצרים עקב תנועת מטענים זהים לגלים מתנועת מגנטים.

1887 מייצר קרינה אלקטרומגנטית – גלי רדיו, ממעגל מתנודד בתהודה, הנעים באויר, ומראה שהם נעים במהירות האור באויר ובמתכת, וניתנים לקיטוב ע"י סדרת חוטי מתכת מקבילים, וכן להחזרה ושבירה כמו אור. חקר גלי הרדיו הביאו שיזנח את תיאורית הפעולה מרחוק של הלמהולץ. ע"ש הרץ יחידת תדירות (תנודות לשניה).

1887 הרץ מגלה את האפקט הפוטואלקטרי : אור אולטרה-סגול המאיר אנודה

ב-spark gap מוריד את התנגדות "האויר" בין האלקטרודות

1889 תיאוריה לקרינת גלי רדיו מ-oscillating spark gap

1890 פיצג'רלד **Ftiz Gerald** משתמש בפוטנציאל המושהה של לורנץ לחישוב המקרין

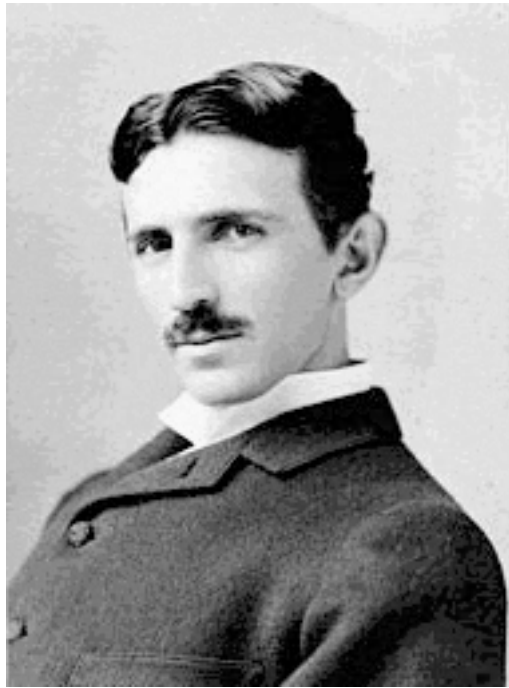
הדיפולי (אנטינה) של הרץ

Oliver Joseph Lodge

1894 לודז' ממציא קולט לגלי רדיו 'coherer'

Guglielmo Marconi

1895 מרקוני שולח גלי טלגרף (רדיו) וקולט אותם ממרחק כ-1.6 ק"מ



Nicola Tesla 1856 –1943 Serbia –USA

1884 היגר לארה"ב

1888 טסלה רשם פטנט על זרם חילופין

1893 גילה קרינת רדיו, ורצה "לחשמל" את הערים ע"י קרינה

וקליטתה בסליל טסלה: שנאי שמשנה את המתח

1895 חקר קרינה שיוצאת ממנורת קשת- ואחרי רנטגן 1896 הזניח את הנושא.

עבד אצל תומס אדיסון, שיפר את הגנרטורים והתפטר כשלא קיבל תמלוגים.

הקים חברה עצמאית והמציא מנוע זרם חילופין

נשכר ע"י ווסטינגהאוז להפיץ חשמל בזרם

חילופין AC שיתחרה באדיסון שסיפק חשמל

בזרם ישר לניו-יורק. חברת חשמל אדיסון

הפכה ל-GE ולאחר שהפסידה לווסטינגהאוז

במכרז לחישמול התערוכה הבי"ל בשיקגו

ב- 1893 ניצח זרם החילופין ונבנתה תחנת כוח על מפלי הניאגרה.

בנה מגדל תקשורת רדיו מעבר לאוקיינוס והחזיק בפטנט

אך השימוש לרדיו קודם ע"י מרקוני

היו שמועות שיקבל פרס נובל עם אדיסון, אך בגלל היריבות ביניהם

כנראה הוחלט להעניק את הפרס לברג על דיפרקצית קרני x בגבישים

היה מלא דמיון, אך רוב המצאותיו לא היו מעשיות בזמנו, למרות שיושמו

בהמשך הדרך אולי למטרות שונות ובשינויים.

יחידת טסלה מודדת עצמת שדה מגנטי.



טלגרף וטלפון

Thomas Edison

1873 אדיסון מגלה שינוי התנגדות של אבקת פחם כשמפעילים עליה לחץ. בונה ריאוסטט על עקרון זה, אך זונח אותו בגלל רגישות לתנודות.
1 משתמש באבקת פחם כמיקרופון.

Alexander Graham Bell

1875 הטלפון משדר צליל פריטה על מיתר. שנה אח"כ מתקבל הפטנט.
1876 רמקול – מבוסס על מכשיר הלמהולץ – המצאת הטלפון

Almon Strowger

1892 מרכזית טלפון אוטומאטית (אלקטרומכאנית) בשימוש מסחרי.

צילום

Joseph Nicéphore Niépce

1826 פלטת הצילום

George Eastman

1888 מצלימת קופסה ידנית של קודק

Frederic E. Ives

1892 צילום בצבע

Louis Jacques Mandé Daguerre

1839 מפרסם את תהליך הצילום.

Gribbin and Gribbin

1845 יוצרים תמונת השמש (פריז). משכללים אמולסיות צילום במהירות ורגישות. שימוש חשוב באסטרונומיה.

מה החשיבות המדעית ללוחות הצילום (ספקטרוסקופיה, אסטרונומיה, רדיואקטיביות)

חשמל שימושי

Zénobe Gramme

1873 מנוע זרם ישר מודרני

William A. Anthony

1875 דינמו

Nikola Tesla

1877 מנוע השראה

Lucian Gaulard and John D. Gibbs France & England

1881 רשמו פטנטים הקשורים לזרם חילופין, בעיקר טרנספורמטורים להספק גבוה, שניקנו ע"י ווסטינגהאוז לפרוייקט חישמול פיטסבורג ומסצ'וסטס ב-1886. הגנרטור ההידראולי יצר חשמל שהותמר ל-3000 וולט, הועבר למרחקים והוחזר ל-100 וולט.

William Stanley

1885 שנאי (טרנספורמטור) לזרם חילופין

Nikola Tesla

1888 טסלה רושם 30 פטנטים למערכת כוח חשמלית עם זרם חילופין רב-פאזי



חשמל שימושי – נורות

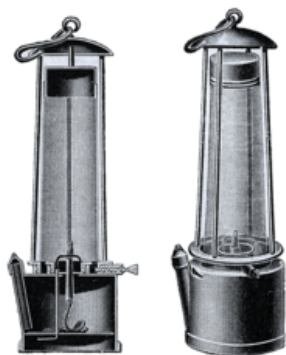
Sir Humphry Davy 1778-1829

נודע ככימאי שבודד יסודות רבים, היסודות האלקאליים: אשלגן
נתרן, סידן, מגנזיום, בורון, סטרונציום ובארום, כלור ויוד)

1802 מראה שחשמל, שנוצר בסוללה של 2000 תאים, העובר
ברצועה דקה של פלטינה יוצר אור: מנורת הלהט הראשונה.
1806 מדגים מקור אור חזק: קשת חשמלית בין שתי
אלקטרודות פחם.

1815 אך לא פחת בחשיבותה המצאת עשית הבטחון שמנעה
התפוצצויות במכרות פחם. אמנם לא ניזונה מחשמל, אך
הצילה כורים רבים ממות. העקרון: בידוד הלהבה מהסביבה
עם רשת מתכתית, שמוליכותה מנעה מגאז חם לצאת אך גאזים
דליקים יכלו להכנס לחלל המנורה והתגלו ע"י התחזקות
הלהבה

עשית הבטחון



חשמל שימושי – נורות

James Bowman Lindsay

1835 מדגים מנורה בסקוטלנד, אך לא ממשיך ביישום.

Joseph Wilson Swan

1860 מנורת להט עם תיל פחם בואקום.

Henry Woodward and Mathew Evans

1874 פטנט למנורת פחם הגז חנקן – הפטנט נמכר לתומס אדיסון

Thomas Alva Edison

1880 קונה פטנטים למנורות להט ומפתח בעצמו מנורת ואקום עם פחם על עלה במבוק, מנורה שאורך חייה היה 1200 שעות.

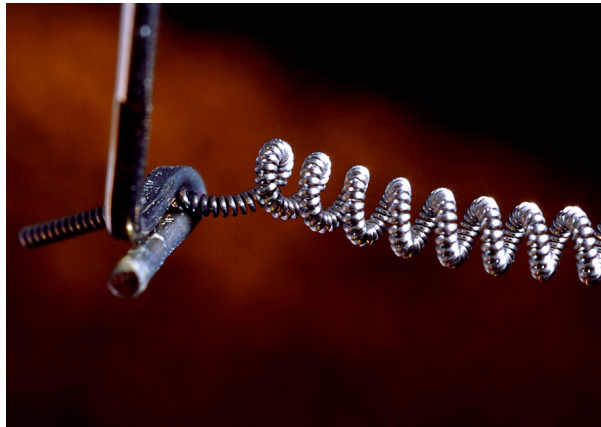
Walther Nernst

1897 (מתמיסות יוניות) ממציא מנורת להט עם חוט קרמי, שהחליפה את מנורת חוט הפחמן של אדיסון, ונרנסט התעשר בגינה. המנורה הוחלפה במנורת הטונגסטן ב-1905.

חשמל שימושי – נורות



Hungarian Sándor Just and Croatian Franjo Hanaman
1904 מקבלים פטנט הונגרי על מנורת טונגסטון בואקום-בהירה יותר וארוכת חיים.



1906 חברת GE מפתחת חוטי טונגסטון מסולסלים – התנגדות עולה והתנדפות המתכת יורדת – מאפשר עליה בטמפרטורה ולכן בהירות משופרת.



Irving Langmuir 1881–1957

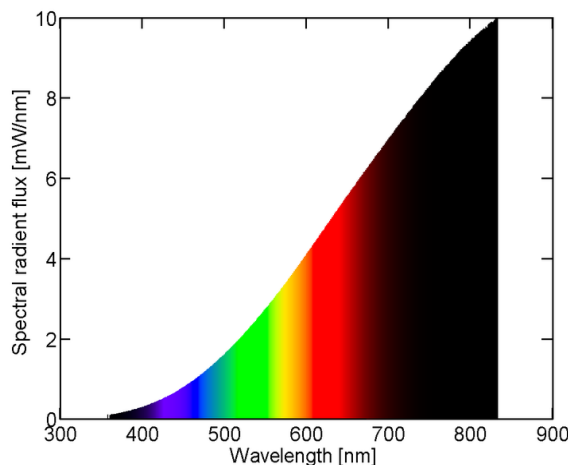
1913 בזמן עבודתו ב-GE מפתח נורת להט ארוכת חיים המלאה בגז אציל. פיתח הלחמה במימן. נובל-1932 על כימיה של משטחים

נורות הלוגן – גז ההלוגן מקטין התנדפות הטונגסטון ומאפשר עליה בטמפרטורת הפילמנט

נורות פלואורוסצנטיות – מעבירות זרם דרך יוני כספית הפולטים אור. ליינון הגז צריך להעביר ניצוץ התחלתי.

הן פותחו בעקבות המחקר בשפורפרות ואקום שבעזרתן התגלו האלקטרון והפרוטון. יעילותן פי 3 מנורת להט.

נורות LED פולטות מעט חום ויעילותן פי 7 מנורות להט.



חשמל שימושי

Thomas Edison (1847-1931)

היה תלמיד גרוע ואימו הוציאה אותו מביה"ס ולימדה אותו בבית. הוא אהב מכאניקה וכימיה. מהמצאותיו:

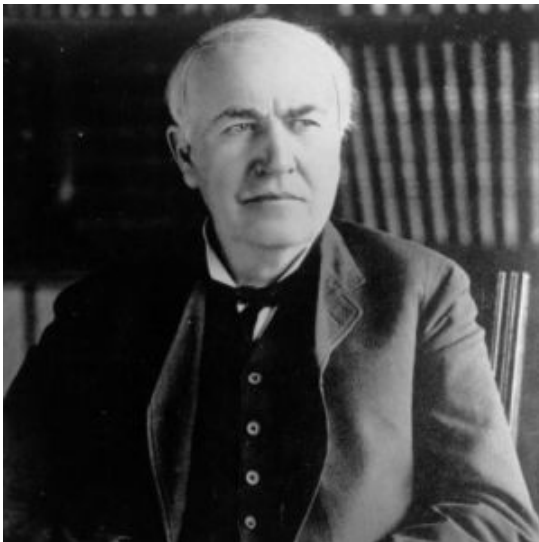
1877 פונוגרף צילינדרי על דף אלומיניום (או בדיל) – התבסס על טלגרף וטלפון, חיבר מחט לרמקול שחרט על הצילינדר. מחט אחרת שימשה להשמעה. גרם לפירסום רב אך במשך הזמן הפסיד לדיסק

1879 הדגמת מנורת להט מפלטינה בנורת ואקום, פיתוח של המצאות קודמות. במשך השנה הבאה פיתח מנורת פחם עם ואקום משופר שבערה 13.5 שעות ויכלה להחליף את מנורות הגז. לשם כך פיתח: מעגל מקבילי, דינמו משופר, מערכת הולכת חשמל תת קרקעית, מיצב זרם, נתיכים, מבודדים, ובתי מנורה עם מפסק.

1882 תחנת החשמל הראשונה במנהטן מספקת לרדיוס מייל אחד בלילה בנצילות פי שלש מגאז. עד סוף העשור סופק חשמל כל היום גם לתחבורה ותעשייה מעשרות תחנות כח פזורות בערים. המגבלה: נפילת מתח בקוי אספקה. חברת Edison General Electric לא נשלטה ע"י אדיסון, וההשקעה העצומה נעשתה ע"י מורגן בין השאר, וב-1892 החברה התאחדה עם המתחרה Thompson-Houston והפכה General Electric בלי אדיסון השם.

1888 קינטוסקופ – כשקודק התחיל לייצר סרטים לתמונות נעות ב-1893 אדיסון בנה אולפן צילום עם גג נפתח לספק אור שמש. C. Francis Jenkins and Thomas Armat ייצרו מטול תמונות (פרוג'קטור) שחברת אדיסון הפיצה ואח"כ ייצרה מודל משלה. הסרט הראשון הוצג ב-1896. 1913 קינטופון: מסונכרן עם פונוגרף

הכסא החשמלי –



מלחמת הזרמים

עד סוף 1887 היו 121 תחנות הספקת חשמל זרם ישר של אדיסון, ו-68 לזרם חילופין של ווסטינגהאוז. אדיסון טען שזרם חילופין מסוכן – והציע להוציא להורג נידונים למות ע"י חיבור לחשמל של ווסטינגהאוז... הוא הבין לבסוף שהייתרון הגדול של זרם חילופין הוא קוים ארוכי טווח במתח גבוה, שהתאפשרו בגלל טרנספורמטורים.

מדוע משלוח חשמל למרחקים ארוכים נעשה בקווי מתח גבוה?

$$W = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad E = dV I_2 = R I_2^2 = R (V_1/V_2)^2 I_1^2$$

כשאדיסון איבד את השליטה על GE, הבעלים החדשים וויתרו על זרם ישר. ווסטינגהאוז רכש פטנטים לגנרטורים, מנועים ומנורות לחשמל זרם חילופין (מטסלה ואחרים) ולמעשה הוכרעה המלחמה לטובת זרם החילופין. האירוע הקובע היה בתערוכה הבי"ל בשיקגו, שהביא גם לזכיה במכרז על תחנה הידרו-חשמלית במפלי הניאגרה, ואח"כ לפיתוח גנרטורים מבוססי מכונות קיטור.

מבנה האטום

פיזיקה אטומית

Sir William Crookes



1861 גילה טליום בספקטרוסקופיה
1875 מפתח שבשבת אור כרדיומטר: מונעת ע"י בליעת החום בצד השחור והחזרתו בצד המבריק. קרוס נתן הסבר לא נכון לסיבוב בגלל לחץ הקרינה, הסבר שהתקבל ע"י מקסוול שציפה ללחץ קרינה. כשהצליחו להגיע לואקום גבוה נוכחו שהתנועה הואטה. הוצע ההסבר שעקב הבדל בטמפרטורת שני צידי הפדלים בשבשבת, השחור והמבריק, גורם למולקולות הגאז הפוגעות בשחור לחזור עם מהירות מוגדלת ושינוי התנע נמסר לשבשבת. ריינולדס ומקסוול התווכחו על פיענוח הבעיה, ואינשטיין חישב את הכוח שמתקבל, שהתאים נסיון. ב-2009 יצרו שבשבת קעורה-קמורה ששני צדדי הפדל צופו באותו ציפוי זהב ננו-גבישי הבולע אור.

1875-9 "שפופרת קרוקס" - יוצר ואקום של מליונית האטמוספירה, בשפופרת זכוכית עם אלקטרודות, ויוצר קרינה פלואורוסצנטית מאלקטרונים שהואצו ופגעו בזכוכית. חוקר השפעות על "קרני קטודה" בשפופרת ריק.
השפופרת היא הבסיס לגילוי קרני רנטגן וחלקיקים תת-אטומיים.

Eugene Goldstein

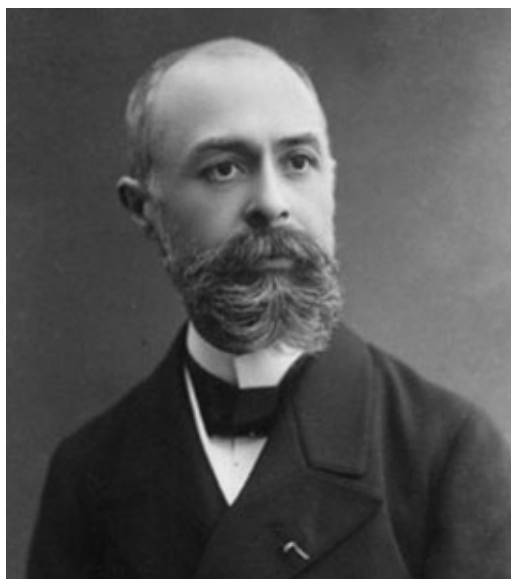
1885-6 טובע את השמות קרני קטודה (אלקטרונים) וקרני תעלה (יוני מימן או פרוטונים)



Wilhelm Conrad Röntgen 1845 –1923

1895 מגלה קרני x משפופרפות ריק שגרמה לפלואורוסצנציה בקרטון ספוג מלחי באריום בחדר חשוך

נובל 1901



Henri Becquerel 1852 –1908

1896 מגלה רדיואקטיביות במלחי אורניום - שרפו לוחות צילום.
1899 הראה שהקרינה מאורניום מכילה חלקיקים טעונים המוסטים בשדה מגנטי
1903 נובל עם מרי ופייר קורי

.



J.J. Thomson 1856–1940

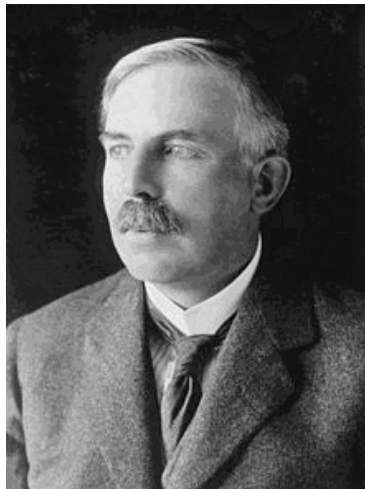
1897 מגלה אלקטרונים בקרני קטודה: חלקיקים במטען שלילי הקלים בהרבה מהאטומים

1898 מציע מודל עוגת הצימוקים לאטום Plum pudding model

1899 מבין שהחלקיקים בקרינה הקטודית הם תוצרי פיצול האטום

Max Planck

1900 חוק פלנק לקרינת גוף שחור – התחלת מכאניקת הקוונטים



Ernest Rutherford 1871-1937 (New Zealand-England)

1899 מגלה שהקרינה מרדיום מכילה חלקיק הנעצר בכמה ס"מ של אויר – "קרני אלפה"

הקרינה מאורניום מכילה חלקיקים חדירים בהרבה – "קרני בטא".
נובל בכימיה – 1908

Hendrik Antoon Lorentz 1853 –1928 Dutch

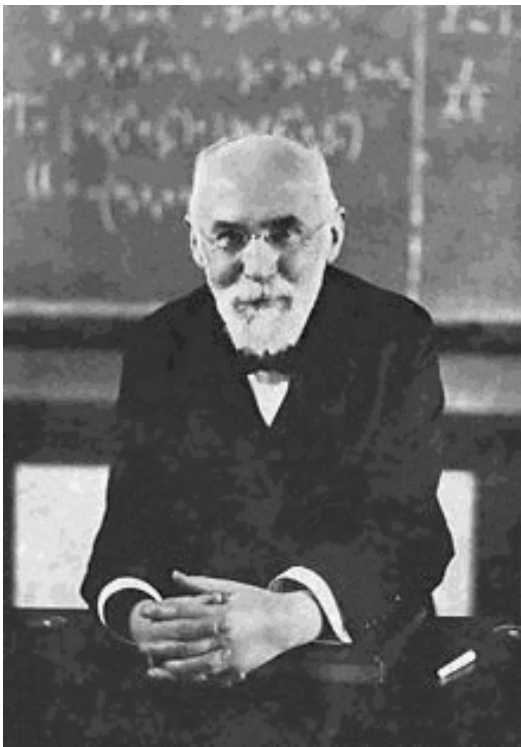
1892 מציע תיאוריה שחלקיקים טעונים מכילים עודף תת חלקיקים טעונים חיובית או שלילית, זרם חשמלי הוא זרימת חלקיקים טעונים היוצרים שדות אלקטרומגנטיים המוגדרים בכל נקודה ע"י שני וקטורים: חשמלי ומגנטי. הוא גם קיבל את "מקדם הסחיפה" של אור לפי פרנל Fresnel שנובע מהתאבכות אור.

1892 מציע הסבר לנסיון מייקלסון-מורלי: התכווצות גוף נע.

1899 מטפל מתמטית בהיפוטיזה שלו על התכווצות אלקטרונים הנעים במהירות. הטרנספורמציה למרחב-זמן זהה לזו שהציע ב-1904 ושבּה השתמש איינשטיין ביחסיות הפרטית.

1 נובל (עם זימן) על ההסבר התיאורטי לאפקט זימן - השפעה מגנטית על אנרגית קוי הפליטה מאלקטרונים באטומים.

1918-26 לאחר מכה"ע הראשונה, היה מעורב בועדות חברתיות, ופתר באופן נומרי את השפעת הגאות והשפל על הסכרים בים ואדן - החוף האטלנטי של הולנד גרמניה ודנמרק.



Jules Henri Poincaré 1854 –1912

1892 מפרסם את הכרך הראשון משלושה על מכאניקה שמימית. בעית גופים רבים. מראה שלא ניתן לעשות אינטגרציה למשוואות הדיפרנציאליות – ולכן אינן צפויות (כאוטיות). הסיבה – תהודה בין דרגות חופש (כמו אוסילטור הרמוני).
הראה שמשוואות מכסוול אינואריאנטיות לטרנספורמצית לורנץ.

היה מחלוצי הטופולוגיה. השערת פואנקרה: ניח שיריעה טופולוגית תלת-ממדית היא סגורה (כלומר קומפקטית וללא שפה), ופשוטת קשר. אזי היריעה הומיאומורפית לספירה התלת-ממדית. הוכחה רק ב-2006 ע"י גרגורי פרלמן הרוסי.



Pierre Curie 1859–1906

1880 פייר ואחיו ג'ק, מגלים אפקט פייזואלקטרי: גביש כקווארץ שנלחץ יוצר מתח חשמלי.
1881 האפקט ההפוך: הפעלת מתח על גביש מכווצת אותו

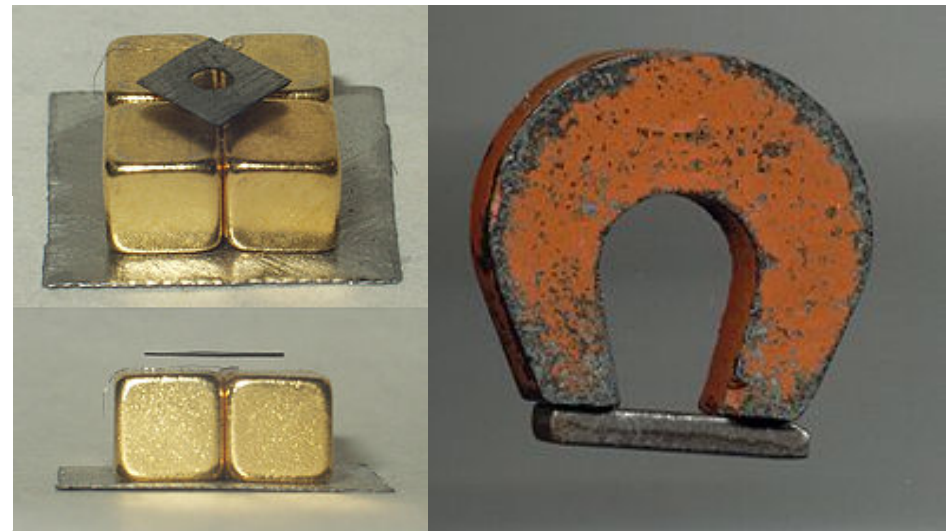
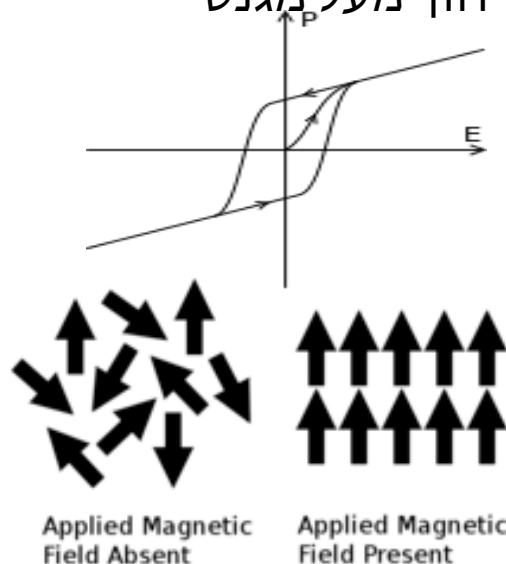
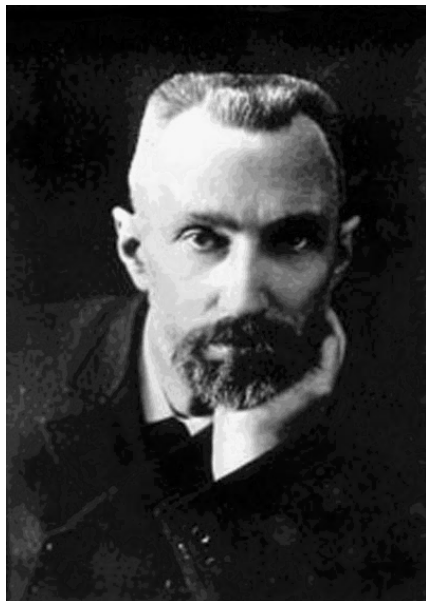
שימושים: קוורץ אלקטרומטר, מחט גרמופון, אוסילטור במחשב ובשעון קווארץ, שליטת מיקרו בתזוזה, למשל פוקוס מיקרוסקופ, אינטרפרומטרים, מראות אדפטיביות בטלסקופים.

1895 פייר מגלה שחמרים פרומגנטיים, (כמו מגנט ברזל) מאבדים בהדרגה את תכונותיהם המגנטיות בחימום, ואין מגנטיות מעל טמפרטורה קריטית: נקודת קיורי Curie point

חוק קיורי לפרהמגנטיות, לחמרים המתכוונים בשדה מגנטי, אך מאבדים את המגנטיות כשהשדה החיצוני מתאפס, מראה שאין תלות כזו בטמפרטורה לדיאמגנטיות – חמרים שבהשפעת שדה מגנטי מתמגנטים הפוך לשדה החיצוני. 1895 מגלה שהשראת מגנטיות יחסית לעצמת השדה המגנטי.

$$M = C \cdot \frac{B}{T},$$

מגנט מחומר פרומגנטי דיאמגנטיות גורמת לריחוף מעל מגנט



Pierre Curie 1859 –1906 and Marie Sklodowska-Curie

1895 פייר נושא לאישה את עובדת המעבדה שלו, מרי - יהודיה מהגרת מפולין.
מרי חוקרת קרינת אורניום, ומגלה כי היא גורמת לאויר דרכו היא עוברת להיות מוליך
1898 מגלים ומבודדים רדיום ופולוניום בעפרות torberntie & ptichblende שהראו קרינה
גבוהה פי כמה מאורניום.

קרינה היא תכונה אטומית לה קראה מרי "רדיואקטיביות"

1903 פרס נובל לבקרל עם מרי ופייר קורי

1906 פייר קיורי מת מתאונת פגיעה ממרכבה.

1911 למרי פרשת אהבים עם פול לנג'בן שהיה צעיר ממנה נשוי וסטודנט של פייר.

1911 מרי מקבלת פרס נובל שני לכימיה על בידוד רדיום ופולוניום.

מחה"ע הראשונה - מרי מקימה יחידות רדיולוגיה (x-ray) לחיילים.

1921 סיור שלה בארה"ב יצר היסטוריה של אהדה לרדיום כחומר מרפה פילאי

1934 מרי קיורי מתה מלאוקמיה שהושרתה

מעודף הקרינה שקיבלה. האשה הראשונה

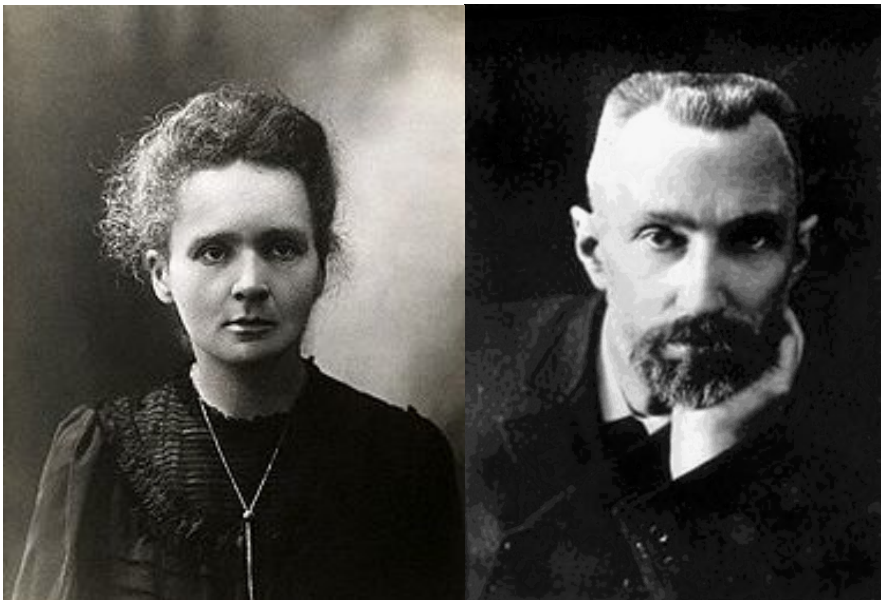
שנקברה בפנטיאון עם גדולי האומה הצרפתית.

על שמם יחידת קרינה רדיואקטיבית -

3.7×10^{10} decays per second

8.9×10^{-16} Moles/sec

2.8×10^{-6} Moles/year



Stokes

1898 סטוקס מציע שקרני רנטגן הם פולסים של קרינה הנפלטת כשאלקטרונים פוגעים בקטודה.

J.J. Thomson

1898 טומסון מראה כי גאז ניאון יוצר שני סוגי יונים השונים במטען או מסה או שניהם. מעלה את רעיון האיזוטופים: שני אטומים במסה שונה אך אותו מספר אטומי.

Planck

1898 פלנק, כנראה בתגובה לביקורת של בולצמן, אימץ את התורה הקינטית של הגאזים, ומבטל אפשרות של תהליכי קרינה בלתי הפיכים.

Wien

1898 וין מגלה בזרימת יוני גאז חלקיק טעון שמסתו זהה למימן. קורא לו "פרוטון".

Poincaré

1 פואנקרה מניח שמהירות האור מגבילה מהירות חלקיקים, והיא קבועה – רעיון היחסיות בלי המתמטיקה.

Michaelson

1890 מייקלסון מתאר ייתרונות האינטרפרומטר במדידת זווית ראייה ובהירות מקורות שגדלם מתחת לרזולוציה של הטלסקופ.

Joseph John (J.J.) Thomson

1897 טומסון משתמש בשפופרת קרורס להוכיח שקרני קטודה מכילים זרם חלקיקים טעונים שלילית – אלקטרונים. בגודל תת-אטומי, ומאמין שהם מצויים בכל חומר. מציע מודל "עוגת השזיפים" לאטום: אלקטרונים מפוזרים בעוגה חיובית.

Boltzmann

1897 בתגובה לאי הופכיות של הזמן לפי Ernst Zermelo תיאר את היקום בשוי משקל טרמי – ז"א מת, מלבד אזורים קטנים (כמו הגלקסיה שלנו) שבזמן מסויים יוצאים משוי משקל טרמי ומאפשרים חיים.

Jacobus Cornelius Kapteyn

1897 במדידות תנועות כוכבים מצא "זרימת כוכבים" אל וממרכז הגלקסיה.

Hertz

1894 מהצלחת משוואות מכסוול האמין בחשיבות תיאוריה מתמטית כדי לארגן מבנה לוגי למציאות הפיזיקאלית, ולנבא תוצאות נסיוניות. הוא מסתמך על המכאניקה של ניוטון, לגראנג' והמילטון, אך זו כנראה הפעם האחרונה שאלה הוכרו כתורות נכונות.

Michaelson

1893 מייקלסון קובע יחידת אורך של מטר תיקנית מקו פליטה אדום של קדמיום.

Boltzmann

1896 מפתח את התורה הקינטית של הגזים, הנותנת ערכים נכונים אם ממצעים על הרבה מערכות: הנחה ארגודית.

Pieter Zeeman

1896 מגלה כי קוים ספקטראלים בפליטת אטומים מתפצלים בשדה מגנטי: אפקט זימן. הוסבר ע"י לורנץ בתורת האלקטרון שלו.

Wilhelm Conrad Röntgen

1895 מגלה קרינה חדירה ביותר הנפלטת משפופרת קרוקס – קרני x

Lorentz

1895 לורנץ משתמש ב"יונים" במקום חלקיקים טעונים. מנסח משוואה המקשרת שדה חשמלי לחלקיקים.

Élie Joseph Cartan

1894 מציג אפשרויות של חבורות לי ומכנה אותם $U(1)$ יוניטארי חד ממדי, $SU(2)$ מטריצה דו ממדית מיוחדת וכו'.

אטום

J. J. Thomson

1894 מוצא שמהירות קרני קטודה נמוכה בהרבה ממהירות האור

Philip Lenard

1894 לנארד חוקר את חדירות קרני קטודה בחמר

Lorentz

1895 בחיפוש תיאוריה חשמלית ואופטית לגופים נעים מציג את התמרת
(טרנספורמצית) לורנץ בקירוב ראשון ב- v/c . למשתנה הזמן המותמר הוא קורא "זמן
מקומי"

Wilhelm Conrad Roentgen

1895 רנטגן מגלה קרינת x הנפלטת מהאטת חלקיקים טעונים bremsstrahlung
מקרינת קטודה, החודרת דרך הגוף (צילום עצמות היד). השם – אי הידיעה על הקרינה

William Ramsay

1895 מגלה הליום מאנליזה ספקטרוסקופית של גאז הנוצר בהתפרקות אורניום

William Ramsay and Morris Travers

1898 מגלים ניאון, קריפטון, קסנון וחלקיקים טעונים שלילית – חלקיקי בטה

אטום

Arthur Shuster, Emil Wiechert, and George Stokes

1896 מציעים שקרני x הם גלי אתר באורך גל קצר

J. J. Thomson

1896 טומסון מגלה שתחת קרינת x מבודדים הופכים מוליכים

1897 טומסון מגלה את האלקטרון: קרינת קטודה מכילה חלקיקים טעונים קטנים

מאטומים. וייכרט Emil Wiechert הציע אותה הצעה באותה שנה).

פיצג'רלד Fitz Gerald מציע שמדובר באלקטרונים חפשיים.

טומסון מסיט את אלומת קרני הקטודה בשדות חשמליים ומגנטים ניצבים ומודד e/m יחס מסה למטען.

W. Wien

1897 וין יוצר קרני תעלה עם מטען חיובי (השם ע"י גולדשטיין E. Goldstein) ומודד

יחס q/m נמוך בהרבה מקרני קטודה.

הוא פיתח את מדידת הסטייה של חלקיק טעון הנע בשדה חשמלי ומגנטי אנכיים זה

לזה היחסית ליחס המטען למסה: הבסיס לספקטרוסקופית מסות.

ספקטרוסקופית מסות

1886 גולדשטיין גילה חלקיקים שליליים (קרני תעלה) הנעים מהקטודה לאנודה
 1899 וין מצא שהחלקיקים מוסחים בשדה חשמלי האנכי למגנטי כשמידת ההסחה
 יחסית ליחס מטען למסה.
 1899 טומסון שיפר את הואקום ויצר את ספקטרוסקופ המסות.

הסבר: חוק לורנץ: $\mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

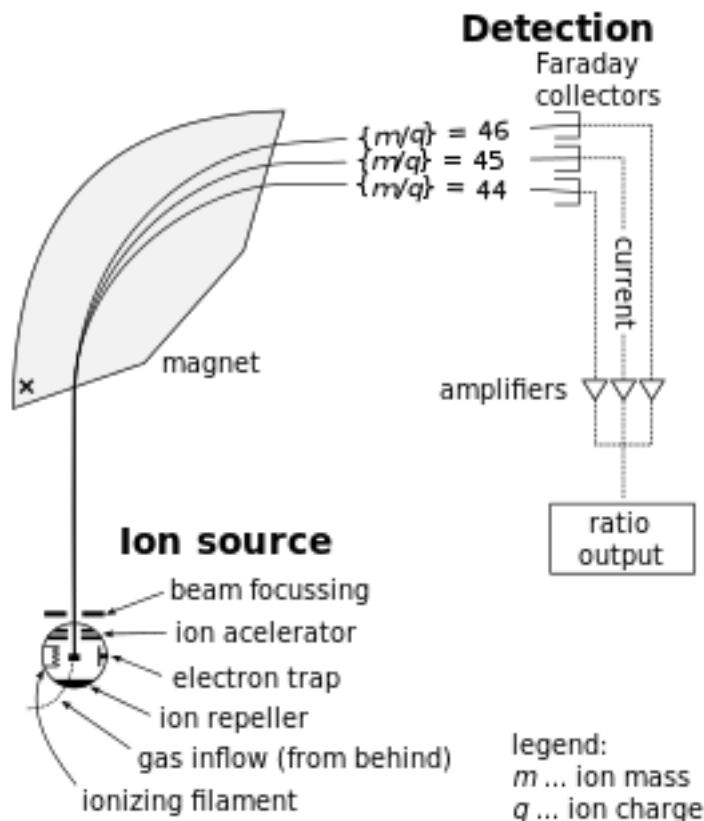
כוח השדה המגנטי יחסי למהירות ואנכי לה

חוק ניוטון $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$

ולכן: $(m/Q)\mathbf{a} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

הכוח אנכי למהירות והיא לכן קבועה וכך התאוצה
 (כמו כוח משיכת השמש האנכי לתנועת סיבוב הארץ
 בהזנחת האליפסה)

לכן באינטגרציה $m/Q \cdot D = v \cdot \text{const}$
 ההסחה D



איך מייצרים אלומה עם מהירות קבועה?

$$E = V/L \quad F = EQ = mA \Rightarrow A = VQ/mL$$

$$L = At^2/2 \Rightarrow t = \sqrt{2L/A} = \sqrt{2LmL/VQ}$$

$$v = At = VQ/mL \cdot \sqrt{2L^2m/VQ} = \sqrt{2VQ/m}$$

אטום

Henri Antoine Becquerel

1896 בקרל מגלה שמלחי אורניום העטופים בניר שחור עבה משחירים לוחות צילום

Pieter Zeeman

1896 זימן מגלה התפצלות קוי פליטה σ של נתון כשהלהבה בשדה מגנטי
לורנץ מציג תיאוריה אלקטרונית לפיצול זימן

אטום

Ernest Rutherford

1899 רטרפורד מגלה שהקרינה מאורניום מכילה שני סוגי חלקיקים: אלפה ובטה
1900 מבין שמקור הקרינה הרדיואקטיבית הוא דעיכת אטומים לחלקיהם.

Emile Hilaire Amagat

1899 אמגאט מפרסם נסיונות מקיפים בגאזים בלחצים גבוהים.

האטום

Robert Brown

1827 בראון מבחין בתנועה אקראית של אבקנים מומסים בנוזל – תנועה בראונית.

Julius Plücker

1858 מייצר קרני קטודה בשפופרת ואקום, שזוהרת

Hittorf

1869 קרני קטודה מטילות צל

אטום

Julius Plücker

1855 מעביר זרם דרך שפופרת ואקום ויוצר זריחה של אור.

David Alter

1855 מתארים את ספקטרום הפליטה ממימן וגאזים אחרים (ממנורות קשת)

George Gabriel Stokes

1852 מגלה פלואורוסצנציה – פליטת אור נראה ליד תמיסות החשופות לקרינת אולטרה-סגול מאור השמש

אטום

Robert Wilhelm Bunsen

1859 מגלה כי לכל אלמנט מערך קוי פליטה ספקטראלים אופייניים. ייסד ספקטרוסקופיה מכוכבים בעזרת לוחות צילום מסביר פעולת גייזרים

Gustav Robert Kirchhoff

בעקבות בונזן מצא קוי פראונהופר של בליעת נתרן באור השמש – המוסברת ע"י גאזים קרים במעטפת השמש. לראשונה הוכחה שהיסודות בכוכבים זהים לשלנו. 1860 מגלים צזיום ורובידיום.

Huggins

1866 ספקטרוסקופיה של ערפילית (נובה)

Giovanni Virginio Schiaparelli

1866 מציע שמטאורים הם שברי כוכבי שביט

Ångström

1868 מודד אורכי גל של קוים ספקטראליים ביחידת אורך שנקראתה על שמו – אנגסטרום.

סיכום – תת חלקיקים אטומיים

1896 בקרל Henri Becquerel מגלה קרינה מאורניום, מרי ופייר קיורי: רדיואקטיביות של טוריום, פולוניום ורדיום

1899 רדפורד Ernest Rutherford מבדיל בין קרינות אלפה ובטה (α "אח"כ β) על סמך חדירות ברדידי אלומיניום (β בטה עובר אלפה נבלע) ויוניזציה בגאז (אלפה מיינן חזק)

1900 וילארד Paul Villard מגלה עוד סוג קרינה הנפלטת מחמרים רדיואקטיביים – נקרא ע"י רדפורד גמה

1900 בקרל מודד לקרני בטה יחס מטען למסה זהה לאלקטרון לפי שיטת טומסון בשפופרת ריק מקרינת קטודה (β הסחה בשדה מגנטי לאחר תאוצה בשדה חשמלי). מסקנה – קרני בטה הם אלקטרונים

1901 רדפורד וסודי Frederick Soddy מראים שלאחר פליטת אלפה ובטה סוג האטום הפולט משתנה

1913 סודי, ובאפן בלתי תלוי פיאנס Kazimierz Fajans מראים שפליטת בטה מתמירה אטום לאטום שמימינו בטבלא המחזורית, בעוד פליטת אלפה מתמירה לאטום שני מקומות לשמאלו בטבלא

קוונטים

Johann Balmer

1885 מתאים משוואה מתמטית לאורכי הגל של קוי הפליטה של מימן

$$\lambda = \frac{hm^2}{m^2 - n^2}$$
$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Johannes Rydberg 1888 ניסוח דומה נתן רידברג

Walther Nernst

1918 הציע ריאקצית שרשרת (הצעתו לריאקציה כימית מומשה אח"כ בגרעינית)

יחסיות

Michelson and Edward W. Morley

1887 משתמשים בהתאבכות לבדוק אם מהירות האור תלויה בכוון תנועת אלומת האור. אינם מצליחים להראות תלות בכוון האור יחסית לתנועת הארץ, מה שאינו תואם לקיום אתר.

George Francis FitzGerald

1889 מציע שאת התוצאה השלילית של מייקלסון-מורלי ניתן להסביר ע"י התכווצות גופים במהירויות הקרובות למהירות האור, מאחר והכוחות בין המולקולות בגוף נשמעות לחוקי האלקטרומגנטיות.

Lorenz

1892 לורנץ מגיע למסקנה זהה על התכווצות גופים הנעים במהירות.

Henri Poincaré

1898 פואנקרה מזהיר כי בו-זמניות היא יחסית

יחסיות

Johann Georg von Soldner

1801 בהסתמכו על תורת ניוטון לאור כחלקיקים, מחשב את הסטיה הגרויטציונית של קרנים מכוכב ע"י השמש כ-0.84 שניות זווית. לפי היחסיות הכללית ההסחה כפולה – חציה כוח גרויטציה, וחציה "כיפוף" היקום.

Riemann

1859 רימן מרחיב גיאומטריה דיפרנציאלית של גאוס ל- n ממדים: הבסיס המתמטי ליחסיות.

Albert Abraham Michelson

1879 מודד מהירות האור כ-30.000 ק"מ לשניה

אוספים

Johann Wolfgang von Goethe 1749-1832

משורר רומנטי, שדווקא התגאה בספריו המדעיים – שלא השפיעו על מדענים בני זמנו...
נסיונות באופטיקה ובצבעים
שיטה מורפולוגית שונה מלינאוס, למיון צמחים ובעלי חיים

Alexander von Humboldt 1769 –1859

גיאוגרף ואספן דוגמאות גיאולוגיות וביולוגיות. יצא למסע 1799–1804 ביערות האמזונס
והאורינוקו, עם הצרפתי בופלנד **Aimé Bonpland**. יצא גם למסע גילויים ברוסיה. תמך
בנסיונות ולא בפילוסופיה תיאורטית...
הראשון להציע ששני צדדי האוקיאנוס האטלנטי נפרדו מיבשת אחת.
האוניברסיטה והקרן בברלין היא על שמו ושם אחיו, Wilhelm שהמשיך לעבוד ולהעשיר את
המשפחה במקום לטייל בעולם...
הוא הזמין את גאוס לברלין – וזה היתה הנסיעה היחידה של גאוס מחוץ לגוטינגן.

William Bartram 1739 1823

בוטניקאי אמריקאי הידוע בציורי הצמחים שלו בעקבות מסעות גילוי שערך באמריקה

Jules Verne

1865 ז'ול ורן מפרסם "מסע לירח" בעזרת טיל (מטול) הנשלח מפלורידה...
מספריו האחרים:

1864 מסע למרכז האדמה (כניסה ויציאה מהרי געש, בהשראת לייל)

1870 עשרים אלף מיל מתחת לים (בצוללת נאוטילוס בפיקוד קפיטן נמו, מעיין
איליאדה ואודיסיאה)

1873 מסביב לעולם ב-80 יום (פליאס פוג ועוזרו פספרטו שזכו בהתערבות כי הרוויחו
יום)



עקרונות במדע

Hans Christian Ørsted

1812 מגדיר את המושג "נסיון מחשבתי" – *GedankenExperiment*

C.S,Pierce & Joseph Jastrow

1885 מגדיר את המושג "נסיון עורר" blind experiment

Joseph Fourier

1822 מציג שימוש בממדים של כמויות פיזיקאליות

Whewell

1840 שימוש בשם "מדען" במקום "פילוסוף של הטבע"

Augustus de Morgan

1847 מפרסם ביבליוגרפיה מדעית לראשונה.

טכנולוגיה

Lewis Waterman

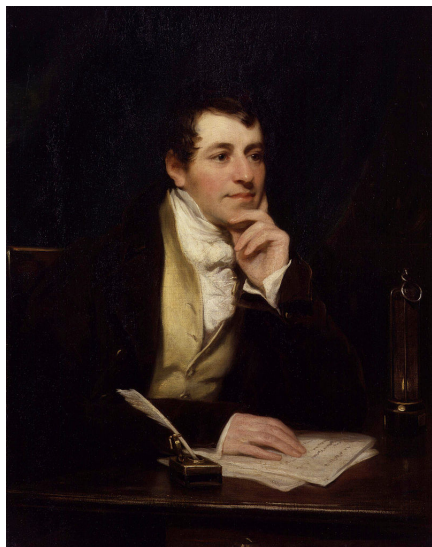
1884 עט נובע

1884 בכנס בינלאומי התקבל זמן גריניץ' **Greenwich Mean Time** המתאים לשיטת
מסקלין **Maskelyne** למדידת קו אורך ממיקום הירח: Method of Lunar Distances

Joseph-Marie Jacquard

1801 ממציא את נול הטוויה המתוכנן בכרטיסים מנוקבים

כימיה



Humphry Davy 1778-1829

1798 המפרי חוקר שאיפת גאזים, ונעשה מכור לגאז צחוק – NO.
רק אחרי עשרות שנים נפוץ השימוש להרדמה ברפואת שיניים.
1808 באמצעות אלקטרוליזה, מגלה סדרה של יסודות חדשים:
אשלגן, נתרן, מגנזיום, סידן, סטרונציום, בריום ואלומיניום
K (Potassium–) Na, Mg, Ca, St, Ba, Al .
1810 "מגלה" כלור, 36 שנים אחרי Scheele , והוכיח כי הוא יסוד כימי.
1815 בונה פנס בטחון למכרות, המונע יציאת הלהבה ע"י רשת ברזל.

דייבי הפך לדמות ציבורית בגלל הפופולריזציה של הכימיה.

מבין שתכונות כימיות תלויות בתרכובות וסידורן היחסי. הבין שפחם ויהלום הם אותו היסוד, שלא בכל החומצות חמצן, אך שמימן הוא חלק עיקרי בכל החומצות. לא כפי שסבר לבואזיה, חום נוצר בחיבור חמצן ליסוד אחר. הוא מגלה שעפרות הם תחמוצות מתכות,

הבין שקשר כימי קשור במשיכת מטענים חשמליים.

Joseph Louis Proust

1799 חוק היחסים הקבועים של אטומים בתרכובות, סטויכיומטריה, שמניע את התורה האטומית של דלטון.

John Dalton 1766-1844



$$p_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n p_i$$

1801-2 חוק הלחצים החלקיים בתערובת גזים:

1808 חוק היחסים השלמים בתרכובות בין גזים

התורה האטומית: 1. יסודות בנויים מאטומים

2. כל האטומים של אותו יסוד זהים בגודל ומסה

3. אטומים לא ניתנים לפירוק, יצירה או השמדה

4. אטומים של יסודות שונים מתרכבים למולקולות

ביחסים שלמים וקבועים לכל תרכובת

דלטון היה עורך צבעים, וגם אחיו, ולכן הסיק שזו תכונה מורשת.



Lorenzo Romano Amadeo Carlo Avogadro 1776-1856

1811 נפחים שווים של גזים שונים באותם תנאי לחץ וטמפרטורה

מכילים אותו מספר מולקולות.

מכאן משקל הגז יחסי למשקל האטומי: מכאן הגדרת "מול"

במול אחד מספר אבוגדרו של מולקולות:

מספר אבוגדרו = $6.02214179 \times 10^{23}$

Ritter, Nicholson and Carlisle

1800 מייצרים ממים חמצן ומימן באלקטרוליזה עם תא וולטה.

Wollaston

1803 מגלה פלדיום

1806, Jöns Jacob Berzelius

1806 מציין, בספר על כימיה של החי, ששרירים מכילים חומצת חלב
(נמצאה בחלב ע"י שיל Scheel)

Pierre Louis Dulong

1811 מגלה חנקן תלת כלורי, שמן נפיץ

Konstantin Sigizmundovich Kirchhof

1815 מדווח שגלוטן מחיטה מועבר לדקסטרין וסוכר

1822, Eilhard Mitscherlich

1822 מגלה גבישים זהים לחמרים שונים, "איזומורפים", ומסיק שהגביש תלוי במספר וסידור האטומים אך לא זהותם.



Justus von Liebig 1803-1873

מאבות הכימיה האורגאנית. עבד עם Friedrich Wöhler (מסנטז האוריאה) והיה חלוץ בהוראת כימיה ובעיצוב כלי המעבדה הכימית המודרנית. 1840 מוצא ששיעור גידול צמחים אינו נקבע ע"י חמרים עיקריים (מים, אויר אלא ע"י מרכיבים מזעריים הכרחיים, כגון מינרלים) בעיקר חנקות – "חוק הגורם המגביל" ומכאן תרם לדישון מלאכותי.



John Bennett Lawes 1814-1900

1837-8 החל בניסויי גידולים בעציצים, ועבר לחוה חקלאית, ב ה יישם דישון בסופרפוספאטים (פוספאט מטופל בחומצה גופריתית)



Osmond Fisher 1817-1914

1895 מבודד הליום He שספקטרום הבליעה שלו נמצא בקרינת השמש
ונקרא על שם אל השמש היווני – Helios



Claude-Louis Berthollet

יחד עם לבואזיה ואחרים – סימוני היסודות הכימיים
1785 מגלה כי קצב תגובה כימית יחסי לכמות החמרים המגיבים
ולחוזק יחסי הגומלין ביניהם. הבין קיום ריאקציה הפוכה
ומכאן שוי משקל בריאקציות כימיות



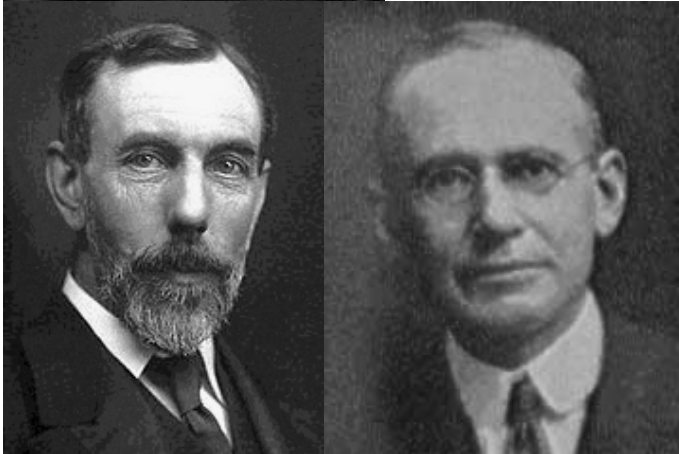
Jöns Jakob Berzelius 1779–1848

1808 מציע מערכת שמות ליסודות וקיצור של שתי אותיות המקובלת עד היום
כתיבת ריאקציה כימית מבטא את סוג ויחסי המרכיבים והתוצרים (איזון
משוואת הריאקציה) מספר האטומים – באינדקס תחתון (אח"כ משקל אטומי
של איזוטופים באינדקס עליון)
אינו מאמין בסידור תכונות של כימיקאליים, כגון לפי משקל מולקולארי,
1817 מגלה סלניום ובמעבדתו J. A. Arfwedson מגלה ליטיום
1828 מגלה תוריום במעבדתו N. G. Sefström מגלה וונדיום
1840 מציע את השם "אלוטרופיה" לקיום צורות שונות של אותו אלמנט



William Robert Grove 1811–1896

1842 מראה פירוק בחום של מולקולות למרכיביהן:
קיטור מתפרק לחמצן ומימן, המתרכבים שוב למים.
צפה את קיום חוק שימור אנרגיה

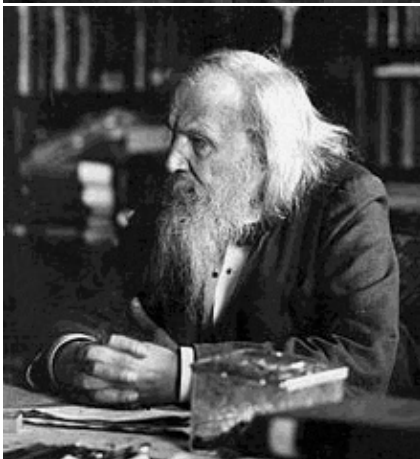


William Ramsay 1852-1916

&

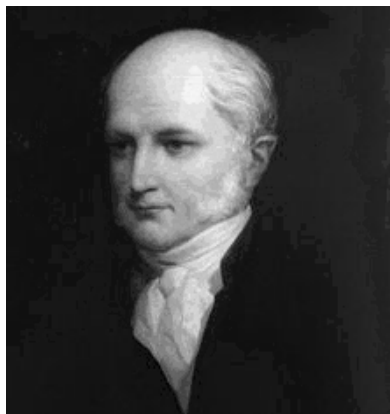
Morris William Travers 1872–1906

מנזלים אויר, קובעים טמפרטורות ניזול ומשתמשים לזיקוק
גאזים אצילים מאויר.
1898 מגלים את גאזים האצילים ניאון ואח"כ קסנון וקריפטון
(ארגון התגלה ע"י לורד ריילי) ומקומם בטבלא המחזורית
חקרו פליטת חלקיקי בטה הטעונים שלילית
נובל לרמסי-1904



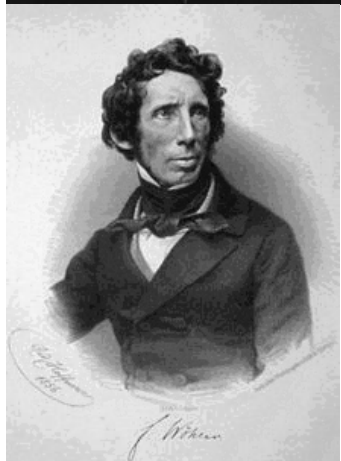
Dmitri Ivanovich Mendeleev 1834–1907

1871 בעיון מעמיק בטבלא המחזורית
מנבא קיום היסודות גאליום, סקאנדיום וגרמניום



William Prout 1785–1850

1815 משקל אטומי הוא מכפילה שלמה של משקל המימן –
מניח (בטעות) שכל האטומים הם צבירים של אטומי מימן



Friedrich Wöhler 1800–1882

1825 עם ליביג **Justus von Liebig** מגלים ומסבירים איזומרים
(השם לפי ברצליוס): סידור שונה של אותם אטומים במבנה המולקולה
1828 מסנטז אוראה – החמר האורגאני הראשון המסונטז מחמרים
אנאורגאניים – אמוניום ציאנט – ammonium cyanate ביטול תורת
"הויטליזם".
1832 מאפיינים קבוצות רדיקאלים בריאקציות.

Johann Wolfgang Döbereiner

1823 מגלה שסילון מימן המכוון לציפוי פלטינה שחורה גורם לה ראשית להאדים, אח"כ להלבין מחום, ואז להצית להבת מימן.
בונה מצית גאז (ללא ניצוץ) ומביא את ברצליוס לרעיון הקטליזה (הבין כי תסיסת סוכר גם היא תהליך קטליטי)
1829 בנסיון למיין את היסודות, מוצא שלישיות של יסודות שתכונות אחד מבטאות ממוצע של השניים האחרים.

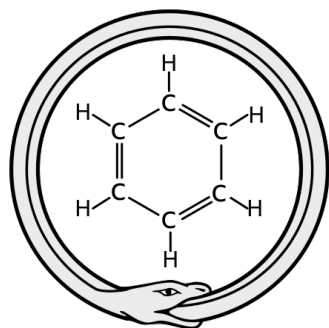
Michael Faraday

1825 מבודד בנזן - המולקולה הארומאטית הראשונה



Friedrich August Kekulé von Stradonitz 1829–1896

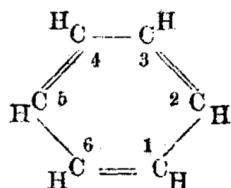
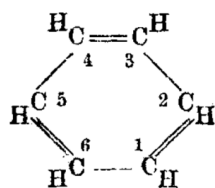
1865 קקולה מבין שבנזן מורכב מפחמנים ומימנים בטבעת הקסגונית
1857–8 ממייסדי הכימיה המיבנית. באופן בלתי תלוי Archibald Scott Couper
מצייר מבנה מולקולות כשקוים - מבטאים "יחידת זיקה" בהמשך - קשר כימי
בין אטומים. מתוך ידיעת הערכיות של אטומים (הפחמן הוא 4 ערכי) התפרצה
הכימיה האורגאנית במהירות. איך איששו את מבנה הבנזן?

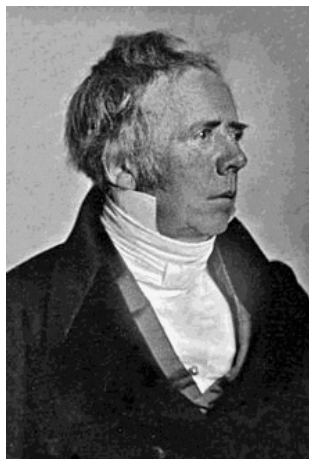


מצאורק איזומר אחד לתרכובות C_6H_5X בהן החליפו
מימן אחד. בהחלפת שני מימנים $C_6H_4(NH_2)(CH_3)$ מצאו
3 איזומרים, ההסבר: טבעת, לפי הסיפור חלם על נחשה
אוכל את זנבו)

עדין נשארה הבעיה של הקשר הכפול -
אותה פתר קקולה במודל שבו קשר כפול ובודד מתחלפים

מציע שאטומי פחמן יוצרים שרשרות





Hans Christian Ørsted 1777–1851

1825 בהמשך לדייבי שטען ש"אלום" הוא מלח מתכת לא ידועה,
ארסטד בודד אלומיניום בחימום המלח עם אמלגם אשלגן.

Graham

1833 חוקר תרכובות רב-בסיסיות פוספט, דו-פוספט ותלת-פוספט היכולות
לייצר כמה סוגי מלחים

Anselme Payen

1833 מבודד אנזים ראשון: דיאסטאז

William Morton

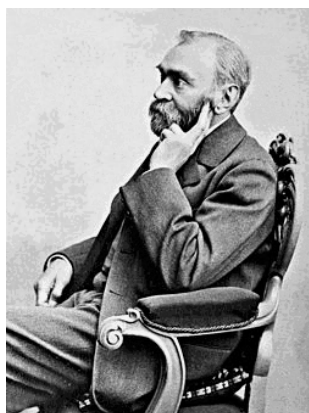
1846 גילוי אנסטאזיה

Ascani Sobrero

1846 מגלה ניטרוגליצרין

Alfred Nobel 1833–1896

1866 נובל רושם פטנט על דינמיט



Pierre Eugene Marcelin Berthelot

1860 מפרסם סינטזה של כמה תרכובות פחמן, ומעורר מחלוקות בעיקר
בגין ברצלוס שעדין החזיק ב"ויטליזם"

Germain Hess

1840 חוק הס - ורסיה מוקדמת לחוק שימור האנרגיה - שינוי אנרגיה בריאקציה כימית תלוי רק במצב י התחלה וסוף, ולא במסלול ביניהם

Christian Friedrich Schönbein

1840 מבודד אוזון (השם - מריח מיונית)

Louis Pasteur

מגלה כי חומצה טרטריה מכילה תערובת של לבו ודקסטרו- . לידת הסטיריאוכימיה

Benjamin Silliman, Jr.

1855 פיתוח שיטה חלוצית לביקוע נפט, לידת התעשיות הפטרוכימיות

Friedlieb Ferdinand Runge

החל מ-1931 מזיקוק זפת פחם מבודד carbolic acid, leucol, pyrol, and cyanol.
מ-1934 cyanol מיצר אנילין-שחור ורושם פטנט ב-1934

William Henry Perkin

1855 מסנטז צבע סגול סינטטי ראשון, mauveine תוצר "נפל" בנסיון לקבל כינין מזפת פחם.
1857 לידת תעשית הצבעים בייצור mauveine

Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer

1865 החל בעבודה על צבעי אינדיגו, אבן דרך בכימיה אורגאנית ובתעשיית צבעים. תרכובות
הידרו-ארומאטיות. נובל-1905

Runge

1850 מפתח הפרדה כרומטוגרפית עקב סיפוח לנייר

Merck חברת

1859 מבודדת קוקאין ומוציאה פטנט

Adolf Wilhelm Hermann Kolbe

1845 מסנטז חומצה אצטית

1859 מסנטז חומצה סליצילית salicylic acid

Gustav Kirchhoff and Robert Bunsen

1859–90 מציבים את יסודות הספקטרוסקופיה לאנליזה כימית – גילוי צזיום ורובידיום. אחרים גילו בשיטות ספקטרוסקופיות אינדיום, טאליום והליום (בספקטרום קוי הבליעה בשמש)

Anders Jonas Ångström

1861 מאשר קיום הליום בשמש מספקטרוסקופיה

Stanislao Cannizzaro

1860 משתמש בעקרון אבוגדרו ועורך טבלת יסודות לפי משקל אטומי, ככפולות מימן (מבין שגאז מימן מכיל מולקולה עם שני מימנים) המובילה לטבלא המחזורית של מנדלייב. טבע את השם "הידרוקסיל" ל-OH

Johann Josef Loschmidt

1865 קובע את מספר המולקולות במול (מספר אבוגדרו) **איך?** הוא משתמש בתורה הקינטית של הגאזים הנותנת את הדרך החפשית הממוצעת, ℓ בין התנגשויות כתלות בקטר מולקולות הגאז ומספרן. הוא העריך את ℓ וקיבל את n_0

Alexander Parkes

1862 מציג בתערוכה בלונדון פרקסין – פולימר סינטטי. לידת תעשית הפלסטיק

$L-lLllll$

Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois John Newlands & William Odling

1862 מודלים מוקדמים של הטבלא המחזורית – the telluric helix, "חוק האוקטאבות (שמיניות)", 57 יסודות (כולל מרווחים לא ידועים)

John Alexander Reina Newlands

1864 טבלת יסודות דו ממדית ראשונה לפי משקל וחוק האוקטאבות

1864 Julius Lothar Meyer

1864 סידור היסודות לפי ערכיות. היכולת ליצור תרכובות תלויה במשקל האטומי באופן מחזורי

Dmitri Ivanovich Mendeléev and Julius Lothar Meyer

1869 באופן בלתי תלוי שניהם בונים את הטבלא המחזורית של היסודות הכימיים.
מאייר מראה שחוק השמיניות של ניולנד Newlands' Law of octaves נכון רק בשני המחזורים הראשונים. כן צייר את הנפח האטומי מול המשקל האטומי

Dmitri Mendeleev

1869 מפרסם את הטבלא המחזורית של 66 היסודות הכימיים הידועים, בשורות לפי המשקל האטומי, כך שהעמודות סימנו אטומים עם תכונות דומות, והשאיר פערים ריקים ומנבא את תכונות היסודות החסרים, במקומות שאח"כ נמצאו אטומים ואוששו את סדר הטבלא.

.

הטבלת המחזורית של היסודות

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb				
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No				

Jacobus Henricus van 't Hoff

1873 קינטיקה של ריאקציות כימיות. נובל-1901

Jacobus Henricus van 't Hoff and Joseph Achille Le Bel

1873 עבדו באופן בלתי תלוי על פיתוח מודל תלת ממדי של קשרים כימיים, המסביר פעילות אופטית שמצא פסטר

$$\ln \left(\frac{K_2}{K_1} \right) = \frac{-\Delta H^\ominus}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

משוואת ון-הוף מקשרת את קבוע

ריאקציה כימית לאנרגית האקטיבציה

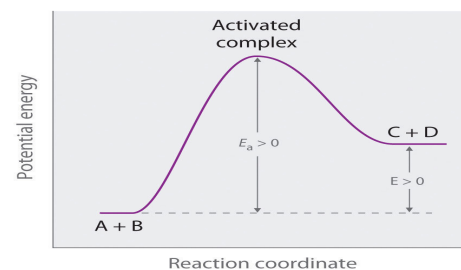
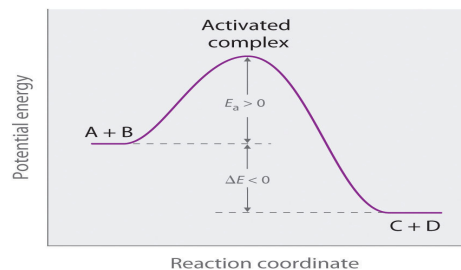
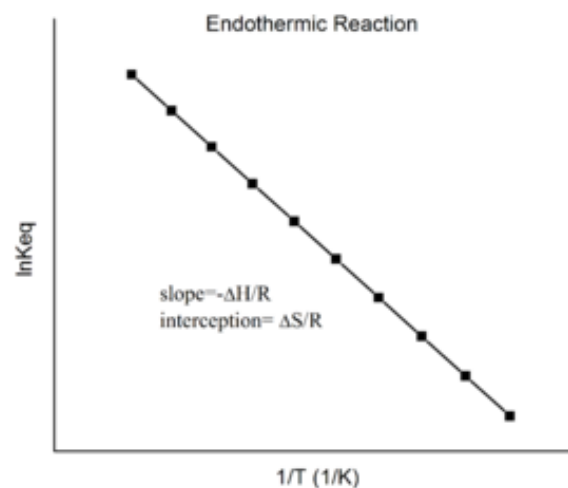
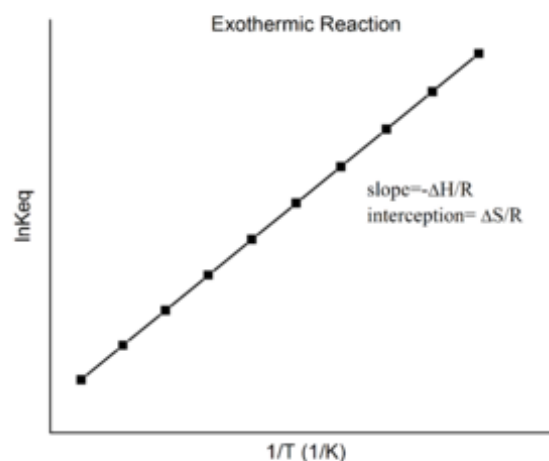
ולטמפרטורה. השיפוע תלוי אם הריאקציה

אקסותרמית או אנדותרמית

1884 שוי משקל כימי

ואוסמוטי לתמיסות

מוליכות



Alfred Werner

1893 מגלה מבנה אוקטאדראלי של תרכובות קובאלט – מבנה מרחבי למולקולות

Henri Moissan

חקר ובודד פלואור. המציא תנור חשמלי הנקרא על שמו. נובל-1906

Eduard Buchner

תסיסה ללא תאים חיים. cell-free fermentation. נובל-1907

Robert Wilhelm Bunsen and Gustav Robert Kirchhoff

1860 מגלים צזיום ורובידיום, ומסבירים את קוי הבליעה בספקטרום השמש של פראונהופר בונזן מסביר פעולת גייזרים, וממציא מבער בונזן וצידוד מעבדה אחר.
קירחוף מנסח שני חוקי קירחוף למעגלים חשמליים: סכום המתחים בלולאה = 0, וסכום הזרמים בצומת = 0

J. de Rey-Pailhade

1888 מגלה את הפילוטיון (גלוטטיון) – מולקולה קטנה ממקור חי עם פונקציות היחזור כה רבות שנקשרה ל"מהות החיים". למשל הפיכת גפרית למימן גפריתי H_2S [ומכאן השם: גפרית-thio משיכה (אפיניות)-philos].

James Dewar

1898 מנזל מימן

Gottlieb Daimler

1883 רושם פטנט למנוע בעירה פנימית

John Hyatt

1869 מייצר צלולויד – הפלסטיק הסינטטי הראשון שיצא לשימוש נרחב

Hilaire de Chardonnet

1884 ממציא את הבד המלאכותי הראשון העשוי מצלולוז ונקרא ריון rayon

Hermann Emil Fischer

מציע מבנה של פורינים, ומסנטז ב-1898. חוקר כימיה של סוכרים. נובל 1902

Thomas Chrowder Chamberlain

1899 מתעניין בהתנהגות חמרים בתנאים קיצוניים, כמו בתוך השמש, ומניח שיכולים לקבל אנרגיות גדולות בהרבה מתנאים נורמאליים, שיסבירו איך הגיאולוגיה מצביעה על גיל כדור הארץ הגדול בהרבה מגיל השמש לפי הערכת גיל "דעיכת" האנרגיה שבה. רק אחרי גילויי תורת היחסיות הוסברה יצירת אנרגית ההיתוך בשמש

מדלית דייוו בכימיה

המוענק ע"י
האקדמיה המלכותית למדעים,
לונדון

1877 **Robert Wilhelm Bunsen and Gustav Robert Kirchhoff** "For their researches & discoveries in spectrum analysis"

1878 **Louis Paul Cailletet and Raoul Pictet** "For their researches, conducted independently, but contemporaneously, on the condensation of the so-called permanent gases"

1879 **Paul Emile Lecoq de Boisbaudran** "For his discovery of gallium"

1880 **Charles Friedel** "For his researches on the organic compounds of silicon, and other investigations"

1881 **Adolf von Baeyer** "For his synthesis of indigo"

1882 **Dmitri Mendeleev and Lothar Meyer** "For their discovery of the periodic relations of the atomic weights"

1883 **Marcellin Berthelot and Julius Thomsen** "For their researches in thermo-chemistry"

1884 **Adolph Wilhelm Hermann Kolbe** "For his researches in the isomerism of alcohols"

1885 **Jean Servais Stas** "For his researches on the atomic weights"

1886 **Jean Charles Galissard de Marignac** "For his researches on atomic weights"

- 1887 **John Alexander Reina Newlands** "For his discovery of the periodic law of the chemical elements"
- 1888 **Sir William Crookes** "For his investigations on the behaviour of substances under the influences of the electric discharge in a high vacuum"
- 1889 **Sir William Henry Perkin** "For his researches on magnetic rotation in relation to chemical constitution"
- 1890 **Emil Fischer** "For his discoveries in organic chemistry and especially for his researches on the carbo-hydrates"
- 1891 **Victor Meyer** "For his researches on the determination of vapour densities at high temperatures"
- 1892 **Francois Marie Raoult** "For his researches on the freezing points of solutions, and on the vapour pressures of solutions"
- 1893 **Jacobus Henricus van 't Hoff and Joseph Le Bel** "In recognition of their introduction of the theory of asymmetric carbon, and its use in explaining the constitution of optically active carbon compounds"
- 1894 **Per Theodor Cleve** "For his researches on the chemistry of the rare earths"

1895 **Sir William Ramsay** "For his share in the discovery of argon, and for his discoveries regarding gaseous constituents of terrestrial minerals"

1896 **Henri Moissan** "For the isolation of fluorine, and the use of the electric furnace in the preparation of refractory metals and their compounds"

1897 **John Hall Gladstone** "For his numerous contributions to chemical science, and especially for his important work in the application of optical methods to chemistry"

1898 **Johannes Wislicenus** "For his contributions to organic chemistry especially in the domain of stereochemical isomerism"

1899 **Edward Schunck** "For his researches on madder, indigo, and chlorophyll"

נספח:
זוכי מדליית קופליי
של האקדמיה המלכותית הבריטית

Copley Medal 19-th century

- 1800 **Edward Charles Howard** "For his Paper on a New Fulminating Mercury"
- 1801 **Astley Cooper** "For his Papers – on the effects which take place from the destruction of the Membrana Tympani of the Ear; with an account of an operation for the removal of a particular species of Deafness"
- 1802 **William Hyde Wollaston** "For his various Papers printed in the Philosophical Transactions"
- 1803 **Richard Chenevix** "For his various Chemical Papers printed in the Philosophical Transactions"
- 1804 **Smithson Tennant** "For his various Chemical Discoveries communicated to the Society, and printed in several volumes of the Philosophical Transactions"
- 1805 **Humphry Davy** "For his various Communications published in the Philosophical Transactions"
- 1806 **Thomas Andrew Knight** "For his various Papers on Vegetation, printed in the Philosophical Transactions"
- 1807 **Everard Home** "For his various Papers on Anatomy and Physiology, printed in the Philosophical Transactions" —
- 1808 **William Henry** "For his various papers communicated to the society, and printed in the Philosophical Transactions" —
- 1809 **Edward Troughton** "For the Account of his Method of dividing Astronomical Instruments, printed in the last volume of the Philosophical Transactions"

- 1811 **Benjamin Collins Brodie** "For his Papers printed in the Philosophical Transactions. On the influence of the Brain on the action of the Heart, and the generation of Animal Heat; and on the different modes in which death is brought on by certain Vegetable Poisons"
- 1813 **William Thomas Brande** "For his Communications concerning the Alcohol contained in Fermented Liquors and other Papers, printed in the Philosophical Transactions"
- 1814 **James Ivory** "For his various Mathematical Contributions printed in the Philosophical Transactions"
- 1815 **David Brewster** "For his Paper on the Polarization of Light by Reflection from Transparent Bodies"
- 1817 **Henry Kater** "For his Experiments on the Pendulum"
- 1818 **Robert Seppings** "For his Papers on the construction of Ships of War, printed in the Philosophical Transactions"
- 1820 **Hans Christian Ørsted** "For his Electro-magnetic Discoveries"
- 1821 **Edward Sabine** "For his various Communications to the Royal Society relating to his researches made in the late Expedition to the Arctic Regions."
- John Herschel** "For his Papers printed in the Philosophical Transactions."
- 1822 **William Buckland** "For his Paper on the Fossil Teeth and Bones discovered in a Cave at Kirkdale"

- 1823 **John Pond** "For his various Communications to the Royal Society"
- 1824 **John Brinkley** "For his various Communications to the Royal Society"
- 1825 **François Arago** "For the Discovery of the Magnetic Properties of substances not containing Iron. "For the Discovery of the power of various bodies, principally metallic, to receive magnetic impressions, in the same, though in a more evanescent manner than malleable Iron, and in an infinitely less intense degree."
- Peter Barlow** "For his various Communications on the subject of Magnetism."
- 1826 **James South** "For his observations of Double Stars, and his Paper on the Discordances between the Suns observed and computed Right Ascensions, published in the Transactions of the Society. For his Paper of Observations of the Apparent Distances and Positions of Four Hundred and Fifty-eight Double and Triple Stars, published in the present volume (1826, Part 1.) of the Transactions"
- 1827 **William Prout** "For his Paper entitled, On the ultimate Composition of simple alimentary substances, with some preliminary remarks on the analysis of organized bodies in general."
- Henry Foster** "For his magnetic and other observations made during the Arctic expedition to Port Bowen."

1831 **George Biddell Airy** "For his Papers, On the principle of the construction of the Achromatic Eye-pieces of Telescopes, – On the Spherical Aberration of the Eye-pieces of Telescopes, and for other Papers on Optical Subjects in the Transactions of the Cambridge Philosophical Society"

1832 **Michael Faraday** "For his discovery of Magneto-Electricity as detailed in his Experimental Researches in Electricity, published in the Philosophical Transactions for the present year."

Siméon Denis Poisson "For his work entitled, Nouvelle Theorie de l'Action Capillaire."

1834 **Giovanni Antonio Amedeo Plana** "For his work entitled, Theorie du Mouvement de la Lune"

1835 **William Snow Harris** "For his experimental investigations of the force of electricity of high intensity contained in the Philosophical Transactions of 1834"

1836 **Jacob Berzelius** "For his systematic application of the doctrine of definite proportions to the analysis of mineral bodies, as contained in his Nouveau Systeme de Mineralogie, and in other of his works."

Francis Kiernan "For his discoveries relating to the structure of the liver, as detailed in his paper communicated to the Royal Society, and published in the Philosophical Transactions for 1833."

1837 **Antoine César Becquerel** "For his various memoirs on the subject of electricity, published in the Memoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, and particularly for those on the production of crystals of metallic sulphurets and of sulphur, by the long-continued action of electricity of very low tension, and published in the tenth volume of those Memoires."

John Frederic Daniell "For his two papers on voltaic combinations published in the Philosophical Transactions for 1836."

1838 **Carl Friedrich Gauss** "For his inventions and mathematical researches in magnetism."

Michael Faraday "For his researches in specific electrical induction."

1839 **Robert Brown** "For his discoveries during a series of years, on the subject of vegetable impregnation"

1840 **Justus von Liebig** "For his discoveries in organic chemistry, and particularly for his development of the composition and theory of organic radicals."

Jacques Charles François Sturm "For his "Memoire sur la Resolution des Equations Numeriques," published in the Memoires des Savans Etrangers for 1835."

1841 **Georg Ohm** "For his researches into the laws of electric currents contained in various memoirs published in Schweiggers Journal, Poggendorffs Annalen and in a separate work entitled Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet" [74]

1842 **James MacCullagh** "For his researches connected with the wave theory of light, contained in the Transactions of the Royal Irish Academy"

- 1843 **Jean-Baptiste Dumas** "For his late valuable researches in organic chemistry, particularly those contained in a series of memoirs on chemical types and the doctrine of substitution, and also for his elaborate investigations of the atomic weights of carbon, oxygen, hydrogen, nitrogen and other elements"
- 1844 **Carlo Matteucci** "For his various researches in animal electricity" [76]
- 1845 **Theodor Schwann** "For his physiological researches on the development of animal & vegetable textures, published in his work entitled Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur u. dem Wachsthum der Thiere u. Bflanzen"
- 1846 **Urbain Le Verrier** "For his investigations relative to the disturbances of Uranus by which he proved the existence and predicted the place of the new Planet; the Council considering such prediction confirmed as it was by the immediate discovery of the Planet to be one of the proudest triumphs of modern analysis applied to the Newtonian Theory of Gravitation"
- 1847****John Herschel** "For his work entitled Results of Astronomical Observations made during the years 1834, 1835, 1836, 1837 and 1838, at the Cape of Good Hope; being a completion of a telescopic survey of the whole surface of the visible heavens, commenced in 1825"

- 1848 **John Couch Adams** "For his investigations relative to the disturbances of Uranus, and for his application of the inverse problem of perturbations thereto"
- 1849 **Roderick Murchison** "For the eminent services he has rendered to geological science during many years of active observation in several parts of Europe; and especially for the establishment of that classification of the older Palaeozoic deposits designated the Silurian System, as set forth in the two works entitled The Silurian System founded on Geological Researches in England, and The Geology of Russia in Europe and the Ural Mountains"
- 1850 **Peter Andreas Hansen** "For his researches in physical astronomy"
- 1851 **Richard Owen** "On account of his important discoveries in comparative anatomy & palaeontology, contained in the Philosophical Transactions and numerous other works"
- 1852 **Alexander von Humboldt** "For his eminent services in terrestrial physics, during a series of years"
- 1853 **Heinrich Wilhelm Dove** "For his work on the distribution of heat over the surface of the Earth"
- 1854 **Johannes Peter Müller** "For his important contributions to different branches of physiology and comparative anatomy, and particularly for his researches on the embryology of the Echinodermata, contained in a series of memoirs published in the Transactions of the Royal Academy of Sciences of Berlin"

- 1855 **Léon Foucault** "For his various researches in experimental physics" [52]
- 1856 **Henri Milne-Edwards** "For his researches in comparative anatomy and zoology"
- 1857 **Michel Eugène Chevreul** "For his researches in organic chemistry, particularly on the composition of the fats, and for his researches on the contrast of colours"
- 1858 **Charles Lyell** "For his various researches and writings by which he has contributed to the advance of geology"
- 1859 **Wilhelm Eduard Weber** "For the investigations contained in his Maasbestimmungen and other researches in electricity, magnetism, acoustics"
- 1860 **Robert Bunsen** "For his researches on cacodyls, gaseous analysis, the Voltaire phenomena of Iceland; and other researches"
- 1861 **Louis Agassiz** "For his eminent researches in palaeontology and other branches of science, and particularly for his great works the Poissons Fossiles, and his Poissons du Vieux Gres Rouge d'Ecosse"
- 1862 **Thomas Graham** "For three memoirs of the diffusion of liquids, published in the Philosophical Transactions for 1850 and 1851; for a memoir on osmotic force in the Philosophical Transactions for 1854; and particularly for a paper on liquid diffusion applied to analysis, including a distinction of compounds into colloids & crystalloids published in the Philosophical Transactions for 1861"

- 1863 **Adam Sedgwick** "For his original observations and discoveries in the geology of the Palaeozoic Series of rocks, and more especially for his determination of the characters of the Devonian System, by observations of the order of superposition of the Killas rocks & their fossils in Devonshire"
- 1864 **Charles Darwin** "For his important researches in geology, zoology, and botanical physiology"
- 1865 **Michel Chasles** "For his historical and original researches in pure geometry"
- 1866 **Julius Plücker** "For his researches in analytical geometry, magnetism, & spectral analysis"
- 1867 **Karl Ernst von Baer** "For his discoveries in embryology and comparative anatomy, and for his contributions to the philosophy of zoology"
- 1868 **Charles Wheatstone** "For his researches in acoustics, optics, electricity and magnetism"
- 1869 **Henri Victor Regnault** "For the second volume of his Relation des Experiences pour determiner les lois et les donnees physiques necessaries au calcul des machines a feu, including his elaborate investigations on the specific heat of gases and vapours, and various papers on the elastic force of vapours"
- 1870 **James Prescott Joule** "For his experimental researches on the dynamical theory of heat"

- 1871 **Julius von Mayer** "For his researches on the mechanics of heat; including essays on: – 1. The force of inorganic nature. 2. Organic motion in connection with nutrition. 3. Fever. 4. Celestial dynamics. 5. The mechanical equivalent of heat"
- 1872 **Friedrich Wöhler** "For his numerous contributions to the science of chemistry, and more especially for his researches on the products of the decomposition of cyanogens by ammonia; on the derivatives of uric acid; on the benzoyl series; on boron, silicon, & their compounds; and on meteoric stones"
- 1873 **Hermann von Helmholtz** "For his researches in physics and physiology"
- 1874 Louis Pasteur "For his researches on fermentation and on pelerine"
- 1875 **August Wilhelm von Hofmann** "For his numerous contributions to the science of chemistry, and especially for his researches on the derivatives of ammonia"
- 1876 **Claude Bernard** "For his numerous contributions to the science of physiology"
- 1877 **James Dwight Dana** "For his biological, geological, and mineralogical investigations, carried on through half a century, and for the valuable works in which his conclusions and discoveries have been published"
- 1878 **Jean-Baptiste Boussingault** "For his long-continued and important researches and discoveries in agricultural chemistry"
- 1879 **Rudolf Clausius** "For his well-known researches upon heat"

- 1880 **James Joseph Sylvester** "For his long continued investigations & discoveries in mathematics"
- 1881 **Charles-Adolphe Wurtz** "For his discovery of the organic ammonias, the glycols, and other investigations which have exercised considerable influence on the progress of chemistry"
- 1882 **Arthur Cayley** "For his numerous profound and comprehensive researches in pure mathematics"
- 1883 **William Thomson (Lord Kelvin)** "For (1) his discovery of the law of the universal dissipation of energy; (2) his researches and eminent services in physics, both experimental & mathematical, especially in the theory of electricity and thermodynamics"
- 1884 **Carl Ludwig** "For his investigations in physiology, and the great services which he has rendered to physiological science"
- 1885 **August Kekulé** "For his researches in organic chemistry"
- 1886 **Franz Ernst Neumann** "For his researches in theoretical optics and electrodynamics"
- 1887 **Joseph Dalton Hooker** "For his services to botanical science as an investigator, author, and traveller"
- 1888 **Thomas Henry Huxley** "For his investigations on the morphology and histology of vertebrate and invertebrate animals, and for his services to biological science in general during many past years"

- 1889 **George Salmon** "For his various papers on subjects of pure mathematics, and for the valuable mathematical treatises of which he is the author"
- 1890 **Simon Newcomb** "For his contributions to the progress of gravitational astronomy"
- 1891 **Stanislao Cannizzaro** "For his contributions to chemical philosophy especially for his application of Avogadro's theory"
- 1892 **Rudolf Virchow** "For his investigations in pathology, pathological anatomy, and prehistoric archaeology"
- 1893 **George Stokes** "For his researches and discoveries in physical science"
- 1894 **Edward Frankland** "For his eminent services to theoretical & applied chemistry"
- 1895 **Karl Weierstrass** "For his investigations in pure mathematics"
- 1896 **Karl Gegenbaur** "For his life-long researches in comparative anatomy in all branches of the animal kingdom. etc., etc"
- 1897 **Albert von Kölliker** "In recognition of his important work in embryology, comparative anatomy, and physiology, and especially for his eminence as a histologist"
- 1898 **William Huggins** "For his researches in spectrum analysis applied to the heavenly bodies"
- 1899 **John William Strutt (Lord Rayleigh)** "In recognition of his contributions to physical science"