النظرية النسبية الخاصه والرجال الذين صنعوها

يوسف البناي

جميع الحقوق محفوظه للمؤلف ولا يجوز اقتباس
أو تقليد أو نشر أي جزء من الكتاب دون اذن
خطي من المؤلف

الطبعه الأولى

2013م

مصمم الغلاف

ميثم الصفار

Twitter

Bo_tammar

المحتويات

مقدمه

الفصل الأول: الطريق الى الميكانيكا الكلاسيكيه

1 – لمحة تاريخية.....9

2 – جاليليو جاليلي أبو العلم الحديث.....13

3 – دلو السير اسحق نيوتن.....21

4 – نيوتن في مواجهة ماخ.....29

الفصل الثاني: الطريق الى الميكانيكا النسبيه

1 – الأثير وسرعة الضوء.....36

2 – هنا عصر الكهرباء.....47

3 – تجربة مايكلسون – مورلي.....61

4– النسبية الجاليلية – النيوتنية.....67

5– حملة انقاذ ما يمكن إنقاذه.....72

الفصل الثالث: النظرية النسبيه الخاصه

1 – فرضيتان من ذهب.....83

2 – نتائج الفرضين.....88

3 – الحد الأعلى للسرعه والديناميكا النسبيه.....97

4 – العالم رباعي الأبعاد.....101

5– النسبية الخاصه و النظريه الكهرومغناطيسيه.....107

الفصل الرابع: الاثباتات التجريبيه للنظرية النسبيه

1– تباطئ الزمن وانكماش الطول.....113

2– تناقض التوأمين.....117

3– اثبات الديناميكا النسبيه.....120

4–وماذا عن المعادله الأشهر؟.....124

مقدمه

الدافع الرئيسي وراء كتابتي لهذا الكتاب، هو ندرة الكتب العربيه التي تتناول النظرية النسبيه الخاصه بشكلها التاريخي والعلمي الدقيق. ربما توجد هناك مجموعة قليله من الكتب العربيه التي تتناول النظريه النسبيه الخاصه. لكن اما أن تجدها كتب تتناول النظريه بكامل متطلباتها الرياضيه، الأمر الذي يجعلها مقصورة على من نال حظا من الرياضيات فقط. أو أنك تجد تلك الكتب التي تحاول تبسيطها لجعلها في متناول عامة القراء. لكن وللأسف، تجد معظم تلك الكتب مفرطة التبسيط، مهملة الجانب التاريخي لتطور النظريه بشكلها النهائي. فتجد معظمها تمجد وتعظم وتركز على غرابة النظريه، بل وعلى غرابه آينشتين نفسه بشكله وشعره المنكوش. متناسين بذلك الطريقه العلمية الصحيحه للوصول الى النسبيه. لقد وجدت أن معظم الكتاب متلهفين بأن يقولوا للقارئ: أن الطول يقصر و الزمن يسير بشكل ابطأ عندما يتحرك جسم ما بسرعة تقترب من سرعة الضوء. تجد معظم تركيزهم على النتائج الغريبه للنظريه، مهملين بذلك تاريخ ليس بالقصير قد مهد وفرش الطريق بالزهور حتى توصل آينشتين الى النظريه النسبيه الخاصه بشكلها النهائي.

انه لمن السخف أن نختزل النظريه النسبيه الخاصه في انكماش أطوال و سير ساعات بشكل أبطأ، ومعادلة نقول بأنها هي سبب في صنع القنابل النوويه! كل هذه الأشياء عباره عن فقاعات اعلاميه، لجذب الناس و القراء. انها نظرية أجمل من ذلك بكثير. نظريه لم يصنعها رجل واحد، كما هو شائع. فمن الظلم أن نمر على ذكر النظرية النسبيه بدون ذكر اسم العالم الكبير هنريك لورنتز. لقد بذل هذا الرجل جهودا جباره، ساهمت بشكل غير مباشر في صنع النظرية النسبيه. كذلك يجب علينا الا نمر مرور الكرام على اسم الفرنسي هنري بوانكاريه، رجل الرياضيات في القرن العشرين بلا منازع. لقد توصل هذا الرجل الا معظم معادلات النظرية النسبيه الخاصه، بل توصل الى معادلة تكافؤ الكتلة و الطاقة الشهيره. لكن بسبب نظرته الرياضيه للعلم؟ فقد ضالته،

ولم يفسرها بمعناها الفيزيائي. فنجد آينشتين نفسه يقول: اذا اخذنا في الاعتبار النضج العلمي مع الزمن، فأن بوانكاريه كان سيصل الى النظرية النسبيه الخاصه.

اذن لابد من السير التاريخي الدقيق، وتتبع النضوج العلمي التدريجي، حتى نفهم قصة تلك النظريه و مدلولاتها. وليس جمال قصة النسبيه مقصورا على التاريخ القصيرالذي امتد قبل ظهور النسبيه على يد آينشتين. بل انها قصه تلزمنا للعودة الى الوراء، الى زمن جاللیلو وكبلر ونيوتن. ان النظرية النسبيه الخاصه تطول و تعدل جميع قوانين نيوتن في الحركه. لذلك لابد من المرور على ذكر أعمال نيوتن. ونيوتن نفسه قد اعتمد على أعمال جاليليو، لذلك لابد من ذكر أعمال هذا الأخير أيضا. الأمر الذي سيجرنا حتى الى العلم عند الاغريق.

كثيرا ما يشاع عن النظرية النسبيه بأنها نظريه صعبه و معقدة. وكان يقال في السابق، بعد ظهور النسبيه بفتره وجيزه، أن هناك عشرة بالعالم فقط يفهمونها! لا شك أن هذا شيئ مبالغ فيه كثيرا. هي بحد ذاتها ليست صعبه الى هذه الدرجه، لكن نتائجها صعبة التصديق. خصوصا فيما يتعلق بالزمان و ربطه بالمكان.

ان النتائج التي خرجت بها النظريه النسبيه صعبة التصديق فعلا لمن لم يعتاد على النسبيه. جميعنا نشعر بأن الزمن والساعات تجري بوتيره واحد في كل أرجاء الكون. جميعنا نشعر بأن أي حادثتين متزامنتين بالنسبة لشخص ما، يجب أن تكون متزامنتين أيضا بالنسه لشخص آخر. جميعنا يعتقد بأن الزمان منفصل عن المكان. جميعنا يعتقد بأن الكتلة شيئ و الطاقه شيئ آخر. لقد رسم لنا نيوتن صورة ميكانيكه للكون، معتمدا على افتراض أن الزمان و المكان كيانين منفصلين تماما. لذلك عندما اتى آينشتين وغير مفاهيم سادت لقرون من الزمان، اندهش العالم بأجمعه. وعندما تم التحقق تجريبيا من النظريه النسبيه، زاد اندهاش العالم أكثر فأكثر. لقد تهاوت صروح علميه لم يتوقع أحد لها أن تنهار أبدا.

هذا الكتاب، سيأخذك في رحلة تمتد من العصور الاغريقيه حتى عصر آينشتين. لم أستخدم في هذا الكتاب سوى عدد قليل جدا من المعادلات الجبريه البسيطه. وهي ضروريه حتى تفهم كيف تتعلق المعادلات بعمل الطبيعه من حولنا. انه كتاب موجه للجميع، موجه لكل من يريد معرفة النظرية النسبيه الخاصه معرفه دقيقه، بدون استخدام المعادلات الرياضيه المعقدة والغرق في التفاصيل الحسابيه. كذلك يستهدف هذا الكتاب فئة الشباب المقبلين على دراستهم الجامعيه. فأسلوب الكتاب سيعلمهم طريقة التفكير العلميه العميقه. سيعلمهم كيف كان عباقرة التاريخ يفكرون. فلعل منهم من سيصبح فيزيائيا كبيرا في الغد. من يعلم؟ رغم أن هذا الكتاب لا يستخدم سوى عدد قليل جدا من المعادلات، الا أن مواضيعه تتطلب متابعه و عزم لا يلين. فلا تصلح قرائته كروايه أو شعر أو ما شابه. فمعالجة مواضيع مثل قوانين نيوتن و أفكار ماخ و نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسيه ومحاولات لورنتز وبوانكاريه في دمج أفكار نيوتن وماكسويل، وصولا الى النسبيه، تتطلب مثابره وتأمل وخيال أثناء القراءه.

أخيرا، سأكون ممتنا لمن يكتب لي رأيه و ملاحظاته على حسابي في تويتر @youssefalbanay

يناير 2013 يوسف البناي

الفصل الأول

الطريق الى الميكانيكا الكلاسيكية

"اذا كنت قد رأيت أبعد من غيري فذلك لأني أقف على أكتاف العمالقه"

اسحاق نيوتن

1 – لمحة تاريخية

من الصعب جدا كما هو الحال مع أي علم آخر أن نحدد على وجه الدقة منشأ علم الميكانيكا. ذلك الفرع من علم الفيزياء الذي يهتم بدراسة وتوصيف وتعليل حركة الأجسام الفيزيائية عندما تتعرض لنوع ما من القوى الخارجية. على الرغم من أن نشأة علم الميكانيكا لها جذور عميقة جدا في الحضارات القديمة، الا أن أعمال العمالقة الثلاثه: كبلر و جاليليو ونيوتن هي من أرست القواعد الأساسية لما يعرف اليوم باسم الميكانيكا الكلاسيكية. وتلك القواعد (خاصة قوانين نيوتن) هي المسؤولة عن تفسير حركة المقذوفات والأجسام الساقطة، وكذلك حركة الكواكب و الأجرام السماوية الأخرى، وغيرها من أنواع الحركة.

تفاجئت كثيرا عندما أعلن طيار عربي أن الأرض لا تدور حول الشمس ولا حول نفسها، ويؤكد بأن لديه براهين علمية كامله لفكرته. قد يبدو ذلك غريبا جدا ونحن نعيش في هذا القرن الذي امتلأت فيه سماء الأرض بالأقمار الصناعية التي تعطيك صورا للأرض من كل الاتجاهات، وترسلها لك وأنت جالس في منزلك. لكن من الطبيعي جدا ان يتصور الانسان القديم أن الأرض ثابته، والسبب هوعدم شعوره بتلك الحركة، فهو يرى الشمس تشرق من الشرق وتغرب في الغرب، وكأنها هي من تتحرك. لقد أعطى الانسان لنفسه تميزا كبيرا لقرون عديدة عندما وضع الأرض في مركز الكون، وأصبح له موقع مميز جدا في المقصورة الكونية. بل ان تلك المركزية الكونية أصبحت أحد التعاليم الدينية في الانجيل عند الغربيين في القرون الوسطى. وكل من يحاول طرح غير تلك الفكره، ستصنف اطروحته على انها بدعة، وسيواجه تهمة الهرطقة الدينية. لكن بعد انقطاع هذا الشوط الطويل من علوم الفيزياء والفلك، وتجرء علماء من أمثال كوبرنيكوس وجاليليو وكبلر على تحدي فكرة مركزية الأرض، لم نعد نحن البشر في ذاك الموقع المتميز، اننا لسنا سوى مخلوقات بيولوجية بائسة مرمية في احدى مجرات الكون النائية، نعشق اشعال الحروب فيما بيننا بين فترة وأخرى!

لا شك بأن هناك محاولات قديمة جدا لتحدي فكرة مركزية الأرض. ربما يعود أول اقتراح الى فيلولاوس، أحد أعضاء جمعيه الفيلسوف الشهير فيثاغورث. لقد افترض أن الأرض والشمس والقمر وكواكب اخرى تدور كلها حول نار مركزية. وهناك محاولة أخرى، اكثر جديه، تقدم بها الاغريقي أريستاخوس. فقد افترض أن الشمس لا الأرض هي مركز الكون، وأن الارض تدور حول محورها مرة كل يوم وحول الشمس مرة كل سنه. لكن بسبب ضعف الرصد في ذاك الوقت، لم تلاقي فكرته القبول، وواجه تهمة الزندقة. على أي حال تبقى جميع تك المحاولات القديمة سواء لاثبات مركزية الأرض أو عدم اثباتها، نماذج غير مكتملة أو مدعمة الحجج بشكل جيد.

استمرت تلك المحاولات، حتى بلغت ذروتها على يد الفلكي الهليني بطليموس في كتابه الشهير(المجسطي)[1]. وفيه قد وضع نموذجا أكثر ترابطا وصرامه من سابقيه. كان المراد من كتابه حساب حركة الشمس والقمر وبقية الكواكب. لقد صور الأرض على انها هي مركز الكون، وكل الأجرام السماويه الأخرى تدور حولها. وعلى الرغم من عدم صحة نموذجه، الا أنه يعطي قياسات دقيقة لمواقع الكواكب بدرجة معقولة من الدقة. لذلك أصبح نموذجه هو المعتمد في عمل الجداول الفلكية لأغراض التقويم والملاحة. و بسبب ذلك النجاح، أصبح النموذج البطليمي سائدا على تفكير الناس لقرن يليه قرن. لقد ترسخت فكرة مركزية الأرض في عقول الناس، وبات من الصعب جدا معارضة، بل حتى مناقشه تلك الفكرة.

لكن مهما كانت المعتقدات ومهما كانت راسخة في عقول الناس، فان الحقيقة لا بد أن تنجلي في النهايه. هذا ما تعلمناه نحن البشر من تاريخنا الطويل. بل تجد في أحيان كثيرة أن من ينتقد معتقد راسخ، يعمل في موقع من المفترض به أن يدافع عن ذاك المعتقد. هذا ما حدث مع نيكولاس كوبرنيكوس، لقد كان يعمل كاهنا في كاتدرائية فراونبورغ في بولندا. ويعتبر الآن صاحب الفضل الأكبر في هدم فكرة مركزية الأرض التي ترسخت بقوه في تعاليم الدين المسيحي.

تحدى كوبرنيكوس أفكار بطليموس، وأعاد فحص نموذج أريستاخوس، وافترض أن الشمس ثابته والأرض تدور حولها مثلها مثل بقية الكواكب، وفي نفس الوقت تدور حول محورها، وافترض أيضا أن القمر يدور حول الأرض. قد تتسائل الآن، ما الجديد في ذلك؟ ان كل ذلك قد اقترحه أريستاخوس قبل كوبرنيكوس بقرون عديدة. ذلك صحيح، لكن أعمال كوبرنيكوس أتت مشبعة وغنية بالتفاصيل الرياضية التي تسمح باختبارها تجريبيا. وقد نشرها بعد ثلاثة عشر عاما في كتاب سماه (حول حركة المدارات السماوية). كان ذاك التأخير بسبب خوفه من ردة فعل الكنيسة، وقد مات في نفس اليوم الذي نشر فيه كتابه! بل عندما نشر الكتاب، كتب الناشر في مقدمتة؛ أن أعمال كوبرنيكوس يجب ألا تؤخذ على أنها تمثل الحقيقة، بل فقط مجرد طريقة مفيدة لحساب مواقع الأجرام السماوية. كل هذا لأنه تعدى على قداسة مركزية الأرض!

على الرغم من الخطوة الرائعة التي خطاها كوبرنيكوس في تحدي فكرة مركزية الأرض، ظلت هناك الكثير من التناقضات العلمية التي كانت تعتمد على الملاحظات الفلكية. وتبين أنه لا يوجد هناك سبب مقنع لتفضيل النظام الكوبرنكي على النظام البطليمي. فالفلكيين في النهاية يرصدون ملاحظات فلكية معينه، واذا لم تتفق تلك الملاحظات الجديدة لا مع هذا النموذج ولا مع ذاك، فما الذي يجعل أحدهما أفضل من الآخر. خصوصا وأن نظرية كوبرنيكوس كما قلنا سابقا، كان ينظر على أنها فقط طريقة مفيدة لحساب مواقع الأجرام السماوية ولا تمثل الحقيقة الكونية.

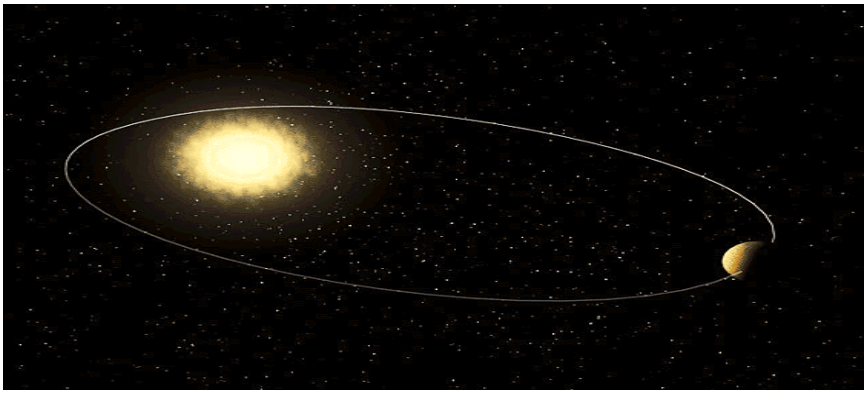
كان أحد هؤلاء الرافضين للنموذج الكوبرنكي فلكي دانمركي يدعى تايخو براه Tycho - Brahe . لقد بنى مركزا للمراقبة الفلكية على جزيرة بالقرب من كوبنهاجن تحت رعايه ملكية. رفض براهي كلا النموذجين البطليمي والكوبرنكي، لأنهما لا يتفقان مع ملاحظاته الفلكية. واقترح حلا وسطا بين النموذجين، حيث تكون الأرض في المركز وتدور حولها كلا من الشمس والقمر، أما بقية الكواكب فتدور حول الشمس.

كرس براهي حياته بالكامل للرصد الفلكي، فلقد جمع كما كبيرا من المعلومات الفلكية حول حركة الكواكب والنجوم. وعندما صار على فراش الموت أوصى مساعده، الذي بقى معه حتى النهاية، بأن يقوم بالحسابات التفصيلية الدقيقة حتى يكمل ما كان ناقصا في نظريته. و بالفعل اختار الشخص المناسب في الزمن المناسب، جوهانس كبلر Johannes Kepler.

ولد كبلر في عام 1571 في مدينة فايل دير شتات Weil der Stadt وهي مدينة تقع بالقرب من مدينة شتوتغارت الألمانية الحالية. عاش طفوله تعيسه و حياة مليئة بالكدر، و كان يعاني من ضعف في صحته. لكن ذلك كله لم يمنعه من أن يكون رياضيا فذا. لقد غير وجه علم الفلك الى الأبد. كان كبلر روحانيا على قدر ما كان علميا، متأثرا بالروح الفيثاغورية، مهتما بالأرقام والأشكال، لقد أصر كما أصر قبله الفيثاغوريين على أن الكواكب تصدر أصواتا موسيقيه حين تتحرك. بل كان مصرا الى درجة أنه كتب النوته الموسيقية بالتفصيل للأنغام الصادرة عن حركة الكواكب! كم سيكون الكون جميلا لو صدق الفيثاغوريين وكبلر. تخيل أنك جالس فوق سطح المنزل، كما أفعل عاده، وتسمع موسيقى بيتهوفن (ضوء القمر) أثناء حركة القمر حول الأرض! نعم، ستصبح الحياه أجمل مما هي عليه.

بعدما حلل كبلر المعلومات الكثيفة التي حصل عليها براهي، ركز مجهوده على وجه الخصوص نحو مدار كوكب المريخ. لقد كان الأكثر صعوبة في التكيف مع المعلومات التي رصدها براهي. لاحظ كبلر في حركة كوكب المريخ، أن الزمن الذي يستغرقه الكوكب في مداره حول أحد جوانب الشمس يزيد بمقدار ثمان دقائق عن الزمن الذي يستغرقه في مداره على الجانب الاخر. وبعد اصرار دام عشرين عاما على حل هذه المعضله، باستخدام النموذج الدائري للمدارات، تخلى كبلر أخيرا عن هذا النموذج الدائري وأحل محله النموذج البيضاوي للمدارات. ان الكواكب تتحرك حركة بيضاوية بانتظام حول الشمس، وبعد مجهود جبار توصل كبلر الى ثلاث قوانين خالده، تنص على:

القانون الأول: الكواكب تتحرك في مدارات لها شكل بيضاوي (قطع ناقص)، تقع الشمس في احدى بؤرتيها. (انظر الشكل 1-1).



شكل 1-1

حسب كبلر، تدور الكواكب بشكل بيضاوي وليس دائري حول الشمس.

القانون الثاني: الخط الواصل بين الشمس و أحد الكواكب يمسح مساحات متساوية خلال أزمنة متساويه.

القانون الثالث: النسبة بين مربع زمن دورة الكوكب حول الشمس مع مكعب متوسط المسافة بين الكوكب والشمس ثابته لجميع الكواكب.

يدل القانون الأول على أن الشمس هي التي تقع في المركز، وأن الأرض واحدة من الكواكب التي تدور حول الشمس، لكن حركه الكواكب جميعها بيضاويه وليست دائريه. أما القانون الثاني فيدل على أن سرعة الكواكب تتزايد كلما اقتربت من الشمس. ومما هو جدير بالذكرأن كبلر قد اكتشف قانونه الثاني قبل الأول وبعدهما بفترة طويلة اكتشف القانون الثالث، ونشره في كتابه (تناغم العالم).

لقد كانت قوانين كبلر ثورية بمعنى الكلمة، فالرجل هذه المرة لم يتحدى مركزية الشمس فقط، بل تحدى الحركة الدائرية للكواكب وأحل محلها الحركة البيضاوية. وعلى الرغم من جمال نظريته و تماسكها، لم تلاقي الاهتمام المستحق الا من قلة من الفلكيين، وتنكر لها البعض. ربما كان السبب الرئيسي هو تمسكهم اللامحدود بالحركة الدائرية للكواكب. وللأسف الشديد كان جاليليو جاليلي هو أحد هؤلاء المتنكرين لأعمال كبلر.

2 – جاليليو جاليلي أبو العلم الحديث

اعتقد جاليليو[2] مثلما اعتقد كبلر أن الأرض تتحرك، و أن الشمس هي مركز الكون. وعلى الرغم من أن جاليليو كان معاصرا لكبلر الا أنه و للأسف الشديد لم يكن متعاونا معه بالمرة. ولم يعترف بأعماله، بل راح يبحث في أعمال كوبرنيكوس محاولا اثباتها تجريبيا. ربما تكون الغيرة هي السبب في تكبر جاليليو على أعمال كبلر. وهناك أمثلة كثيرة للنزاعات والغيرة بين العلماء الكبار. ربما أشهرها نزاع نيوتن وليبنيز حول أولوية اكتشاف علم التفاضل والتكامل. فقد قال نيوتن بعد وفاه ليبنيز بأنه سعيد لأنه حطم فؤاد ليبنيز! أيضا نجد في آينشتين بعض التكبر على الرغم من شهرته في التواضع. فعندما أرسل له العالم السوفياتي ألكسندر فريدمان بحث يتضمن في خلاصته أن الكون من المستحيل أن يكون ساكنا بناءا على معادلات آينشتين في النسبية العامة، رد أينشتين بتعال، لأنه كان مقنعا أن الكون ساكنا تماما. لكن بعدما اكتشف هابل تمدد الكون، اعترف آينشتين بمدى أهميه أعمال فريدمان في نشوء علم الكونيات. في الحقيقة، ان صفه التكبر والغيرة ملازمة لكثير من العلماء، وعندما كنت طالب بكالوريس في الجامعة، رأيتها في كثير من أساتذة الجامعة، على الرغم من أنهم لم يبلغوا ربع ما بلغه نيوتن او ليبنيز او آينشتين!! على أيه حال، علينا محاربة تلك الصفة الفطرية البغيضه فينا.

نعود الآن الى جاليليو، كان هذا الأخير مقنعا تماما بأفكار كوبرنيكوس، وكان مفتونا كغيره من فلكيي عصره بالحركة الدائرية للأجرام السماوية. راح يرصد السماوات ويستكشفها عن طريق عدسات صنعها هو بنفسه، و اقتنع أن الأرض متحركة وليست ساكنة في مركز الكون. صاغ جميع آرائه الفلكية في كتاب أسماه (حوار حول النظاميين الرئيسيين في العالم). لكنه دفع ثمن آرائه غاليا. كانت الكنيسة الكاثوليكية في روما قد حرمت أفكار كوبرنيكوس حول مركزية الشمس تحريما قاطعا، وكذلك حرمت بعضا من أعمال كبلر. وكل من يدافع عن تلك الافكار التي تمس قداسة مركزية الأرض، سيخضع أمام هيئة الاستجواب في روما. ولما كان جاليليو عالما أصيل الفكير، شديد المنطق، خافت الكنيسة من أعماله وسرعان ما استدعي اليها. مثل جاليليو أمام الهيئة، راكعا على ركبتيه، معترفا بأنه قد أخطأ بحق قداسة الأرض، وأقسم بأن يعترف من بعد الآن أن الأرض هي مركز الكون. وربما لكبر سنه راعته الكنيسة، ووضعته قيد الاعتقال المنزلي، حيث رعته ابنته. وعلى الرغم من كل ما ألم به من حزن ومرض واصابته بالعمى، واصل أبحاثه ودراساته رافضا الانسحاب من أرض المعركة، يناضل من أجل الحقيقه. لقد ظل هكذا شامخا حتى مات عام 1642. ومكافأتا لصبره ولد اسحق نيوتن في نفس العام الذي مات فيه!

لم يكن الفلك هو كل اهتمام جاليليو، لقد اهتم أيضا بدراسة حركة الأجسام الأرضية، واهتم بدراسة الحركة المنتظمة والسقوط الحر وحركة البندول البسيط وحركة المقذوفات، وكذلك تنسب اليه الحركة النسبية لمراجع القصور.

مثلما سادت نظرية مركزية الأرض، بسبب سلطة أرسطو العلمية، فكذلك سادت أرائه حول مفهوم الحركة. كان أرسطو يعتقد أن الأجسام الثقيله تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الخفيفة نحو الأرض. وكذلك كان يعتقد أن الأجسام المتحركة تتوقف عندما لا تعود القوة التي تدفعها قادرة على التأثير فيها. لكن جاليليو كان بالفعل ذو بصيرة مذهله، لقد شك في جميع آراء أرسطو السابقة، وراح يجري تجاربه في الحركة على السطوح المائلة، وحركة البندول البسيط، وحلل بدقة حركة المقذوفات. ان فهم جاليليو للحركة كان بالفعل ثوريا، وانطلاقة جديدة في دنيا العلم. لقد وضع أساسيات علم الحركة، معلنا مع ابتداء عصر النهضة، أن علم الفيزياء الحقيقي قد بدأ. ولنبدأ نحن أيضا معه.

في احدى ألعاب كرة هوكي الجليد، يتم ارسال كرة الهوكي باعطائها دفعة ابتدائية، وبعدها يقوم لاعبان بالسير مع الكرة وحك الجليد من أمام الكرة مباشرة على طول مسار الكرة باستخدام عصي الهوكي. ان مايقوم به اللاعبان هو محاولة جعل أرضية الجليد ناعمة قدر الامكان، بحيث تستطيع الكرة أن تسير أطول مسافة ممكنة حتى تسقط أخيرا في الحفرة. لنفرض أن الفائز بالمسابقة هو من يجعل الكرة تسير أطول ما يمكن. سنجد بالطبع أن النتائج مختلفة، فالفريق الذي يجعل نسبة الاحتكاك بين الأرض والكرة عن طريق الحك بالعصى قليله، سيجعل الكرة تسير مسافة أطول. لنفرض أنه قد اشترك في المسابقة فريق مثالي، بحيث يجعل نسبة الاحتكاك بين الأرض والكرة معدومة. ماذا سيحدث؟ ستستمر الكرة في الحركة الى ما لانهايه! وهذه نتيجة واقعية فعلا، و احدى ركائز قوانين الفيزياء، ونسميها اليوم بقانون نيوتن الأول. ينص على التالي: اذا تحرك جسم ما في خط مستقيم بسرعة ثابته فسيستمر في الحركة الى ما لانهاية حتى تؤثر عليه قوة خارجية تغيير من حالة حركته. وينطبق نفس الكلام على الجسم الساكن، فيبقى ساكنا مالم تؤثر عليه قوة خارجية تغير من حالة سكونه.

على الرغم من أن هذا القانون قد صاغه نيوتن، الا أن جاليليو هو من اكتشفه أولا. لقد توصل اليه عن طريق دراسته للحركة على سطوح مائلة. ومن ثم عممه على الحركات المتسارعة. ان ما جعل جاليليو يدرس حركة الأجسام على سطوح مائلة هو شكه في رأي أرسطو القائل بأن الأجسام الثقيلة تسقط بسرعة أسرع من الأجسام الخفيفة نحو الأرض. لكن جاليليو وهو أبو التجارب رفض هذا الرأي دون التحقق من تجريبيا. وراح يحاول اجراء تلك التجربة، لكن كانت هناك عده عوائق. احدى هذه العوائق هو وجود الهواء، فهو يشكل عامل مقاومة باحتكاكه بالأجسام اثناء سقوطها. والعائق الثاني هو صعوبه دراسة تلك الأجسام وهي تسقط بتلك السرعة العالية. لهذا السبب درس جاليليو الحركة على سطوح

مائلة، حتى يقلل كثيرا من نسبة الاحتكاك، ويكون بامكانه رصد أوقات سقوط الأجسام. درس الحركة بدقة كبيرة، واستخدم مسافات مختلفة لحركة الكرة في فترات زمنية مختلفة. وكان يستخدم البندول تارة لقياس الزمن المستغرق وتارة يستخدم نبضات قلبه، فلم تكن في أيامه توجد ساعات توقيت أنيقة كما في أيامنا هذه. اكتشف علاقة مهمة جدا؛ أن الكرة المتدحرجة تقطع مسافات تزداد طرديا مع مربع الزمن. نعبر عن ذلك رياضيا كالتالي:

$$d \propto t^2$$

حيث d تمثل المسافة، t تمثل الزمن المستغرق. أي أنه اذا كان الزمن المنقضي هو 1 سيقطع الجسم مسافة 1 واذا كان الزمن المنقضي هو 2 سيقطع الجسم مسافة 4 و اذا كان الزمن هو 3 ستكون المسافة 9 وهكذا...

طالما أن الجسم يقطع مسافات أكثر في أزمنه اقل، فهذا يدل على وجود حركه تسارعيه منتظمه اثناء سقوط الأجسام. اذا انتقلنا الآن من الحركه على سطح مائل الى السقوط الحر نفسه، سنجد فعلا أن الأجسام الساقطه من ارتفاع معين تتعرض لقوه تعجيل اكثر فأكثر. لقد تم تعيين مقدار تلك العجله وهي $9.8\ m/s^2$.اي انك لو قفزت من ارتفاع معين على حوض سباحه، فان سرعتك في الهواء ستزداد بمقدار 9.8 متر في كل ثانيه. وبما أن العجله تعتمد فقط على سرعه الجسم والزمن المستغرق ولا تعتمد على وزن الجسم، فان العجله لجميع الأجسام مهما كانت صغيره أو كبيره تبقى واحده بعد اهمال مقاومه الهواء. هناك قصه شهيره لجاليليو حول موضوع السقوط الحر، حيث يقال بأنه ألقى جسمين كرويين أحدهما ثقيل والآخر خفيف من أعلى برج بيزا، ليبرهن للملأ أن الأجسام جميعها تسقط نحو الأرض بنفس السرعه مهما كان الفرق في أوزانها. ربما تكون تلك القصه قد خلقت لمكانه جاليليو في تاريخ العلم، علي غرار تفاحه نيوتن وحوض أرخميدس. وسواء كانت تلك القصه صحيحه أو غير ذلك، يبقى جاليليو هو المكتشف الأول لما نسميه اليوم بالعجله.

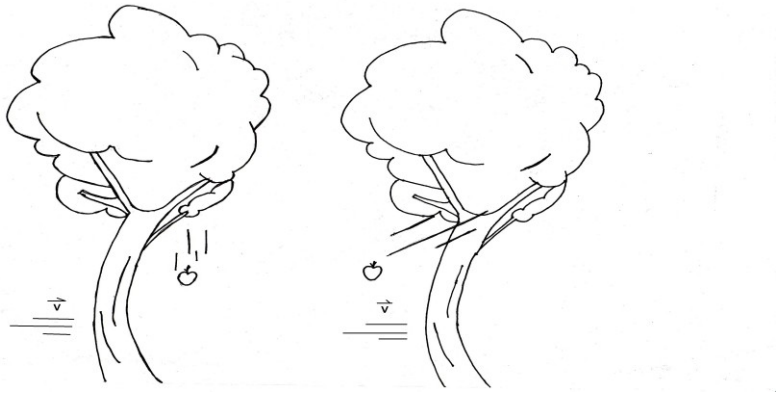
بعدما اكتشف جاليليو أن حركه الأجسام في خط مستقيم تبقى كما هي ما لم تؤثر عليها قوه خارجيه تغير من حالتها، بدأ يدرس الحركه الأكثرعمقا، حركه الأجسام المنحنيه، وركز في دراساته بشكل خاص على حركه المقذوفات.

حتى نفهم حركة المقذوفات بشكل جيد، دعنى نبدأ بسؤالين أحدهما أتعب أرسطو والآخر أتعب كل من آمن بحركة الأرض في ذاك الوقت. السؤال الذي أتعب أرسطو هو: لماذا تظل قذيفة المدفع قادرة على الاحتفاظ بحركتها في الهواء بعدما تغادر الفوهة؟ لقد أتعبه هذا السؤال لأنه كان يعتقد أن الجسم المتحرك يتوقف عندما لا تعود القوة التي تدفعه قادرة على التأثير فيه. أما بالنسبه للسؤال الثاني فهو شبيه باللغز، ويمكن كتابته كالتالي: اذا سقطت تفاحة من أعلى شجرة ما على الأرض، وكانت الأرض متحركة، فلا يمكن للتفاحة أن تسقط

على نفس النقطة المقابله مباشرتا لموقعها الاصلي! لكن في الواقع هي تقع على نفس النقطة المباشره؟! (الشكل 2-1).

ومرة أخرى، تصدى جاليليو لهذه الأسئلة المزعجة، معطيها حلا نهائيا. لكن قبل أن نبدأ بحلول جاليليو، دعنى نتكلم قليلا عن ما يسمى بحساب المتجهات.

عادة عندما يتعرض كابتن طائرة الى مشكله ما في الهواء، فأنه يتصل بأقرب برج مراقبه، وأول ما يعطيهم من معلومات هو سرعته واتجاه سرعته. لكن لو سأل أحد الموظفين بالبرج هذا الكابتن عن وزنه - على الرغم من أن السؤال ليس في الوقت المناسب – فأن الكابتن سيجيب وأمره لله، 70 كيلوغرام، بدون أي يشير الى أي اتجاه. فالسؤال هنا عن الاتجاه لا معنى له على الاطلاق. لأن الوزن كميه عدديه ثابته في أي اتجاه وفي أي مكان تقريبا. لذلك قسم الفيزيائيون الكميات الفيزيائيه الى نوعين: كميات عدديه، كالوزن والحرارة والكثافه. وأخرى تسمى كميات متجه، كالسرعه والقوه والضغط وغيرهما. تلك الكميات المتجه يعبر عنها بلغه الفيزياء بأسهم مختلفه الحجم، تسمى بالمتجهات. لم يخترع الفيزيائيون تلك الكميات لكي يميزوها عن الكميات العدديه، فلا تعتقد أبدا بأنهم يميلون الى هذا النوع من التفكير. لقد اخترعوا تلك الأسهم ليخترعوا لها عمليات حسابيه خاصه بها. واحده من أهم تلك العمليات تسمى بجمع المتجهات. لنفترض بأن هناك شخص ما يتحرك من النقطه P1 الى النقطه P2 (المتجه A) ومن ثم يتحرك من النقطه P2 الى النقطه P3 (المتجه B)، اننا في النهايه نقول بأن محصله هذه الحركه تبدأ من النقطه P1 و تنتهي



شكل (2-1)

بعد أن أتت نظريات تدعي بأن الأرض متحركه، جادل القدماء حول المعضله التاليه: اذا سقطت تفاحه من أعلى شجره ما وكانت الأرض متحركه، فسوف تتحرك الشجره ولن تسقط التفاحه أمام الشجره. تماما مثلما ترمي شيئا ما من نافذة السياره أثناء الحركه.

بالنقطه P3 ونعبر عنها بالمتجه C والذي يساوي الجمع الجبري لكل من المتجهين A و B، كما هو موضح بالشكل 3-1. ومهما كان عدد الأسهم، فاننا بالنهايه نجمعها ونحصل علي سهم يبدأ ذيله مع النقطه الأولى وينتهي رأسه مع رأس المتجه الأخير (انظر الشكل 4-1).

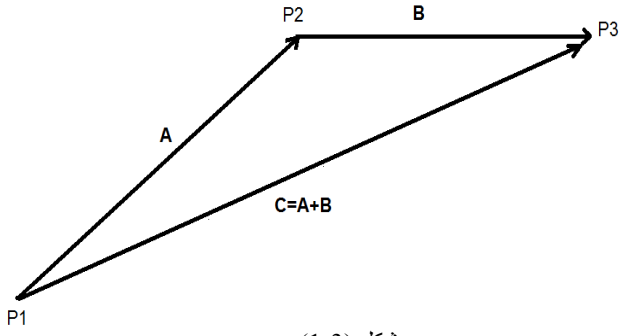
تكمن اهميه تلك المتجهات في قدرتها على اعطاء الناتج النهائي للحركه كميا واتجاهيا. حتى يتضح ذلك، تصور بأن هناك قاربا يتحرك نحو الشمال بسرعه 100 كيلومتر في الساعه، وكانت هناك ريح تهب في اتجاه الشرق بسرعه 70 كيلومتر في الساعه، (الشكل 5-1). ستكون حركه القارب النهائيه متجه نحو الشمال الشرقي، ولأن المثلث الموضح بالشكل نفسه قائم الزاويه، يمكننا ان نحسب- باستخدام نظريه فيثاغورث - سرعه القارب النهائيه كالتالي:

$$R^2 = \sqrt{70^2 + 100^2} = 122 \quad km/h$$

ويمكننا تعيين الاتجاه باستخدام المنقله. او ان كنت من محبي الرياضيات فيمكنك تعينها كالتالي:

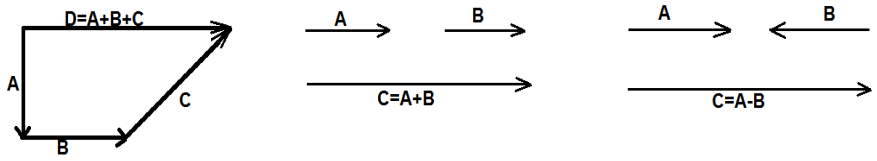
$$\tan\theta = \frac{y}{x} = \frac{100}{70} \;\Rightarrow\; \theta = \tan^{-1}\left(\frac{100}{70}\right) = 55^{\circ}$$

في الاتجاه الشمالي الشرقي.



شكل (1-3)

عندما يتحرك شخص من النقطه P1 الى النقطه P2 فانه يصنع متجها A، وعندما يتحرك من P2 الى P3 فانه يصنع متجها آخر B. ان المحصله النهائيه لهذه الحركه هو المتجه C=A+B.

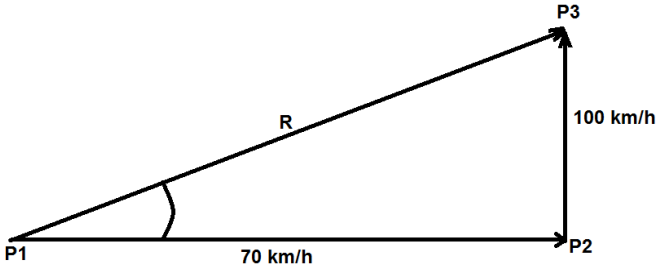


شكل (1-4)

مهما كان اتجاه الأسهم متفرقا، فان المحصله دائما ما تكون سهم يبدأ ذيله مع ذيل المتجه الأول وينتهي رأسه مع رأس المتجه الأخير.

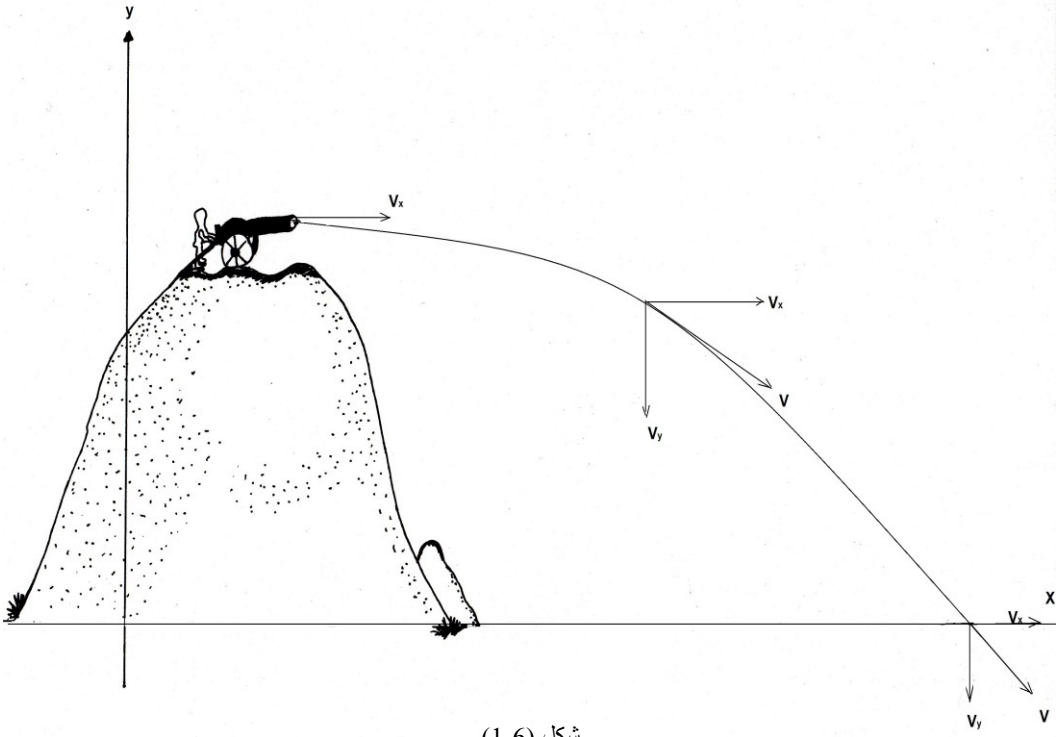
لننتقل الآن الى دراسه حركه المقذوفات في ضوء فهمنا لحساب المتجهات. أدرك جاليليو أن المقذوفه في أثناء حركتها تمتلك في الأصل متجهين اثنين، أحدهما يسير على المحور الافقي (محور x) بسرعه ثابته، والآخر على المحور العمودي (محور y) الى أسفل بمعدل متسارع ثابت نحو الأرض (الشكل 6-1). ان محصله هذين المتجهين هو المتجه v. لكن لا يملك هذا المتجه أفضليه ما على المتجهين الآخرين. بمعنى أنه نستطيع أن نأخذ المتجهين v_x و v كمتجهين أوليين، ومن ثم نرى المحصله لهما. ان محصلتها بالطبع هو المتجهv_y. وهنا نصل الى استنتاج مهم؛ ان محصله الحركه هي دائما قوه متجه نحو الأسفل. وحتى ندرك مدى أهميه ذلك الاستنتاج علينا أن نعمم الحركه أكثر.

تخيل بأن هناك جندي يرمي قذائف مدفعيه ضد العدو، لكنه لا يصيبهم، فيقوم بزياده قوه الدفع، لكن يستمر العدو في الرجوع ولا يصيبهم شيئ. فيزيد و يزيد من قوه الدفع، ماذا سيحدث؟ لو استطاع ان يقذف بقوه معينه- طبعا من المستحيل ان يفعلها مدفع عادي- ستدور الطلقه و ستأخذ لفه كامله حول الأرض وتصيب ذلك الجندي المسكين الذي يدافع عن نفسه! واذا زاد من قوتها أكثر، ستدور الطلقه حول الأرض كما يدور القمر (الشكل 7-1).



شكل (1-5)

عندما تتقاطع حركه نحو الشمال مع ريح تهب نحو الشرق، ستكون حركه القارب النهائيه نحو الشمال الشرقي.

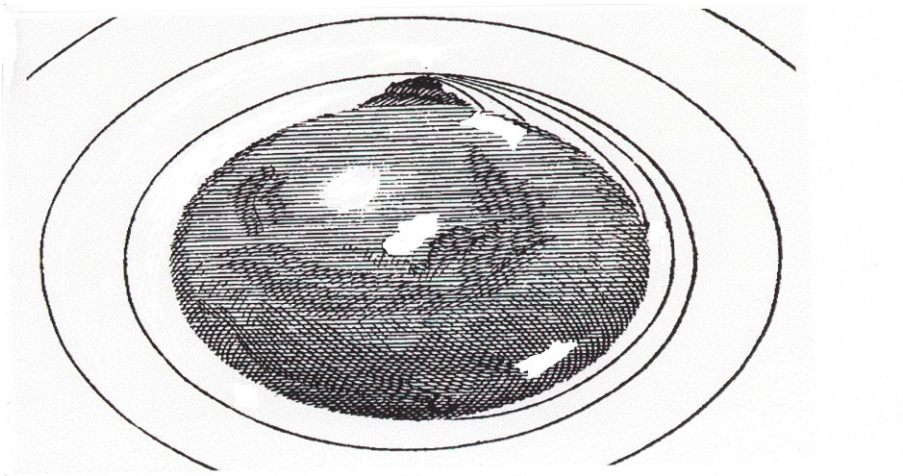


شكل (6-1)

عندما تتحرك المقذوفه يكون لها متجهين اثنين أحدهما يسير على المحور الأفقي x بسرعه ثابته والآخر على المحور العمودي y نحو الأرض بمعدل متسارع ثابت.

والآن نصل الى فهم دقيق ورائع جدا حول ماهيه الحركة الدائرية. ان الحركة الدائرية لجسم ما عباره عن حركه مستقيمة مماسيه على طول المسار الدائري. عند أي نقطة على المسار الدائري، يوجد هناك خط مستقيم يمس ذاك الجزء من المسار الدائري يسمى المماس. تخيل الآن ان نقوم بتعميم الشكل (6-1) الى دائره كامله، كما في الشكل (8-1). عند أخذ أي مماسين متجاورين جدا، وهذا يعني مماسي السرعه والسرعه بعد جزء صغير من الوقت، سنجد أن المتجه الناتج يتجه نحو المركز دائما. هذا المتجه يسمى بلغه الفيزياء (العجله) Acceleration. اذن نستنتج أن العجله تنشأ من احدى طريقتين: اما أن يغير الجسم من سرعته أثناء الحركه، أو يغير من اتجاه سرعته. وتحدث تلك الأخيره، عندما يتحرك الجسم حركه دائريه بسرعه ثابته. ان الحركة الدائريه، وحركة المقذوفات التي هي جزء من الحركة الدائريه، هي حالات أكثر عموميه من الحركه المنتظمه على خط مستقيم.

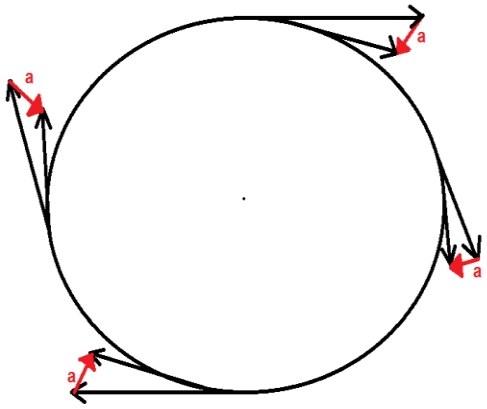
نعود الى السؤال الذي أتعب أرسطو. في الحقيقه كان أرسطو يحاول أن يجواب على سؤال لا وجود له أصلا في قوانين الطبيعه. فبدلا من السؤال: لماذا تظل المقذوفات محتفظه بحركتها في الهواء، أدرك جاليليو أن السؤال الصحيح هو: لماذا تتوقف تلك المقذوفات عن الحركة أصلا؟ ان السبب هو مبدأ القصور الذاتي، حيث تبقى الأجسام المتحركه محتفظه



شكل (7-1)

ان حركه المقذوفات المختلفه القوه، لا تصل الأرض في نفس الوقت، لأن الأرض ليست مسطحه. فلو استطعنا أن نعطي المقذوفه قوه دفع ابتدائيه معينه ستتجنب السقوط على الأرض وتواصل دورانها حول الأرض مثلما يدور القمر.

بحركتها مالم تؤثر عليها قوة خارجيه تغير من حالتها. وعندما عممنا الحركه من خط مستقيم الى الحركة الدائريه، وجدنا أن المقذوفه ستبقى تدور وتدور حول الأرض، اذا تلقت قوة دفع ابتدائيه معينه. ان سبب ذلك الدوران بالنسبه لنا اليوم هو الجاذبيه الأرضيه التي اكتشفها اسحق نيوتن. متسلق أكتاف العمالقه، حسب ما يقول. ولا شك أنه تسلق على كتف جاليليو كثيرا. بالنسبه للسؤال الآخر الذي طرحناه في البدايه والذي كان: اذا سقطت تفاحة من أعلى شجرة ما على الأرض، وكانت الأرض متحركة فلا يمكن للتفاحة أن تسقط على نفس النقطة المقابله مباشرتا لموقعها الاصلي، لكن ما نعرفه هو أنها تسقط على نفس النقطة المباشره؟ كيف يكون ذلك؟ في الحقيقه السبب بسيط، اذا اعتبرنا ان التفاحه تتحرك كمقذوفه. حيث يكون لها مركبتان، وتحتفظ بمركبه حركتها الأفقيه الى الأمام اثناء السقوط. لكن أيضا، عليك أن تفكر بالأمر بشكل أبسط. عندما تسقط ملعقه الطعام من بين يديك وأنت تتناول وجبتك على متن احدى الخطوط الجويه، فهل ترى الملعقه تسقط بشكل مائل؟ ان سرعه الطائره تقترب من 1000 كيلومتر في الساعه ومع ذلك لا تسقط الملعقه بشكل مائل. ان الاجابه تكمن في الحركه النسبيه، فأنت ومن معك من ركاب ترون الملعقه تسقط بشكل عادي جدا وكأنكم



شكل (8-1)

الحركه الدائريه عباره عن مجموعة من الحركات المماسيه. فعند كل نقطه على المسار دائري يوجد هناك مماس للسرعه يتجه في خط مستقيم. لو أخذنا أي مماسين متجاورين جدا، وهذا يعني مماسي السرعه والسرعه بعد جزء صغير من الوقت، سنجد أن المتجه الناتج يتجه نحو المركز دائما، وهو ما يسمى بمتجه العجله a.

على الأرض، فقط صوت محرك الطائره ما يختلف معكم. لكن لو استطاع شخص ما على الأرض رؤيه ملعقتك وهي تسقط، فسيراها تسقط بشكل مائل. سنرى لاحقا كيف أوحت هذه الحركه لآينشتين أن يكشف المعاجز منها.

3 – دلو السير اسحق نيوتن

السير اسحق نيوتن، الماركه العلميه رقم واحد في كل العصور، اسمه مألوف جدا بالنسبه لعامه الناس كأسماء نجوم هوليوود. يعتبر أحد أكثر الشخصيات تأثيرا في تاريخ البشريه، وقد وضعه الفلكي مايكل هارت ثاني أكثر الشخصيات تأثيرا في كتابه (المائه أعظم الناس أثرا في التاريخ). وقد فاز نيوتن على آينشتين في استفتاء للرأي أجرته الجمعيه الملكيه البريطانيه عام 2005 حول أعظم الشخصيات تأثيرا في تاريخ العلم. لم تأتي تلك المكانه الرفيعه التي يحتلها نيوتن في التاريخ من فراغ، فالرجل هو من أرسى قواعد العلم كما نعرفها اليوم، وأهدانا أعظم الاسهامات العلميه في تاريخنا البشري، وما زال أثر نهجه الفكري مؤثرا على طريقه تفكيرنا العلميه الى اليوم. كان صاحب معرفه غزيره جدا، فقد ساهم في فهم وتحليل الضوء وعلم البصريات وقوانين الحركة وقانون الجذب العام وعلم الفلك وهو أول من قال بأن الضوء يتكون من جسيمات، الشيئ الذي أكده اينشتين بعد قرون. وهو كذلك أول من وضع علم التفاضل والتكامل مع الفيلسوف والعالم الرياضي الألماني

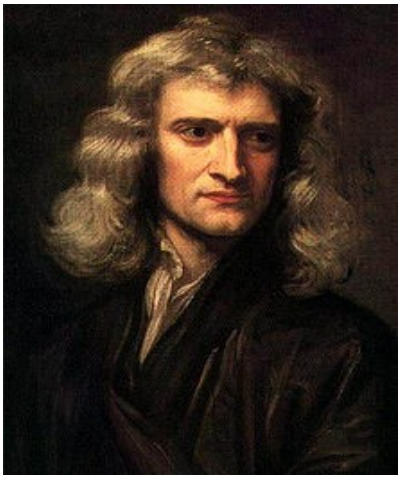
ليبنيز. في الحقيقة يكفي لعلم التفاضل والتكامل وحده أن يضع نيوتن في مكانه عظيمة في التاريخ. واذا كنت متعجبا حتى الآن من غزارة أعمال نيوتن، فاسمح لي أن أقول لك، بأنه ألف كتبا في دراسه الأديان وتفسير الكتاب المقدس أكثر مما ألف في العلم!!

ولد نيوتن في انجلترا عام 1642، عام وفاه جاليليو، وقد كان طفلا صغير الحجم (خدج)، هزيل البنيه. واذكرعندما زرت لندن، ذهبت الى متحف الشمع، والتقطت صوره مع تمثاله الذي يحاكي جسده الأصلي تماما. لقد كان صغير الحجم نسبيا على عكس البريطانيين المعروفين بالطول والبنيه الجسديه العريضه. توفي والده قبل ثلاث أشهر من مولده، وعندما بلغ من العمر ثلاث سنوات، تزوجت والدته وتركت أمر رعايته لوالدتها. قضى نيوتن الفتره ما بين عامين 1665 الى 1667 منعزلا في وولسثورب، مسقط رأسه. بعدها عاد من لندن وعاش مع والدته التي ترملت مرة أخرى. كانت تلك الفتره فتره انتشار الطاعون في أوروبا، مما جعل نيوتن يقضي أوقاتا طويله في العزله. كانت تلك الفتره من أعظم فترات ابداعه، فقد انتج فيها انتاجا غزيرا جدا. بعدها عاد الى لندن وتبؤا منصب كرسي الأستاذيه هناك، الذي تركه له اسحق بارو، احتراما لقدرات نيوتن العلميه. و كم أتمنى أن نتعلم هذا الشيئ في بلداننا العربيه. في عام 1687 نشر نيوتن أهم أعماله في كتابه الشهير (المبادئ الرياضيه للفلسفة الطبيعيه) أو اختصارا (المبادئ) Principia. ويعد من أشهر الأعمال العلميه و أكثرها تأثيرا على الاطلاق. حيث يعتبره البعض بمثابه انجيل العلم، ولا يزال يحتفظ ببريقه كجوهره علميه فريدة من نوعها. لقد استغرق تأليف هذا الكتاب عامين، وهو حصيله عشرين عاما من التفكير الجاد والمتواصل، منذ أن كان منعزلا في وولسثورب. أعلن في كتابه قوانين الحركة الثلاثه، مع قانون الجذب العام، حيث وحد قوانين الكون من الأرض حتى أقصى آفاق الكون. وحسب قوله "اذا كنت قد رأيت أبعد من غيري فذلك لأني أقف على أكتاف العمالقه". وهؤلاء العمالقه هم من قرأتهم في هذا الكتاب حتى الآن، من أرسطو الى كبلر وجاليليو. دعنى الآن نقف على كتف نيوتن لنرى قوانينه الثلاثه بشكل مباشر:

القانون الأول: يسمى بقانون العطاله، و ينص على أن كل جسم يظل محتفظا بحركته المنتظمة أو سكونه مالم تؤثر عليه قوة خارجيه تغير من حالته.

القانون الثاني: يتناسب تسارع الجسم تناسبا طرديا مع القوه المؤثره عليه.

القانون الثالث: لكل فعل رد فعل مساوي له في المقدار ومضاد له في الاتجاه.



السير اسحق نيوتن

نلاحظ مباشرتا أن القانون الأول قد رأيناه عندما كنا في صدد أعمال جاليليو. هذا القانون ما هو الا اعادة صياغه لاكتشاف جاليليو. لكن جاليليو اعتبره قانونا أرضيا فقط. بينما جعله نيوتن أرضيا وسماويا. أما بالنسبة للقانون الثاني، فيعد من أهم قوانين الفيزياء، وله تطبيقات مهوله جدا. كذلك ساعد هذا القانون على فهم العلاقه جيدا بين الكتله وقوة الجاذبيه، كما سنرى بعد قليل. تعطى الصيغه الرياضيه للقانون الثاني كالتالي:

$$F = ma$$

أي أنك لو دفعت سيارتك المتعطله على جانب الطريق، ستزداد سرعه السياره كلما زادت قوة دفعك. لكن اذا كانت سيارتك كبيره جدا ستحتاج بالمقابل الى قوة أكبر حتى تتحرك. ان القوة التي نبذلها لتحريك سياره صغيره لا تحرك سياره كبيره. قد تقول الآن: ان هذ الكلام مألوفا جدا وأقوم بتطبيقه يوميا في حياتي، لكن كل ما في الأمر أن نيوتن قد كتبه في كتابه. هذا صحيح لكن سترى بعد قليل أن نيوتن لم يستخدم كلمه "كتله" نفس الاستخدام الذي يستخدمه عموم الناس. بالنسبه للقانون الثالث، فبامكانك تجربته الآن: ادفع الحائط الذي بجوارك، ستجده يدفعك بنفس القوه في الاتجاه المعاكس. يدخل هذا القانون في اطار التفاعل بين الأجسام في الكون، ان القوة موجودة لأن هناك أجساما أخرى موجودة.

كانت قوانين الحركه تلك تهدف الى تعيين العلاقه بين القوه المسلطه على الأجسام و تغير حركتها. أعاد نيوتن التفكير في حركه المقذوفات التي حللها جاليليو، وبدأ يتسائل عن مصدر تلك القوه التي تجعل الأجسام تعود الى الأرض مهما طارت بعيدا.

تقول القصه أن نيوتن الشاب كان جالسا تحت شجره في احدى حدائق وولسثروب، و فجأه سقطت تفاحه على رأسه. بعدها بدأ يتسائل عن السبب الذي يجعل الأجسام دائما تسقط نحو الأرض، ولا تطير الى الأعلى. رفع عيناه الى السماء وتسائل الى أي مدى يمتد تأثير ذلك الجذب؟ هل الى حدود الشجره فقط أم الى حدود البنايه ام الى ماذا...؟ أدرك بعدها ان هذا الجذب يمتد الى أعلى الجبال، بل انه يمتد الى الفضاء، خارج الأرض برمتها. تابع تفكيره أكثر فأكثر وطرح السؤال التالي: اذا كان ذلك التأثير يمتد الى الفضاء، فلماذا لا يسقط القمر على الأرض كما تسقط التفاحه؟ لقد اكتشف من اجابة هذا السؤال اكتشافين في غايه الأهميه. السبب في جعل القمر لا يسقط ناحية الأرض هو حركته حول الأرض. وعندما كنا نتكلم عن جاليليو، تحدثناعن الجندي الذي يزيد من قوه المدفع شيئا فشيئا حتى أصبحت المقذوفه تدور حول الأرض. هذه الحركه الدائريه الكامله حول الأرض قد فطن اليها نيوتن. ان حركه القمر حول الأرض تصنع قوه طرد مركزيه في عكس اتجاه قوه جذب الأرض، لذلك يبقي القمر يدور بشكل منتظم تحت تاثير قوتان متساويتان في المقدار ومتضادتان في الاتجاه. اذا كان تأثير الجاذبيه يمتد الى التفاحه مثلما يمتد الى القمر، فلماذا لا يكون تسارع القمر الى الأرض مساويا لتسارع التفاحه؟ استنتج نيوتن أهم استنتاج من هذا السؤال الأخير. ان قوه الجاذبيه الأرضيه تتناقص مع زياده المسافه. وبعد اطلاعه على أعمال كبلر - أحد العمالقه الذي وقف على اكتافهم - رأى النور في القانون الثالث، واستنبط منه القانون التالي:

"توجد هناك قوه جذب بين أي جسمين في الكون تتناسب طرديا مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسيا مع مربع المسافه بينهما"

وعبر عنها رياضيا كالتالي:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

حيث F قوة الجذب بين الجسمين، m_1 كتله الجسم الأول، m_2 كتله الجسم الثاني، r المسافه بين الجسمين، أما G فيسمى ثابت الجذب العام ويساوي :

$$G = 6.67384 \times 10^{-11}\frac{m^3}{kg\ s^2}$$

لذلك اذا كانت المسافه بين أي جسمين تساوي 2، ستتناقص القوه الى $\frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$، واذا تضاعفت المسافه الي 3، تقل القوه الى $\frac{1}{3^2} = \frac{1}{9}$ ، وهكذا.....

دعنى الآن نخوض أكثر في فهم أهميه و مغزى هذا القانون. لنأخذ على سبيل المثال القوه الناشئه بين الكره الأرضيه والتفاحه التي سقطت على رأس نيوتن. في الحقيقه ان التفاحه تجذب الأرض مثلما تجذب الأرض التفاحه. لكن بسبب هول حجم الأرض بالنسبه للتفاحه، ولكل الأجسام الأخرى التي على الأرض، تبدو ان الأرض هي مصدر الجذب الرئيسي للأجسام التي عليها.

سنعود الآن الى برج بيزا، لنعيد تجربة جاليليو مره أخرى. سنرى نتائج مذهله من هذه التجربه في ظل قوانين نيوتن للحركه. اذا قمنا باسقاط قطعه من الحديد و قطعه من الفلين، سيصطدمان بالأرض في نفس الوقت (باهمال مقاومة الهواء). لقد أدركنا هذه التجربه عندما كنا في صدد أعمال جاليليو. وأدركنا كذلك أن الأجسام جميعها لها عجله واحده نحو الأرض. في الحقيقه لم يكن لدى جاليليو و لا لدينا تفسير معين لهذه الظاهره. لكن الآن نستطيع بكل راحه تفسير هذه الظاهره، طالما ان السير اسحق نيوتن معنا. هناك تشابه واضح بين قانون نيوتن الثاني وقانونه في الجذب العام، فالقانونين يقرآن بوجود تناسب بين القوه والكتله. هذا يعني أن القوه تزداد اذا زادت الكتله. لذلك اذا كانت القوه ثابته فان الأجسام الأثقل يجب ان تسقط بتسارع أقل من الأجسام الأخف. لكن في واقع الأمر وكما رأينا من برج بيزا، تسقط جميع الأجسام بتسارع واحد نحو الأرض. لذلك سنستنتج أن الأرض تستخدم قوه أكبر على الأجسام الأثقل. اذا زادت الكتله زادت القوه الجاذبه لهذه الكتله، واذا قلت الكتله قلت القوه الجاذبه لها، بحيث تبقي عجله الأجسام جميعها واحدة ثابته نحو الأرض. نستطيع الحصول على هذه النتيجه اذا دمجنا قانون نيوتن الثاني مع قانونه في الجذب العام. اذا سقطت تفاحه على الأرض من ارتفاع معين، فان القوه المؤثره عليها عموديا حسب القانون الثاني هي:

$$F = ma$$

حيث m كتله التفاحه، F قوه الجذب بين الجسمين، لذلك سنستبدلها بمعادلة قانون الجذب العام:

$$G\frac{mM}{r^2} = ma$$

M كتله الأرض. بحذف m من طرفي المعادله نحصل علي:

$$a = \frac{GM}{r^2}$$

ويالها من نتيجه في قمه الاناقه! واضح من هذه المعادله أن العجله نحو الأرض لا تعتمد على كتله الجسم الساقط m. ولو استخدمنا القيم المعروفه لكتله الأرض M و ثابت الجذب العام G ونصف قطر الأرض r، سنحصل على:

$$a = g = 9.8\, m/s^2$$

وهذه هي القيمه العمليه المقاسه لعجله الجاذبيه الأرضيه! ونحن رأينا هذه القيمه عندما كنا نتحدث عن أعمال جاليليو، لكن بدون أن نعطيها المعنى الفيزيائي الموجود هنا.

لكن يجب أن تكون لنا وقفه هنا حول ماهية الكتله. عندما تدفع جسم صغير فانك تحركه بكل بساطه ومن دون أن تعاني. لكن اذا استخدمت نفس القوه لدفع جسم ثقيل فلن يتحرك. اذ تحتاج الى زيادة قوتك حتى يتحرك. في هذه الحاله نستطيع تعريف الكتله على انها مقياس لمقاومه الحركه أو التغير، ونطلق عليها مجازا "الكتله العطاليه". فالجسم الكبير لديه مقاومه عاليه لتحريكه والجسم الأصغر لديه مقاومه أقل. الأسم التقني في الفيزياء لهذه المقاومه يسمى بالعطاله الذاتيه Inertia. و يتعريف دقيق نقول؛ ان العطاله الذاتيه هي قدره الكتله على مقاومة التغير. لكن حسب قانون نيوتن في الجذب العام، يبدوا أن الكتله عباره عن مصدر للتأثير على الأجسام الأخرى. ان الكتله الكبيره -على ذمة نيوتن- تصدر شيئا هلامي يشبه المجال الكهربائي للشحنات يؤثر على الأجسام الأخرى القريبه منها. ان استجابه أجسامنا لهذه القوه الصادره من الأرض لا يتعلق أبدا بالكتله العطاليه لأجسامنا، لذلك لابد من تعريف آخر للكتله، أطلق عليه اسم "الكتله الثقاليه". هذه الكتله تتعلق بنداء قوة الأرض و ليس لها علاقه بمقاومه التغير. واذا قمنا بقياس الكتله العطاليه والثقاليه لجسم ما فان النسبه بينهما دائما ما تكون ثابته. وهذا يعني ان القوه العطاليه مساويه دائما للقوه الثقاليه. وحسب قول آينشتين:

(....فاذا صح ان الأرض تجذب أي جسم بقوه واحده فان الجسم الذي يمتلك أكبر كتله عاطله لابد ان تكون حركه سقوطه أبطأ من حركه الآخرين لكن الواقع غير هذا: ان كل الأجسام تسقط متصاحبه في الحركه؛ وهذا يعني أن القوى التي تجذب بها الأرض كتلا مختلفه يجب ان تكون مختلفه فيما بينها. لكن الأرض تجذب الحجر بقوه الثقل ولا تعلم شيئا عن كتلته العطاليه، أي أن "نداء" قوة الأرض يتعلق بالكتله الثقاليه. أما "استجابه" الحجر في حركته فتتعلق بالكتله العطاليه؛ وبما ان حركه "الاستجابه" واحده لدى كل الأجسام ـ كل الأجسام المتروكه معا تتصاحب اثناء السقوط ـ فلا مناص من استنتاج ان القوه الثقاليه تساوي القوه العطاليه. هذا ويوجز الفيزيائيون هذه المحاكمه بالعرض المتحذلق التالي: ان تسارع حركه الجسم في سقوطه الحر يكبر متناسبا مع كبر كتلته الثقاليه ويصغر متناسبا مع كبر كتلته العطاليه، وبما ان كل الأجسام تسقط بتسارع واحد فلابد أن تكون هاتان الكتلتان متساويتين)[4].

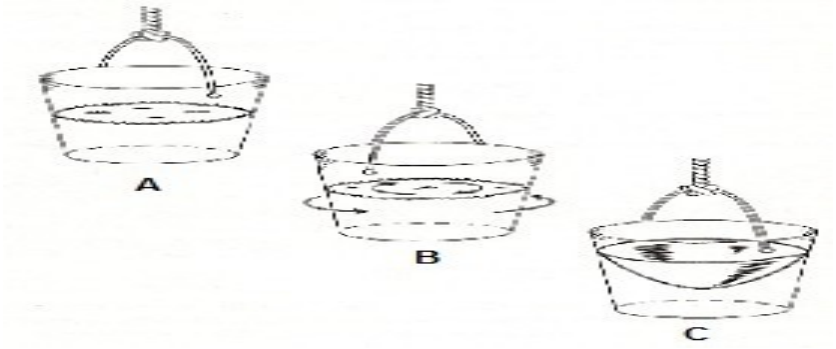
ومما هو جدير بالذكر ان ميكانيكا نيوتن لا تعطي معنى عميق لهذا التطابق بين الكتلتين. فهو من وجه نظر كلاسيكيه مجرد تطابق عرضي. لكن آينشتين لمح ببصيرته الفذه أهميه هذا التطابق وما يخفيه من معاني ضمنيه. لقد كانت فكره التطابق هذه أحد الأسباب الرئيسيه التي جعلته يخترع نظريه جديده للجاذبيه، تسمى النسبيه العامه. وهي نظريه شديدة التعقيد. لكنها تعطي في النهايه شيئا يشبه قانون الجذب العام مع تعديل طفيف في التناسب العكسي لتربيع المسافه. كذلك تقدم النسبيه العامه سلسله من التفسيرات الكونيه التي عجرت نظريه نيوتن عن تفسيرها.

حققت قوانين نيوتن انتصارا علميا ساحقا، فالرجل استطاع بواسطه ثلاثه قوانين فقط مع قانونه في الجذب العام أن يوحد ويفسر جميع أنواع الحركه في الكون، التي بدت لأول وهله بأن ليس لها علاقه ببعضها. كما أتت قوانين كبلر كنتيجه طبيعيه لقوانينه في الحركه والجاذبيه. لقد أصبحنا الآن قادرين على تحديد حركه الكواكب والنجوم والتنبؤ بمواعيد الكسوف والخسوف. وأصبحنا قادرين أيضا على اختيار الوقت المناسب للذهاب للشاطئ، لأننا نستطيع الآن التنبؤ بمواعيد المد والجزر. ان نهج نيوتن العلمي قد أثر بشكل كبير جدا على طريقه التفكير البشريه، وأصبحت كل معرفه بشريه تنهج نهجه. حتى العلوم الانسانيه التي لم تكن تعتبر علوما في السابق، أصبحت تبحث عن قوانين صارمه، حتى تتنبأ وتحكم السلوك البشري!

اثنان من اهم نتائج وتبعيات قوانين نيوتن ما يسمى بقانوني السببيه والحتميه. السببيه تعني أن لكل شيئ سبب. والحتميه تعني أن معرفه الشروط الابتدائيه لأي جسم في الكون، تجعلنا قادرين على تحديد مستقبله بكل دقه. لقد صار الكون أشبه بالساعه الآليه الضخمه. اذا عرفنا الى أين تشير عقاربه الآن، سنكون قادرين على معرفه اتجاه عقاربه في أي وقت لاحق. لقد تغنى الرياضي و الفيلسوف الكبير المركيز بيير سيمون لابلاس بمدأي السببيه و الحتميه. كان يؤمن بأنه لو كان هناك شبح قادر على جمع كل معطيات حركات الأجسام في الكون، من أكبر أجرامه الى أصغر و أدق ذراته، سيكون ذلك الشبح قادرا على اعطائنا حركات تلك الأجسام في أي وقت من المستقبل نريد! في الحقيقه هذا الادعاء لم يعد اليوم، بعد ظهور نظريه ميكانيكا الكم ومبدأ الارتياب. نحن غير قادرين على تحديد حاله الكون المستقبليه حتى من حيث المبدأ [4].

ومع كل ذلك ظهرت عده مشاكل بدت قوانين نيوتن غير قادره على تفسيرها. لماذا تعتمد الجاذبيه على المسافه؟ وما هي طبيعه تلك القوه أصلا؟ هل هي شيئ يشبه خطوط المجال الكهربائي والمغناطيسي؟ الأهم من كل ذلك، ما معنى الكون اذا كان كل شيئ في الكون يتحرك؟ هل الكون نفسه تنطبق عليه قوانين نيوتن؟ هل الزمان والمكان جامدين أم متحركين؟ لقد وجد نيوتن الاجابه على السؤال الأخير، في دلو ماء يدور بواسطة حبل!!

أجرى نيوتن التجربه البسيطه التاليه: أحضر دلو مملوء بماء وربطه بحبل، بعدها قام بتدوير الحبل ومن ثم تركه يدور (الشكل 9-1). سيدور الدلو، لكن يبقى الماء ساكنا، وبعد لحظات ينتقل تأثير دوران الدلو الى الماء فيدور (الشكل B)، ومن ثم يزداد تأثير دوران الدلو أكثر فأكثر حتى يتخذ الماء شكلا مقعرا (الشكل C). قد تبدوا لك التجربه اعتباطيه، وان نيوتن لم يعد لديه شيئ ليكتشفه فبدأ يلعب بالدلو! لكن نيوتن كان يدرك تماما مغزى ما يقوم به. كان يتسائل لماذا يتخذ الماء ذلك الشكل؟ الاجابه التقليديه هي: بسبب انتقال تأثير حركه الدلو الى الماء، مثلما تتغير أجسمانا في السياره عندما تلتف بقوه. لكن نيوتن كالعاده عنيد في أسئلته، يدور الماء بالنسبه لماذا؟ نقول بأنه يدور بالنسبه للدلو نفسه، فالدلو هو المرجع هنا. لقد فكر نيوتن بالطبع بهذه الاجابه، لكنه كان غير مقتنع بها. عندما ابتدأ الدلو بالحركه كانت هناك حركه نسبيه بين الدلو والماء، لأن الماء لم يتحرك فجأه، وبقي ساكنا. بعد ذلك بقليل بدأ الماء يدور مع الدلو، وبذلك لم تعد توجد حركه نسبيه بينهما. هنا تظهر المشكله، اذا استخدمنا الدلو كمرجع لنا سنحصل على عكس ما كنا نتوقع؛ عندما كانت هناك حركه نسبيه بين الماء و الدلو، كان سطح الماء ساكنا لا يتحرك، وعندما دار الماء مع الدلو (لا توجد حركه نسبيه بينهما) بدأ الماء يدور! اذن يدور الماء بالنسبه لماذا؟ تخيل انك تجري هذه التجربه في الفضاء الخالي، حيث لا وجود للشمس ولا القمر ولا النجوم ولا لأي شيئ آخر، فقط فضاء أسود بارد. لم يجد نيوتن الا اجابه واحده؛ يدور بالنسبه للفضاء المطلق البارد. هذا الفضاء ساكن مطلق، كل حركه وكل سكون لأي جسم في الكون بالنسبه له. عندما دار الدلو وظل الماء ساكنا، كان سكونه بالنسبه للفضاء المطلق، وعندما دار الماء كان



شكل (9-1)

(A) في البدايه يبدأ الدلو في الدوران بدون أن يدور الماء. (B) بعدها ينتقل تأثير الدلو الى الماء فيبدأ الماء بالدوران تدريجيا. (C) بعد فتره سوف يتقعر الماء بشده. كان نيوتن يتسائل لماذا لا يدور الماء مباشرتا مع الدلو؟ أيضا لماذا لا يتوقف الماء مباشرتا عن الدوران المتقعر بعدما يتوقف الدلو عن الدوران؟ استنتج نيوتن أن الماء لابد أن يدور بالنسبه للفضاء المطلق، لا بالنسبه للدلو نفسه.

دورانه أيضا بالنسبه للفضاء المطلق. يقول نيوتن:

(ان ارتفاع الماء حول حاشيه الاناء يدل على وجود جهد بذله الماء لكي يتمكن من الابتعاد عن مركز حركته. ويمكن أن نقيس، بواسطه هذا الجهد، الحركه الداريه الحقيقه المطلقه التي لهذا الاناء، تلك الحركه التي هي مناقضه تماما لحركته النسبيه. ذلك لا، في البدايه، عندما كانت الحركه النسبيه للماء أكبر، لم يكن هذا الماء يندفع ليبتعد عن محور حركته، ولم يكن يرتفع على حاشيه الاناء، بل لقد ظل مستويا هادئا، وبالتالي لم تكن له بعد أيه حركه دائريه حقيقيه ومطلقه. ولكن عندما أخذت حركه الماء بالنقصان بدأ يرتفع نحو حاشيه الاناء، مما يدل على ذلك الجهد الذي يبذله قصد الابتعاد عن محور حركته. ان هذا الجهد الذي يأخذ في الزياده يدل بدوره على ازدياد حركه الماء، حركته الدائريه الحقيقه. وأخيرا فأن هذه الحركه الدائريه الحقيقة تبلغ أقصاها عندما يكون الماء في حاله سكون نسبي داخل الاناء. ان الجهد الذي يبذله الماء قصد الابتعاد عن محور حركته لا يتوقف اذن على حركته بالنسبه الى ما يحيط به من الأجسام، وبالتالي فأن الحركه الدائريه الحقيقة لا يمكن تحديدها وضبطها بواسطة الحركه النسبيه تلك)[5].

لم يكن المكان بالنسبه لنيوتن هو المطلق فقط، فالزمان ايضا هو الآخر مطلق، ويصب بشكل دائم لا يؤثر عليه أي شيئ آخر. ان الزمان والمكان بالنسبه لنيوتن عباره عن اطاران مستقلان عن الأشياء التي توجد وتتحرك فيهما، انهما بمثابة خشبه المسرح.

لكن و كما تعلمنا من تاريخنا البشري، مهما بلغت عبقريه أي شخص في أي زمان، لا بد أن يترك فجوات في بنائه الفكري والنظري. كذلك علمنا التاريخ، أن لكل عبقري عبقري مضاد، مساوي له في المقدار و مضاد له في الاتجاه.

4 – ماخ في مواجه نيوتن

ربما يكون الفيلسوف والرياضي الألماني غوتفريد فيلهلم ليبنيز Gottfried Wilhelm Leibniz أكثر الشخصيات المساويه لنيوتن في العبقريه والمضاده له في الاتجاه. فالرجل أيضا كان صاحب معرفه موسوعيه جدا. وليس النزاع الذي كان بينه وبين نيوتن جدلي فحسب، بل كان نزاعا شخصيا كذلك. لقد كان بينهما صراع طويل جدا في أولويه اكتشاف علم التفاضل والتكامل. واليوم حكم المجتمع العلمي لكلاهما في اكتشاف ذلك العلم الهام. لم يكن ليبنيز هو وحده من انتقد أعمال نيوتن، فقد كان هناك الفيلسوف الانجليزي جورج بيركلي George Berkeley الذي سدد مجموعه من الحجج ضد فضاء نيوتن المطلق.

في الحقيقه لا أود الدخول بتفاصيل أعمال ليبنيز وبيركلي، لأن أعمالهما يطغى عليها الجانب الفلسفي كثيرا، وربما نخرج عن صلب الجدال العلمي. لكن النقطه التي أود التركيز عليها هنا هو نقدهما العلمي لفضاء وزمان نيوتن المطلقين. لقد جادل ليبنيز بأن الزمان والمكان ليس لهما وجود مستقل، فهما ليس أكثر من لغه للتعبير عن الأجسام والحوادث في الكون. ان الفضاء هو ما يجعلنا نميز بين الأشياء، لكن هو بنفسه ليس بشيئ. فلو غابت جميع الماده عن الكون لا يعود هناك أي معنى لما نسميه المكان و الزمان. هناك مثال رائع لتوضيح هذه الفكره قد قرأته في كتاب "نسيج الكون" The Fabric of The Cosmos للمؤلف الرائع برايان غرين. ان المكان أو الفراغ أو الفضاء مثل الترتيب الأبجدي للحروف الهجائيه، نحن لدينا في اللغه العربيه تسعة وعشرين حرفا، عندما نتحدث عن الترتيب الأبجدي فأننا نضع حروف قبل أخرى، **أ** قبل **ب** و **ب** قبل **ج**، و **ف** قبل **ق** وهكذا..... هذا الترتيت الأبجدي يصبح بلا معنى اذا لم يكن هناك حروف. ان الفضاء هو الترتيت الابجدي (اللغه) والماده في الكون هي الحروف. وكما غاب معنى الترتيب عندما غابت الحروف، فكذلك يفقد الفضاء معناه عندما تختفي الماده منه.

على الرغم من أن أفكار ليبنيز وبيركلي علميه، الا أن طابعهما الفلسفي كان ملازما لهما دائما. لكن بعد فتره من الزمن انتقل صدى أفكارهما الى المجتمع العلمي. و تحديدا في القرن التاسع عشر، حيث كان الفيزيائي وعالم النفس النمساوي ارنست ماخ Ernst Mach بانتظارها. لقد قدم ارنست ماخ مجموعه من الحجج ضد فضاء نيوتن وزمانه. كانت أفكاره جديده وخلابه جدا. وقد أثرت كثيرا على جيل من العلماء من بعده. وكان آينشتين أحد أشهر هؤلاء المتأثرين بأفكار ماخ. بل انه قد وصف نفسه بالتلميذ المخلص في نهايه رساله أرسلها الى ماخ.

جادل ماخ بان فضاء نيوتن المطلق يتعارض مع قانونه الثالث بشكل مباشر. لقد ادعي نيوتن أن عطاله الجسم (مدى مقاومته للتسارع)، كما الماء داخل الدلو، تكون بالنسبه للفضاء المطلق. اذا كان هذا صحيح، فبموجب قانون نيوتن الثالث يجب ان تنشأ ردة فعل من الفضاء المطلق نفسه. لكن الفضاء المطلق بالتعريف لا يتاثر بشيئ، انه خشبه المسرح الجامده وحسب.

أدرك ماخ ان النقص في فهم نيوتن يكمن في اعطاء الدلو (قبل الفضاء المطلق)، المرجعيه الوحيده الممكنه لحركه الماء عند دورانه. لكن هذه المحاكمه قد فشلت كما رأينا. لذلك انتقل نيوتن مباشرتا الى الفضاء المطلق كمرجع لحركة الماء. وهنا رآى ماخ قفزه في تفكير نيوتن. في الواقع هناك الكثير من المراجع من الممكن أخذها قبل الانتقال الى الفضاء المطلق كمرجع. فهناك المختبر نفسه، من الممكن أن ننسب حركه الماء الى جدران المختبر، أو أن ننسبها الى الأشجار الموجودة بجوار المختبر، أو بالنسبه للجبال خارج المختبر أو بالنسبه ل ..... جميعها من الممكن ان تستخدم كمراجع لتحديد حاله الماء. واذا

نوى نيوتن أن يجري تجربته خارج الأرض، في الفضاء الأسود البارد، ستكون النجوم البعيده هي مرجعنا كما اقترح ماخ.

اليك الان تجربه ماخ الذهنيه: تصور بأنك تائه في الفضاء لوحدك، لاترى الا سواد الفضاء أينما وليت ناظريك، ولا تشعر بثقل وزنك أبدا. وأثناء سباحتك في الفضاء فجأه أمسك بك شخص وقام بتدويرك حول نفسك بقوه واختفى. ماذا ستشعر؟ تبدو الاجابه التقليديه أنني سأشعر بقوه الدوران وبعد أن أتوقف لا أستطيع ان أسير بخط مستقيم. مثلما كنا نفعل ونحن صغار. لكن الاجابه الدقيقه ربما تكون مفاجأه، انك لن تشعر بشيئ اطلاقا، وكأنك لم تدر أصلا! كيف؟ لا معنى للحديث هنا عن الدوران أو عدم الدوران، لا معنى هنا للحديث عن السير بخط مستقيم بعد أن تتوقف، بل لامعني للتوقف أصلا. اذا، متى يكون هناك معنى للحديث عن الدوران أو السير بخط مستقيم أو التوقف؟ حتي نجيب على هذا السؤال، دعنى نجري التجربه مرة أخرى، لكن مع وجود نجم بعيد من الممكن أن تراه أثناء دورانك. عند تدور فجأه - ستتقيئ هذه المره - ستشعر بقوه الدوران وستشعر بأن يداك تتباعد عن بعضهما البعض، و السبب هو وجود ذاك النجم البعيد. حيث سترى النجم يدور بنفس قوة دورانك. لذلك ستشعر بدوار هذه المره، وبعدها لن تستطيع السير بخط مستقيم بالنسبه لهذا النجم. ان الحديث عن دوران أو سير بخط مستقيم أو توقف، تكون جميعها بالنسبه لشئ ما. اذا فقدنا هذا الشيئ علينا أن ننسب الحركه الي شيئ آخر. واذا فقدنا كل شيئ، لا يعود هناك معنى للحركه أو السكون أو التوقف. قد يخطر ببالك الآن أن تجري هذه التجربه في غرفتك وتطفئ جميع الأنوار تماما. هذا صحيح، لكن عليك ان تتخلص من احساسك بقوه جذب الأرض لك، وتتأكد بأن لا يصدر أحدا ما صوتا ما. فالصوت من الممكن أن يعتبر مرجعا.

نصل من تجربه ماخ الذهنيه الى استنتاج مهم جدا يسمي مبدأ ماخ. ان القوه التي نشعر بها أثناء الدوران تتناسب مع كميه الماده الموجوده في الكون. عندما تكون هناك نجمه واحده ستشعر بقوه ضعيفه، وعندما تكون هناك نجمتين ستشعر بضعف القوه، وعندما تكون هناك كميه من الماده مساويه للكميه الحاليه الموجوده الآن في الكون، فيمكنك أن تترك الكتاب قليلا، وتدور حول نفسك بقوه لتحدد كميه القوه التي ستؤثر عليك.

نعود الآن من رحلتنا الفضائيه الي دلو نيوتن. حسب ماخ يكون التقعر الحاصل للماء أثناء دورانه لا ينشأ بسبب دوران الماء بالنسبه للفضاء المطلق، بل ينشأ بسبب دوران الماء بالنسبه لكافة الأجسام الأخرى في الكون. لذلك أكد ماخ الحصول على نفس التقعر اذا لم يدر الماء ودارت حوله جميع الماده التي في الكون بنفس معدل الدوران. بهذه الطريقه نستطيع التغلب على التعارض بين الفضاء المطلق وقانون نيوتن الثالث. عندما يدور الماء (فعل) يتقعر (رد فعل) بسبب الماده الموجوده في الكون، وعندما يكون الماء ساكنا وتدور حوله جميع الأجسام في الكون بنفس المعدل (فعل) فانه يتقعر أيضا (رد فعل). واذا لم تكن هناك

ماده في الكون، فان الماء لن يدور أبدا مهما كانت قوه اللف. وكلما زادت الماده في الكون، زاد معدل التقعر.

رغم خلابة فكرة ماخ حول الفضاء، تبقي هناك صعوبات عده في فكره. كيف تشترك الأجسام البعيده جدا كالنجوم مع الكتاب الذي بين يديك في التأثير عليك عندما تتحرك؟ في الحقيقه لا نملك الى اليوم اجابه نهائيه قاطعه بالدليل حول ماهية الفضاء. قد يعود فضاء نيوتن المطلق على الساحه من جديد كما عادت نظريته حول جسيمات الضوء علي يد آينشتيتن بعد ثلاثة قرون. ان أفضل نظريه لدينا اليوم حول طبيعه المكان والزمان هي النظريه النسبيه العامه. في الحقيقه تعطي هذه النظريه صفه الشيئ للمكان والزمان كالسجاده تمام. فهما ليس مجرد لغه للتعبير عن الأشياء الموجوده في الكون كما اقترح ليبنيز و بيركلي ومن ثم ماخ. انهما ينكمشان ويتمددان علي حسب توزيع الماده والطاقه في الكون.

ملاحظات الفصل الأول

1. الاسم الأصلي لهذا الكتاب هو "الاطروحه الرياضيه". أما كلمه المجسطي فهي كلمه عربيه. فبعدما ترجمه حنين ابن سحاق الى العربيه، تمت ترجمته الى اللاتينيه ومن ثم الى باقي لغات العالم باسم المجسطي.
2. ولد جاليليو في عام 1564 في مدينه بيزا، احدى المدن الايطاليه القديمه.
3. آلبرت آينشتاين / ليوبولد انفلد، **تطور الأفكار في الفيزياء من المفاهيم الأوليه الى نظريتي النسبيه والكم**، ترجمه عن الفرنسيه: د. أدهم السمان، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الأولى، 1992.
4. حول هذا الموضوع يمكنك الاطلاع على كتابنا **"ميكانيكا الكم بين الفلسفة والعلم"** المنشور في الأقسام العلميه، على موقع الشبكه الاستراتيجيه:
   http://www.t1t.net/index.php?action=view&id=729
5. أخذنا هذه الترجمه من كتاب، **مدخل الى فلسفة العلوم، العقلانيه المعاصره وتطور الفكر العلمي**، الدكتور محمد عابد الجابري (بيروت: مركز دراسات الوحده العربيه، الطبعه السادسه، 2006).

الفصل الثاني

الطريق الى الميكانيكا النسبيه

"لا يمكننا حل مشكله ما باستخدام نفس العقليه التي أنشأتها"

آلبرت آينشتين

1 – الأثير وسرعه الضوء

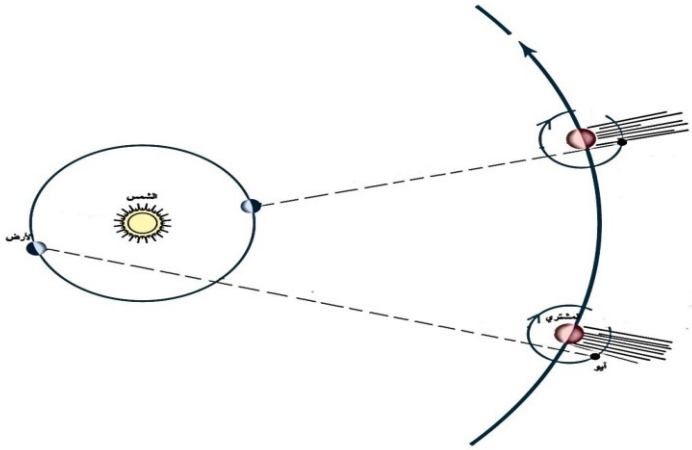
هل تأملت الضوء يوما، لا شك أن معظمنا قد دارت في رأسه أسئله حول طبيعه الضوء. أنا شخصيا أتذكر عندما كنت صغيرا كان والدي يأخذنا في نزهه عند نهايه كل اسبوع، و كنت دائما ما أشاهد أضواء أعمدة النور التي تملأ الشوارع و أضغط على عيني و أنا أراها لتبدو و كأنها صادره من عيني، مثل الشخصيات الشريره في أفلام الكرتون التي تصدر الأشعه من عينهم. وعندما كبرت قليلا وصلتني هديه - لا أذكر من أهداني اياها – وكانت عباره عن جهاز ليزر صغير. كان المدهش بالنسبه لي قدرت ذاك الجهاز على التوصيل لمسافات بعيده جدا. كنت دائما ما أذهب الى سطح المنزل وأضعه على جميع أنواع السيارات الماره أمامي، وبمجرد أن أضغط على الزر يصل مباشرتا الى السياره. هذا ما نلاحظه في حياتنا اليوميه، تأمل الضوء الصادر من مصباح غرفتك عندما تدير مفتاح الكهرباء؛ هل ترى الضوء يتحرك ليضرب جدران غرفتك؟ بالطبع لا، ان الضوء يبدوا وكأنه شيئ ينتقل آنيا، لا يحتاج الى وقت حتى ينتقل. أكثر من ذلك يبدوا وكأنه شيئ غير مادي أبدا. في الحقيقه ان الضوء كيان معقد جدا من الناحيه الفيزيائيه، والى يومنا هذا مازال غير مفهوم بشكل كامل. ان نظريه الكم والنظريه النسبيه قد ولدتى نتيجة الاصرار على فهم ماهية الضوء.

اعتقد القدماء أن الضوء عباره عن كيان جامد آني، لا يحتاج الى وقت حتى ينتقل من مكان لآخر. لكن بعد فتره نشأ خلاف بين العلماء حول سرعه ذاك الكيان المستبد. و بدأت تظهر آراء تشكك بالانتقال الآني لسرعة الضوء. كان أحد هؤلاء المشككين بسرعه الضوء شخص متشكك جدا، بل انه شخص شكك بوجود نفسه، وراح يبرهن على وجودها، ومن ثم وجدها في عبارته الشهيره (أنا أفكر اذن أنا موجود). لا شك أنك عرفته، رينيه ديكارت Descartes. أما المشكك الآخر فلا أحد غيره، مرة أخرى، جاليليو جاليلي.

لم يشكك جاليليو بسرعه الضوء وحسب، بل راح كعادته يفتتش لايجاد طريقة لقياس سرعتة. وفي احدى الليالي المظلمه خرج جاليليو مع أحد مساعديه، وطلب منه أن يقف على قمه تله تبعد مسافه ثلاثه أميال عن مكان وقوف جاليليو في التله المقابله. كان لدى كل واحد منهما فانوسا مع غطاء. رفع جاليليو غطاء فانوسه، وانتقل الضوء من فانوس جاليليو الى المساعد، وبمجرد ابصار المساعد للضوء رفع الغطاء عن فانوسه، لينتقل الى جاليليو. كان الهدف من ذلك هو قياس الزمن الكلي من لحظه صدور الضوء من فانوس جاليليو حتى اللحظه التي أبصر بها الضوء الصادر من فانوس مساعده. كان جاليليو قد قاس المسافه بين التلتين بدقه من قبل، ولم يبقى له سوى عمليه رياضيه بسيطه، وهي قسمة المسافه على الزمن حتى يحصل على سرعة الضوء. لكن كلما أعادوا التجربه وجدوا قيما مختلفه لسرعه الضوء. يبدوا أنك أدركت السبب؛ ان الزمن الذي يدرك فيه جاليليو أو مساعده الضوء القادم

من أحدهما كي يرفع فانوسه، كبير جدا بالنسبه للزمن الذي يستغرقه الضوء حتى يقطع تلك المسافه. تصور لو تأخر أحدهما ثانيه واحده في ردة فعله، سيدور الضوء سبع مرات حول الأرض، وهم لا يعلمون! لكن مع هذا لا نستطيع التقليل من شأن تجربة جاليليو. وقد أظهر لنا مره أخرى ملاحظاته السحريه، اذ طلب من مساعده أن يتدرب على زمن رد الفعل، وأكثر من ذلك أوصى باجراء التجربه على مسافه أكبر من سابقتها. وبالفعل أعادا التجربه على بعد ثلاثه أميال ومن ثمه سته. لكن بسبب سرعه الضوء الخياليه لم يستطع أن يحددها. واستنتج أن الضوء ان لم يكن آنيا فهو بالتأكيد ينتقل بسرعه كبيره جدا. ولأن العلم يسري في اتجاهات غير متوقعه، فقد كانت أقمار المشتري الأربعه التي اكتشفها جاليليو بنفسه هي مفتاح الفلكي الدانمركي رومر Roemer ليعطينا أول قياس دقيق لسرعة الضوء.

في عام 1676، درس رومر أوقات خسوف أقرب أقمار كوكب المشتري المسمى آيو Io. ووجد أن الخسوف يحدث كل 42.5 ساعه تقريبا. أي أن الزمن الدوري الذي يستغرقه آيو حتى يدور حول المشتري هو 42.5 ساعه. لكن بعد سته أشهر أعاد قياس الزمن الدوري للقمر آيو ووجد أن هناك فرق قدره 1000 ثانيه عن الزمن الذي قاسه قبل سته أشهر. يمكننا فهم هذا التأخير من (الشكل1-2). اذ يبين لنا الجزء الأيسر مكان الأرض في وضعين مختلفين حول الشمس، وفي الجزء الأيمن نرى كوكب المشتري وقمره بعد خسوفه مباشرتا. كلما اقتربت الأرض من كوكب المشتري أصبح الزمن الدوري لقمر المشتري أقل فأقل، وكلما ابتعدت الأرض صار الزمن الدوري أطول فأطول، حتى يبلغ أقصى فرق بينهما 1000 ثانيه كما قاسها رومر[1]. لم يكن أمام رومر الا حل واحد لتفسير ذلك الفرق؛ ان فرق الألف ثانيه تلك، عباره عن الزمن الذي يستغرقه الضوء الصادرمن قمر المشتري في قطع المسافه الاضافيه وهي قطر مدار الأرض حول الشمس (انظر الشكل نفسه). في الحقيقه كان رومر مخطئا بفارق قدره خمس دقائق عن الزمن الذي يستغرقه الضوء حتى يقطع قطر مدار الأرض حول الشمس. وكانت القيمه المعتقده أيام رومر أن قطر المدار الأرضي يبلغ 172 ألف ميل، بينما قيمته الصحيحه تبلغ 186 ألف ميل. لذلك قدر رومر سرعه الضوء بحوالي 130.000 ميل في الثانيه، بينما تبلغ قيمته الحقيقيه 186.000 ميل في الثانيه. كانت طريقه رومر في قياس سرعه الضوء أولى الطرق الفلكيه الدقيقه لحد ما لقياس سرعه الضوء. لم تلاقي قبولا واسعا بعدما نشرها، فالسرعه التي قاسها كبيره جدا، ولم يكن باستطاع أحد في ذاك الزمان أن يتصور شيئا ما يتحرك بهذه السرعه الرهيبه. لكن فكرته نالت التقدير بعد خمسين عاما، حينما أتى الفلكي الانجليزي جيمس برادلي James Bradley ليعطي تقديرا أعلى دقه لسرعة الضوء من السرعه التي قاسها رومر. وقد استخدم أيضا طريقه فلكيه، لكنها مختلفه تماما عن طريقه رومر[2]. لقد وجد أن سرعه الضوء تساوي تقريبا 188.000 ميل في الثانيه، وهي كما نرى قريبه جدا من القيمة الحاليه المعروفه.

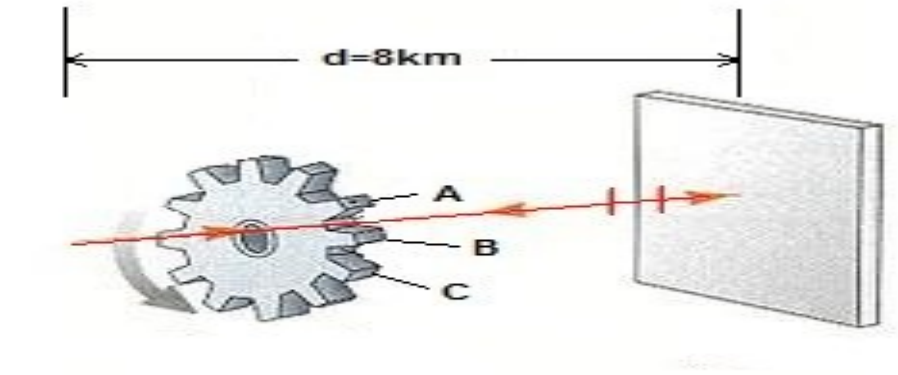


شكل (1-2)

طريق رومر في ربط عدم الانتظام في رصد أوقات خسوف قمر المشتري آيو مع سرعه الضوء.

وفي عام 1849 استطاع الفيزيائي الفرنسي أرماند فيزو Armand Fizeau من قياس سرعه الضوء داخل المختبر، بعيدا عن الطرق الفلكيه. يوضح (الشكل 2-2) رسم تخطيطي للطريقه التي ابتكرها فيزو لقياس سرعه الضوء. تتمثل الفكره في ارسال ضوء عبر سنين متجاورين الى المرآه ومن ثم عودته ليتم رصده بعد اكمال رحلته. اذا كانت العجله لا تدور سيمر الضوء عبر السنين المتجاورين ويقطع رحلته المكونه من 8 كيلومترات ذهابا الى المرآه ويعود ايابا مارا بنفس السنين مرة اخرى. لكن ماذا سيحدث لو حركنا العجله؟ اذا كانت حركه العجله بطيئه سيغادر الضوء من السنين (A) و (B) ومن ثم يعود مرة اخرى الى الراصد. لكن اذا كان السن (B) في مواجهة الضوء فلن يمر الى الراصد. الآن، اذا كانت حركه العجله تدور بسرعه كافيه، فأن الضوء سيعود وتكون السن (B) بعيده عن طريقه ليمر بين السنين (B) و (C). لقد بدأ فيزو بأن جعل العجله ثابته، ومن ثم أخذ يزيد ويزيد من سرعتها، حتى أدرك أن الضوء يستغرق لقطع مسافه الستة عشر كيومترا نفس المده التي تستغرقها المسافه بين السنين (A) و (B) حتى تحل محلها المسافه التي بين السنين (B) و(C). وبمعرفه المسافه التي قطعها الضوء، ومعدل سرعه دوران القرص والمسافه بين الأسنان، تمكن فيزو من قياس سرعه الضوء. وقد وجدها 194.600 ميل في الثانيه. وعلى الرغم من وجود نسبه خطأ فيها الا أنها كافيه بالنسبه للامكانيات المتاحه في ذاك الوقت. تذكر ان هذه أول طريقه أرضيه غير فلكيه، و الضوء خلال ثانيه واحده يدور حول الارض سبع مرات! و بعد تجربه فيزو الأرضيه ابتكرت عده طرق لقياس سرعه

الضوء. ومن أشهرها الطريقه التي أجرها العالم الأمريكي ألبرت مايكلسون[3]، حيث استخدم عده مرايا تدور بسرعه كبيره. وجاء تقديره لسرعه الضوء بمنتهى الدقه مع القيمه الحاليه، حيث لم تتعدى نسبة الخطأ في تجربته 1%. ومن بعد ذلك تم قياس سرعه الضوء عده مرات. والقيمه المقبوله لدينا اليوم هي 186.000 ألف ميل في الثانيه أو 300.000 كيلومتر في الثانيه أو 300000000 متر في الثانيه. وعادة ما يرمز لسرعه الضوء بالرمز c.

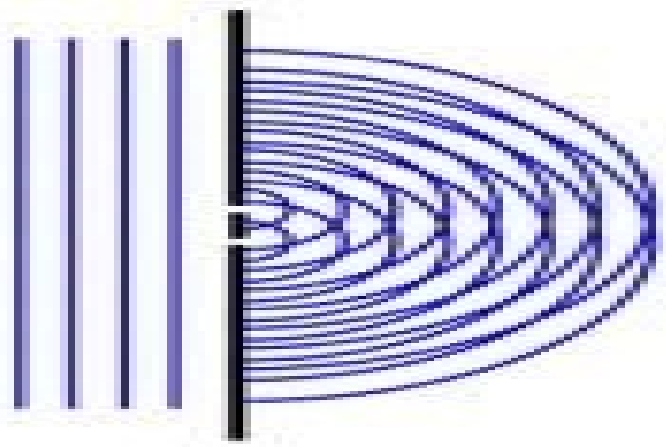


شكل (2-2)

طريقه فيزو الأرضيه لقياس سرعه الضوء.

لكن ما هي طبيعه ذلك الضوء الذي نقيسه. في الحقيقه منذ زمن نيوتن و كريستيان هويغنز Christian Huygens لا يوجد الا فريقان يتصارعان في تقديم الحجج و الأدله لاثبات وجهة نظرهم حول طبيعة الضوء. الفريق الأول بقياده نيوتن يؤمنون بالرأي الذي اقترحه نيوتن بأن الضوء عباره عن سيل من الجسيمات الماديه الدقيقه. الفريق الثاني يتبعون رأي روبرت هوك Robert Hooke وكريستيان هويغنز القائل بأن الضوء هو نوع من الأمواج. في البدايه تم تفضيل النظريه الجسيميه على الموجيه. ربما لمكانه وقدرات نيوتن العلميه الكبيره. لقد كان لنيوتن أعمال كثيره في علم البصريات، وكان قادرا على شرح خواص الضوء من خلال نظريته الجسيميه بكل يسر وبساطه. ولكن ومع بدايه القرن التاسع عشر، بدأت تتألق النظريه الموجيه على الجسيميه وذلك بفضل أعمال توماس يونغ Thomas Young و اوغسطين فرسنل Augustin Fresnel. ان أهم تجربه اجريت للتأكيد على أن الضوء موجه، تلك التي أجرها يونغ والمعروفه باسم تجربة ذات الشقين. تصور بأن هناك حاجز به فتحتين بينهما مسافه معينه، و أن هناك موجه قادمه نحو

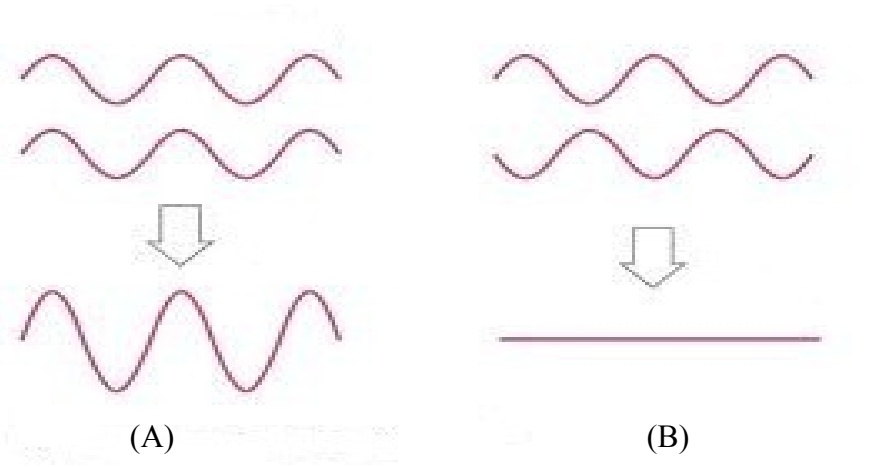
الشقين (الشكل 3-2). ماذا تتوقع أن يحدث بعدما تمر الموجات المائيه؟ بعدما تصطدم الموجات بالحاجز ستولد الفتحتين موجات جديده تأخذ بالانتشار شيئا فشيئا. هذه الموجات الصادره من كلا الفتحتين تتداخل مع بعضها البعض، ولك أن تتصور من (الشكل 4-2) ما يحدث عندما تكون قمة الموجه الصادره من الفتحه الاولى متزامنه مع قمة الموجه الصادره من الفتحه الأخرى. سينتجان موجه ذات ذروة أكبر. وعندما تكون قمة الموجه الصادرة من احدى الفتحتين متزامنه مع قاع الموجه الأخرى ستفنى كل منهما الأخرى ولن تكون هناك أي موجه جديده. انظر (الشكل 4B-2). لو استبدلنا الآن الموجات المائيه بأشعه مصباح ضوئي ووضعنا شاشه لرصد الضوء بعدما يتداخل من الفتحتين، سنجد أن الشاشه تتكون من خطوط مضيئه (تداخل بناء) وأخرى مظلمه (تداخل هدام)، كما في (الشكل 5-2).



شكل (3-2)

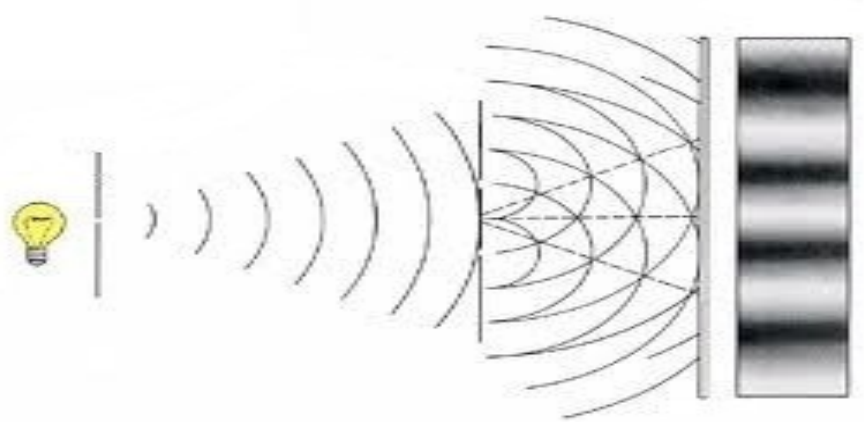
ظاهرة تداخل الامواج في تجربة ذات الشقين.

لا يمكن تفسير هذه الظاهره باستخدام النظريه الجسيميه، ولا يمكن تفسيرها الا اذا اعتبرنا أن الضوء عباره عن موجات. وبعد أعمال اوغسطين فرسنل و آخرين حول ظواهر أخرى للضوء كالاستقطاب وظاهرة انكسار الضوء في الأوساط الأكثر كثافه من الماء، صار من الصعب القبول بالنظريه الجسيميه أو حتى مناقشتها وبدأ النسيان يدب فيها شيئا فشيئا حتى نسيت بعد ذلك كليا. لكن ماذا تعني الموجه؟ وكيف تنتشر في حالة الضوء؟



شكل (2-4)

(A) عند التقاء قمه موجه مع أخرى سيكون الناتج موجه ذات ذروه أعلى من كليهما. (B) عند التقاء قمة موجه مع قاع الأخرى ستهدم كل منهما الأخرى ولن نحصل على أي موجه جديده.



شكل (2-5)

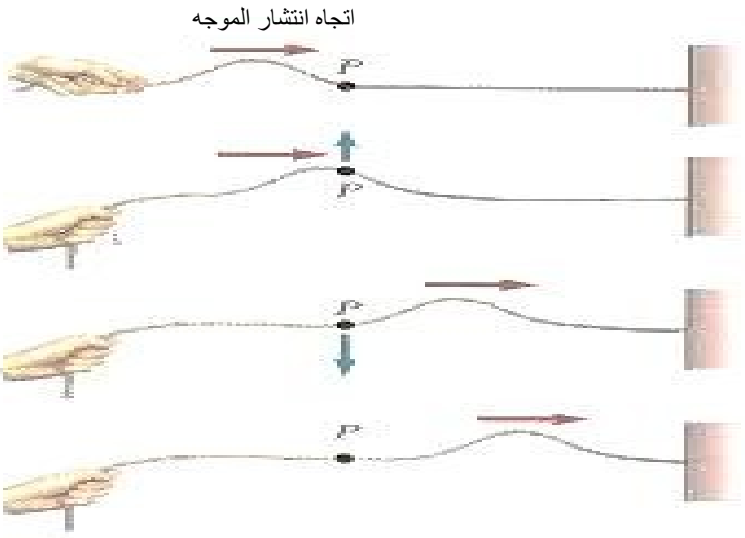
عند اسقاط الضوء على حاجز به شقين ستتداخل الأمواج الضوئيه مع بعضها، وتنتج نموذج التداخل على شاشه الرصد، حيث نجد خطوط مضيئه واخرى داكنه.

سأطلب منك اجراء هذه التجربه البسيطه. أحضر حبلا وأمسكه من طرف واربط الطرف الآخر بالحائط . بعدها قم بهز الحبل كما في (الشكل 6-2). تأمل الموجه، ما الذي يتحرك منذ أن صنعت الموجه حتى اصطدامها بالحائط؟ هل تنتقل الموجه؟ حسنا ضع لونا مميزا على أي نقطه في الحبل و أعد التجربه. ما الذي حدث للنقطه الملونه؟ لا شيئ، فقط ارتفعت ومن ثم هبطت الى مكانها. ان الأمواج لا تنتقل بل كل ما يحدث هو أن النقاط التي على الحبل تبدأ بالصعود والنزول ومن ثم تبدأ النقاط التاليه بالصعود والنزول ثم الثالثه وهكذا.... يشبه هذا بالضبط ما يقوم به مشجعي كرة القدم عندما يقوموا بحركه الأمواج المكسيكيه. اننا نراهم بالتلفاز يشكلون موجه كامله، دون أن يتحرك أحد المشجعين من كرسيه. الا اذا كان من مثيري الشغب فهذا موضوع آخر! ان هذا النوع من الموجات يسمى بالموجات المستعرضه Transverse wave حيث تكون حركه الجسيمات عموديه على اتجاه انتشار الموجه (الشكل 6-2). أما النوع الآخر من الموجات فيسمى بالموجات الطوليه Longitudinal wave ويمكنك أن تجربها أيضا، لكن استبدل هذه المره الحبل بزنبرك وقم بهزه الى الأمام ومن ثم الى الخلف (الشكل 7-2) ستلاحظ أن اتجاه حركه جسيمات الزنبرك في نفس اتجاه انتشار الموجه.

لقد صنعت موجات لتوك بواسطه الحبل. الآن اريد منك أن تصنع تلك الموجات بدون استخدام الحبل؟! يبدوا أن هذا الكلام لا معنى له أساسا. وهذه نقطه مهمة جدا في ميكانيكا الأمواج. نقول بلغه الفيزياء: لا توجد هناك موجه بدون وسط يحمل تلك الموجه. لا يمكن أن نصنع موجات حبليه بدون حبل و أن نصنع موجات مائيه بدون ماء. حتى الصوت لا ينتقل في الفراغ. ان الصوت عباره عن موجه طوليه، حيث تتخلخل جزيئات الهواء الى الأمام والى الخلف، ومن ثم يضرب ذاك التخلخل طبله اذنك فتسمع ما تسمع. لذلك يجب على رواد الفضاء أن يجدوا وسيله أخرى للتفاهم عندما يسبحون في الفضاء. قد يبدوا هذا بديهيا، ولكن عليك الآن أن تجاوب على هذا السؤال: اذا كان الضوء موجه، فما هو الوسط الذي يحمل الضوء حتى يتموج فيه؟ لا تقلل من قدرات نفسك اذا لم تستطع الاجابه على هذا السؤال، لأنه سؤال صدع رؤوس عباقرة القرن التاسع عشر حتى بدايه القرن العشرين.

بعدما ازدادت الأدله على صحه نظريه الضوء الموجيه، زادت الحاجه لذلك الوسط الحامل للموجات الضوئيه. لم يكن بامكان العلماء في ذاك الوقت أن يتخلو عن النظريه الموجيه لصالح الجسيميه حتى يرتاحوا من ذلك الوسط الحامل للموجات الضوئية. لذلك اخترعوا وسطا تتموج فيه الموجات الضوئيه أطلقوا عليه اسم (الأثير). ومع بداية اختراع ذلك الوسط تبدأ قصه النظريه النسبيه.

ما هي طبيعه ذلك الأثير؟ في الأصل تم اختراعه كوسط ليتموج فيه الضوء. لكن بعد ذلك أعطوه صفات كثيره جدا، فقالوا انه يملأ كل الكون، ويوجد داخل الأجسام الماديه، وتسبح فيه الكواكب والنجوم والمجرات، وكذلك تم افتراض أنه عديم الكتله. في البدايه تم اعتبار أن



شكل(6-2)

ان الموجات ليست شيئا يتحرك، بل كل ما يحدث هو أن النقاط التي تشكل الحبل تصعد ومن ثم تهبط. يوجد على الشكل نقطه واحده، عليك أن تتخيل بعد ذلك النقطة التي تليها كيف تصعد وتهبط وهكذا.. يسمى هذا النوع من الأمواج بالموجات المستعرضه، حيث تكون حركه الجسيمات عموديه على اتجاه انتشار الموجه.

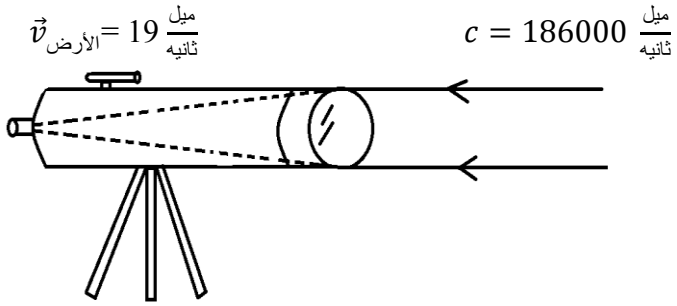
شكل (7-2)

تكون الموجه طوليه، عندما يكون اتجاه حركه جسيمات الزنبرك في نفس اتجاه انتشار الموجه.

ذلك الأثير رقيق جدا، حيث تعبر المواد فيه بسلاسه، تماما مثل السمكه التي تسبح خلال ماء الحوض بدون أن تعكر الماء نفسه. وافترضوا كذلك أنه ساكن سكونا مطلقا وكل حركه مطلقه لأي جسم في الكون ستكون بالنسبه لهذا الأثير المطلق السكون. لو كان نيوتن حيا، فكم سيكون سعيدا بهذا الأثير الساكن. لا شك بأنه كان سينسب حركه الماء في دلوه الى هذا الأثير!

الآن بعد افتراض ذلك الأثير ومواصفاته، بدأ العلماء في السؤال عن كيفيه ابتكار الطرق التجريبيه لاكتشافه وتعيين كثافته. لكن كيف ستكون الطريقه يا ترى؟ بما أن الأثير ساكن والأرض متحركه فلابد أن تكون هناك حركه نسبيه بينهما. ويجب أن تعتمد سرعه الضوء على هذه السرعه النسبيه بين الأثير و الأرض، لأن الضوء يعتمد على الأثير في انتشاره. تخيل أنك في باخره تتحرك في عرض البحر، ولا يوجد هناك أي شيئ لتسند حركت الباخره بالنسبه له. كيف ستقيس سرعه واتجاه الباخرة؟ من الممكن أن تضع عصى في البحر أثناء سير الباخره وترى كيف يتكون تيار على جانبي العصا الى الجهه المعاكسه لاتجاه حركه الباخره. بعدها ستعرف أن سرعه الباخره تساوي سرعه التيار على جانبي الباخره، وستعلم بالطبع في أي اتجاه تسير. كانت فكره العلماء لقياس سرعه الأثير تشبه الفكره السابقه. فالأرض هي الباخره والأثير هو البحر، واذا استطعنا تحديد سرعه الأرض بالنسبه للأثير، سيكون هذا انتصارنا في الحصول على الأثير تجريبيا. لكن مهلا! ليس بالامكان اجراء هذه التجربه لاستشعار الأثير. هل سنصنع عصا تخرج من الكره الأرضيه ونقيس بواسطتها سرعه واتجاه الأرض بالنسبه للأثير! بالطبع لا، لكن يبدوا أن العلماء لهم بالفعل عزيمة لا تلين وربما كان فرانسوا آراغو Francois Arago من هذا النوع من العلماء.

تصور بأنه لدينا تلسكوبا على الأرض، وأن هناك ضوء يأتي من نجم موجود في اتجاه الأرض، كما في الشكل (8-2). لنفرض في البدايه أن الأرض ساكنه عبر الأثير، و أن هناك شعاعين من الضوء يدخلان الى التلسكوب ومن ثم ينكسران بفعل العدسه. ان مقدار انكسار الضوء يعتمد على ما يسمى بقرينه الانكسار Refractive Index. وهي ببساطه عباره عن نسبه سرعه الضوء في الفراغ الى نسبة سرعته في وسط آخر (الزجاج في حالتنا هذه) ويرمز له بالرمز n. فلو كانت مثلا سرعه الضوء في الفراغ تساوي 3 وسرعته في الزجاج 2 فان قرينه انكساره تساوي $\frac{3}{2}$. لكن نحن نعلم أن الأرض تتحرك؛ لذلك سيتغير مقدار قرينه الانكسار على حسب سرعة الأرض في الأثير. افترض أن سرعة الأرض تساوي 1 نحو اليمين. ستتغير سرعه الضوء القادمه من النجم الى 1+3 في الفراغ و الى 1+2 في الزجاج. وبالتالي سيتغير مقدار قرينه الانكسار من $\frac{3}{2}$ الى $\frac{4}{3}$. وهذا لابد أن يؤدي الى تغير زاويه انكسار الضوء. في الحقيقه تعتمد زاويه الانكسار تلك على سرعة الأرض عبر الأثير وسرعه الضوء. لذلك من الممكن قياس سرعة الأرض عبر الأثير من خلال



شكل (8-2)

التغير المتوقع في زاويه انكسار الضوء نتيجه لحركه الأرض عبر الأثير.

معرفه سرعه الضوء وزاويه الانكسار. وعندما أجرى آراغو هذه التجربه لم يجد أي انحراف جديد للضوء بالمره! لقد كانت نتيجه محزنه، ان حركة الأرض عبر الأثير لم تؤثر أبدا على زاويه انكسار الضوء. لكن بعدما وصلت نتيجه التجربه الى فرسنل، خرج بتفسير فريد من نوعه. لقد افترض أن هناك مقدار اضافي للأثير محجوز داخل قرينه الانكسار وجميع المواد الأخرى. وعندما تتحرك قرينة الانكسار مع الأرض يتحرك معها ذلك الأُثير الاضافي بداخلها، لكن بدون أن يؤثر على الأثير الساكن الموجود في الفراغ من حوله. لهذا السبب اقترح فرسنل أن سرعة انتشار الضوء في المواد تعتمد على كثافه الوسط وكميه الأثير بداخله. لذلك أضاف حد آخر الى سرعه انتشار الضوء في الماده يسمى معامل فرسنل للجر Fresnel drag coefficient. فسرعه الضوء في زجاج قرينه انكساره n، بدون اضافه كميه جر الأُثير تساوي:

$$v_n = \frac{c}{n}$$

ومع اضافة معامل فرسنل تصبح المعادله السابقه كالتالي:

$$v_n = \frac{c}{n} + v(1 - \frac{\rho_e}{\rho_g})$$

حيث v سرعه الموشور الزجاجي بالنسبه للأُثير، ρ_e كثافه الأُثير في الفراغ، ρ_g كثافه الأُثير في الموشور الزجاجي. ولأن كثافة الأثير تعتمد على قرينة الانكسار فيمكن كتابة المعادله السابقه كالتالي:

$$v_n = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

في الحقيقه لقد فسرت هذه المعادله النتيجه السلبيه لتجربه آراغو. وبعد فتره تحقق فيزو من صحة هذه المعادله. حسب فكرة فرسنل سينسحب الأثير مع الأرض أثناء حركتها، وبالتالي لا يمكن قياس سرعه الأثير بالنسبه للأرض. تخيل ان هناك سمكه تتحرك داخل حوض ماء، وفي أثناء حركتها يتحرك الحوض بنفس سرعتها، بهذه الطريقه لا يمكن تحديد سرعة السمكه بالنسبة لماء الحوض. لكن ماذا يعني هذا؟ هل يعني أن الأثير موجود ولا يمكن تحديده؟ لقد أجريت عده تجارب لقياس سرعة الأرض بالنسبه للأثير، وجائت جميعها سلبيه استنادا الى فكرة فرسنل. في الواقع لقد كانت فكره فرسنل في قمة الدهاء لكنها غير صحيحه. ان الفكره الذكيه في صيغة فرسنل تكمن في المحافظه على النسبه بين سرعة الضوء والأرض بحيث تعطي دائما قيمه معينه ثابته. تذكر بأن زاوية انكسار الضوء الداخل الى التلسكوب تعتمد على قرينه الانكسار n، وهذه ليست سوى نسبة سرعة الضوء في الفراغ الى سرعته في وسط ما. تصور أن سرعة الضوء داخل التلسكوب تساوي مثلا 4 وسرعة الارض (وبالتالي التلسكوب) تساوي 2، ستكون النسبه بينهما 4/2=2. الآن لو زادت سرعة الأرض الى 3 فيجب أن نزيد سرعة الضوء - حسب معادله فرسنل - داخل التلسكوب الى 6 حتى تصبح النسبه بينهما 6/3=2. وهي نفس النسبه السابقه! لا شك بأن حل فرسنل رغم دهائه بدى ترقيعيا بالنسبة الى مجموعه من فيزيائي ذاك الزمان. دعنى نتأمل قرينة الانكسار مرة أخرى؛ واضح من معادلة فرسنل أن مقدار الأُثير المحتجز يعتمد على قرينة الانكسار n. ولكن قرينة الانكسار تلك تعتمد على لون الضوء. فاذا كانت كمية الأثير المحتجز تعتمد على قرينة الانكسار، وقرينة الانكسار تعتمد على لون الضوء، فأن كمية الأُثيرالمحتجز تعتمد على لون الضوء أيضا! وهذا طبعا مستحيل. فيجب أن تكون كمية الأُثير ثابته داخل المواد ولا تعتمد على لون الضوء. ولكن مع هذا، كيف تكون معادله فرسنل صحيحه تجريبيا اذن؟ ألم يقم فيزو بالتحقق منها تجريبيا؟ سنعرف الجواب، ولكن يجب أن نتحلى بالصبر حتى نصل الى آينشتين.

لقد ظل البحث قائما عن الأثير، مسيطرا على عقول الفيزيائيين حتى حدثت ثوره في الفيزياء. انها ثوره بكل ما في الكلمه من معنى، تضاهي ثورة جاليليو ونيوتن الميكانيكيه. انها الثوره الكهرومغناطيسيه التي بدأت منذ فجر عشرينات القرن التاسع عشر واتضحت ملامحها النهائيه في بداية القرن العشرين. ستكون النظريه المغناطيسيه محطتنا قبل الأخيره للدخول الى الميكانيكا النسبيه. لذا أرجو أن تعيد استنظام عقلك و تشرب كوب قهوى حتى نكمل رحلتنا الى نهايتها. تذكر أنت من اختار أن يقرأ موضوع مثل النظرية النسبيه!

2 – هنا عصر الكهرباء

ما هي الكهرباء؟ لا شك أننا جميعا نعرف الكهرباء، سواء كنا محترفين بالفيزياء أو سباكين. نحن نعلم أن الكهرباء مقوم أساسي للحياه، وجميع أجهزتنا في المنزل وخارج المنزل تعمل على الطاقه الكهربائيه. وجميعنا تقريبا له قصه مع صعقات الكهرباء. أنا شخصيا أتذكر عندما كنت صغيرا، أردت أن أجعل جهاز النايتندو يعمل بالقوة، فقمت بغرس الموصل بالقوة في نقطه الكهرباء التي على الجدار، كان الموصل لا يعمل لكن رغبتي في انهاء لعبه سوبرماريو كانت لا متناهيه. ونتيجه اصراري على غرس الموصل بالقوة حدثت فجأه شراره، و ارتعش جسمي بقوة لم أعهدها من قبل، ومن ثم قذفت بي الكهرباء بقوة كبيره الى الخلف لأصطدم بخزانة الملابس. كان شعورا مرعبا جدا، ومن شده الخوف تركت لعبه النايتندو وانتهت رغبتي بانهاء لعبه سوبرماريو حتى ظهرت لعبه السيغا، لأعود الى هواية اللعب مرة أخرى. واليوم لدي جهاز بلايستيشن 3 وما زلت أهوى ألعاب الفيديو كثرا.

في الحقيقه يعود مفهوم الكهرباء والمغناطيس الى عصور قديمه جدا. لكن الظواهر الكهربائيه وأشهرها البرق كانت مجرد أشياء مثيره للاهتمام لا أكثر. لكنها كانت في نفس الوقت محيره جدا. لا شك أن الحضارات القديمة ربطت ظاهره البرق بغضب الآله. فكانوا يرونها بخشوع كبير لما للرعد من صوت رهيب جدا. وهناك كانت ظاهره أخرى مثيره للاهتمام وهي ظاهرة الكهرباء الاستاتيكيه. ففي فصل الشتاء نشعر أثناء ارتداء ملابسنا الصوفيه برعشة كهرباء. ولا يقتصر الأمر على الشعور فقط، فكذلك نسمع صوتها. هذا النوع من الكهرباء ناشئ من احتكاك الأجسام ببعضها. وهو ما يسمى بالكهرباء الاستاتيكيه. كان لدى القدماء ماده تسمى الكهرمان، وهو عباره عن صمغ متحجر من الأشجار الصنوبريه. وعندما كانوا يفركونه تصبح له قدره على جذب الأجسام اللطيفه. أما عن المغناطيس فكانوا يعرفون أن له القدره على جذب الحديد، وكانوا يلاحظون أن الأقطاب المتشابه تتنافر والمتعاكسه تتجاذب. وعلى الأرجح لم تتعدى معرفتهم أكثر من ذلك.

في القرن الثامن عشر، درس بنجامين فرانكلين Benjamin Franklin، الطبيعه الكهربائيه للبرق. وفهم الكهرباء كنوع من التدفق بين الأجسام. في الواقع هو أول من سمى الكهرباء بهذا الاسم. وهو من صنف الشحنات الكهربائيه الى سالبه وأخرى موجبه. فالأجسام التي تكتسب التدفق يقال أنها موجبه (+) والتي تفقد التدفق يقال أنها سالبه (-). بعدها تم التعرف على أن الشحنات تشبه أقطاب المغناطيس، فالشحنات المتماثله تتنافر بينما تتجاذب الشحنات المتضاده. الحدث المهم بعد أعمال فرانكلين هو اكتشاف القوه الفاعله بين الشحنات، التي وجدها الفيزيائي الفرنسي شارل أوغستين دي كولوم Coulomb والمعروف باسم قانون كولوم. وينص على:

"توجد هناك قوه جذب بين أي شحنتين في الفراغ تتناسب طرديا مع حاصل ضرب شحنتيهما وعكسيا مع مربع المسافه بينهما"

ونعبر عنه رياضيا كالتالي:

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

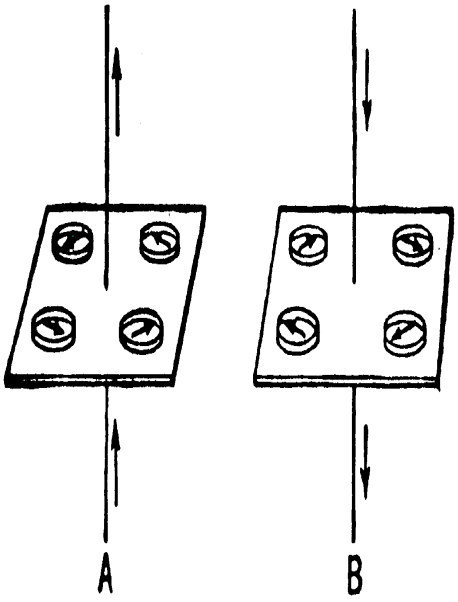
حيث F قوة الجذب بين الشحنتين، q_1 مقدار شحنة الجسم الاول، q_2 مقدار شحنة الجسم الثاني، r المسافه بين الشحنتين، أما k فيسمى ثابت كولوم ويساوي :

$$k = 8.987 \times 10^9 \ \frac{N.m^2}{C^2}$$

C هي وحده قياس الشحنه وتعني كولوم. ما الذي تلاحظه في هذا القانون؟ لو عدت الى الفصل الأول، ورأيت قانون نيوتن في الجذب العام، سترى صيغة قانون كولوم تشبه بالضبط صيغة قانون نيوتن، ما عدى كلمة كتله استبدلناها هنا بشحنه. وأرجو أن تضع هذا التشابه في رأسك لأننا سنأتي على ذكر أهميته في تطوير النظريه الكهرومغناطيسيه.

ان قانون كولوم لا ينطبق على الشحنات فقط، بل ينطبق أيضا على الأقطاب المغناطيسيه. لكن ما يجعل القطب المغناطيسي مختلفا عن الشحنه الكهربائيه، هو أن القطب يحمل القوتيتن الموجبه والسالبه في نفس الوقت. فالمغناطيس له قطب شمالي وآخر جنوبي. ولا يمكن أن يوجد قطب مغناطيسي فقط شمالي أو فقط جنوبي. لكن مع هذا تكون قوة التجاذب بين قطبين مختلفين أو قوة التنافر بين قطبين متشابهين هي نفسها القوة التي بين الشحنات الكهربائيه، والتي تطيع قانون كولوم. ان هذا التشابه الكبير بين الكهرباء والمغناطيس قد دفع العلماء الى التفكير بوجود علاقه بينهما، وراحوا يحاولون اكتشاف تلك العلاقه تجريبيا. لكن دون جدوى، فعندما نضع شحنه كهربائيه بجوار قطب مغناطيسي لا نلاحظ أي تأثير بينهما. وظل الوضع قائما هكذا حتى عام 1820 حينما اكتشف الفيزيائي الدانماركي هانز كريستيان أورستيد Hans Christian Ørsted العلاقه بين الكهرباء والمغناطيس أخيرا.

لقد لاحظ اروستيد أن التيار الكهربائي المار في موصل قادر على حرف ابرة البوصله القريبه منه. وهنا نلاحظ لماذا لم يستطع العلماء قبل اورستيد اكتشاق العلاقه بين الكهرباء والمغناطيس. ان الشحنه الثابته لا تؤثر على ابرة البوصله. لكن الشحنات المتحركه (التيار الكهربائي) قادرة على حرف ابرة البوصله. الا أن اتجاه تأثير القوه على ابرة البوصله كان غير متوقع أبدا. تصور بأنه لدينا تيارا يمر في سلك الى الأسفل (الشكل 9-2)، وتوجد هناك

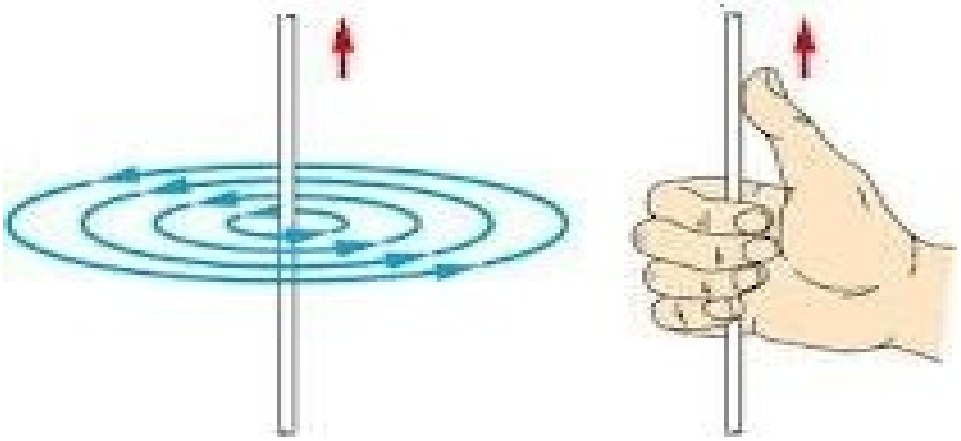


شكل (2-9)

انحراف ابر البوصلات (A) التيار الى الأعلى (B) التيار الى الأسفل. لا حظ أن اتجاه ابر البوصلات عمودي على اتجاه انتشار التيار.

أربع بوصلات قد وضعت في أماكن معينه كما هو موضح بالشكل نفسه. اذا لم يكن هناك تيار فأن جميع ابر البوصلات لا تتحرك. اما اذا بدأ التيار يسير ستبدأ ابر البوصلات في اتخاذ أماكن معينه. لاحظ اتجاه ابرة كل بوصله، ماذا ترى؟ انها عموديه على اتجاه انتشار التيار، وهذه الملاحظه ليست اعتاديه أبدا. تذكر قانون نيوتن في الجذب العام وقانون كولوم الخاص بالشحنات. كانت كلتا القوتين سواء بين شحنتين أو كوكبين تؤثر باتجاه شعاعي على امتداد الخط الواصل بينهما. لكن في هذه التجربه نرى أن القوة الناشئه من التيار تكون عموديه على هذا التيار، وهذه سابقه في الفيزياء في ذاك الوقت. لكن أورستيد نفسه لم يفهم اتجاه القوة الناشئه بدقه. لقد صور القوة الناشئه من التيار، كعاصفه مغناطيسيه تدور حول السلك. تأمل اتجاه البوصلات في الشكل A والشكل B وحاول أن تتخيل كيف سيكون اتجاه المجال المغناطيسي. هل وجدته؟ حسننا، اقبض السلك بيدك بحيث يكون اتجاه ابهامك مع التيار، بعدها حرك بقيه أصابعك بشكل دائري (الشكل 10-2). انه اتجاه القوة المغناطيسيه. ان القوة المغناطيسيه الناشئه تأخذ شكل دائري حول السلك كما هو موضح بالشكل نفسه. ولو قمنا بنثر برادة حديد فأننا سنرى أنها تتخذ شكل دائري مع اتجاه المجال المغناطيسي (الشكل11-2).

لقد كان اكتشاف اورستيد نقطة الانطلاقه الحقيقه في بناء ما يعرف اليوم بالنظريه الكهرومغناطيسيه. وقد ألهم اكتشافه هذا كثير من العلماء على اجراء التجارب ومحاوله فهم القوة المغناطيسيه الناشئه من السلك. وكان أهم أولئك الملهمين، الفيزيائي الفرنسي ماري أمبير، الملقب بنيوتن الكهرباء. درس أمبير بشكل دقيق وشامل القوة المغناطيسيه، وراح يبحث في التأثير المتبادل بين التيارات والمغانط، وفي غضون ثلاث سنوات من البحوث النظريه والتجريبيه، استطاع أن يضع القوانين الأساسيه التي تحكم الكهرومغناطيسيه.

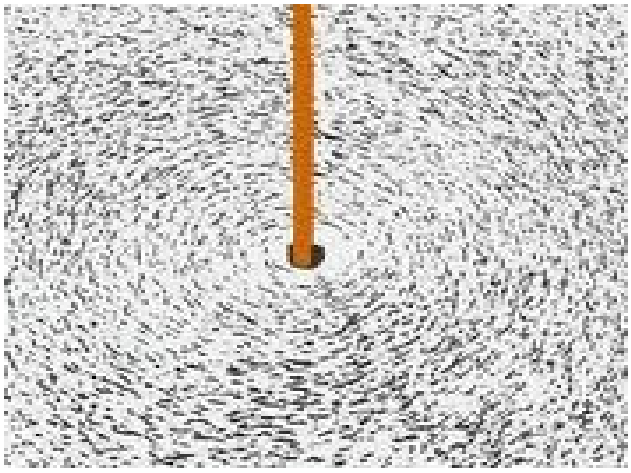


شكل (10-2)

حتى تحدد اتجاه انتشار القوة المغناطيسيه اقبض السلك بيدك ووجه ابهماك مع اتجاه التيار، ثم حرك بقيه أصابعك باتجاه دائري.

طالما الآن قد فهمنا كيف تتولد القوة المغناطيسيه من سلك، دعنى نتلاعب قليلا مع الكهرباء. اذ كانت الأسلاك الكهربائيه تولد قوى مغناطيسيه، ماذا سيحدث لو وضعنا سلكين بجوار بعضهما البعض؟ ستحدث نتيجه مدهشه، سيتنافران أو يتجاذبان مثلما تتنافر وتتجاذب المغانط العاديه! لو كان لدينا سلكين يسري فيهما تيارا في نفس الاتجاه، سيؤثر كل منهما على الآخر بقوة جذب، وسوف يتنافران اذا كان اتجاه تيار كل منهما بعكس الآخر.

ومع ذلك ظل تفسير كيفية انتقال تلك القوة المتولده من التيار غامضا. كيف تؤثر تلك القوة على ابره البوصله؟ في الحقيقه كان علماء الكهرباء وعلى رأسهم أمبير متأثرين بالنهج النيوتني . دعنا نعود الى جاذبيه نيوتن. لقد أدرك نيوتن أن هناك قوة جذب تمارسها الأرض



شكل (11-2)

بامكاننا التأكد من اتجاه انتشار القوة المغناطيسيه وذلك بنثر برادة حديد حول سلك يسري فيه تيار كهربائي. سنجد أن برادة الحديد تتخذ شكلا دائريا حول السلك.

على جميع الأجسام. لكن كيف تؤثر تلك القوة؟ هل تذكر الاجابة؟ كانت قوة آنيه، أي أنها تؤثر بشكل لحظي مباشر عن بعد. فلو اختفت الشمس فجأه ستفلت الأرض من مدارها مباشرتا. كان أمبير نيوتنيا حتى النخاع. لقد افترض أن القوة المغناطيسيه هي أيضا قوة آنيه تنتقل بشكل مباشر من السلك الى الابره بدون الحاجه لزمن ما حتى تصل. لكن وكما يقول المثل، لكل زمان دولة ورجال. كان هناك رجال ينتظرون الوقت المناسب ليتركوا بصماتهم الخالده في تاريخ العلم. وأول هؤلاء الرجال هو جلاد الكتب و أمير التجريبين بامتياز، مايكل فارادي Michael Faraday.

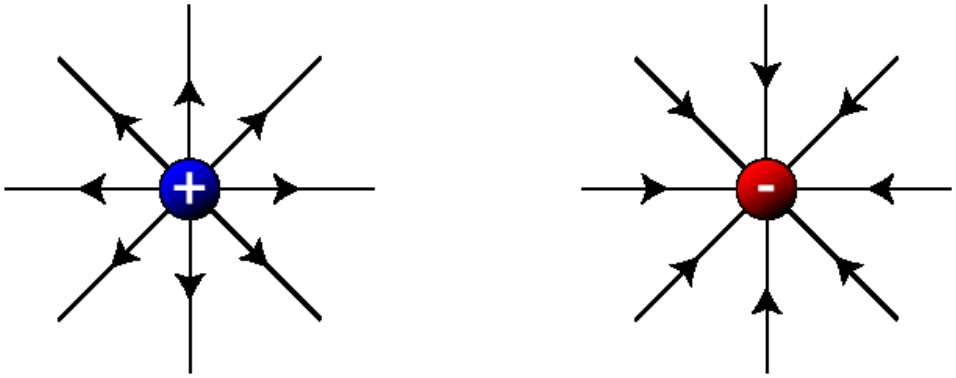
ولد مايكل فارادي عام 1791 في نوينغاتون بوتس Newington Butts، أحد أحياء لندن. كان والده يعمل حدادا، وأخوه سباكا. نشأ وترعرع في أسره فقيره وتلقى تعليما عاديا جدا، لا يتعدى الالمام بالقرائه والكتابه. وفي سن الثالثة عشر أرسله والده ليعمل في تجليد الكتب عند بائع يدعى جورج ريبو. لقد اختار له القدر أفضل مهنةَ! لم يكن فارادي شخصا يبحث عن المال، فقط كان يريد المال ليسد به قوت يومه ويعين اسرته. ان الهديه الحقيقه بالنسبه لفارادي هي تلك الكتب التي كانت تصل اليه. كان يجلد الكتب ويقرأها كلها، حتى طور نفسه بنفسه. بعدها انتقل للعمل مع السير همفري ديفي Humphry Davy الكيميائي الانجيليزي المعروف، وما أن عمل هناك حتى بدأت ابداعاته الكهرومغناطيسيه تتفجر الواحده تلو الأخرى.

في الحقيقه لم يكن فارادي بارعا في الرياضيات. اذ لاتجد في أبحاثه وكتبه الى جزء صغير جدا من الحسابات. وكان عدم وجود معادلات في أبحاثه مبررا لعدم قبول أفكاره، بل انها لاقت سخريه لاذعه من معاصريه. لكن سنرى كيف كانت مخيلة فارادي العلميه ثاقبه جدا. وسنرى كيف كان عقله سابقا لعصره، وهذا السبب هو الذي جعل معاصريه لا يفهموه و يسخرون منه.

كان فارادي يتسائل: اذا كان التيار المار في سلك يصدر قوة مغناطيسيه قادرة على حرف ابرة البوصله؟ ألا يمكن أن يحدث العكس؟ ألا يمكن أن يولد المغناطيس تيارا كهربائيا؟ لقد أجرى التجارب الواحده تلو الأخرى، وكان لا يلاحظ ذلك التأثير، لكن حسه العلمي والجمالي يؤكد له وجود هذه الظاهرة. وبعد محاولات عديده وصبر طويل، اكتشف فارادي أخيرا تلك الظاهرة. ليست الفكرة أن تضع مغناطيسي بجوار موصل كهربائي، بل عليك أن تحرك ذاك المغناطيسي أو أن تحرك الموصل نفسه بحركات متناوبه. تسمى هذه الظاهره الشهيره بالحث الكهرومغناطيسي Electromagnetic induction. وحتى نكون منصفين، كان العالم الأمريكي جوزيف هنري Joseph Henry والروسي هنرش لنز Heinrich Lenz قد توصلا الى نفس الاكتشاف مع فارادي، لكن عادة ما ينسب هذا الاكتشاف الى فارادي. اننا الآن على عتبة اكتشاف مهم، ان التيار الكهربائي (شحنات متحركه) تنتج قوة مغناطيسيه، والمغاطيس المتحرك ينتج قوة كهربائيه أو تيار كهربائي. كيف يمكن تفسير هذه الظاهره؟ ما هو الشيئ الذي يصدر من المغناطيس حتى يحرض تيار كهربائي؟ لم يكن فارادي على استعداد لتقبل الفكرة النيوتنيه والتي أيدها أمبير بأن القوة تنتقل بشكل آني. لقد اقترح فكره مختلفه كليا، شق بها الفيزياء الى شطرين، جسيمي نيوتني ومجالي فارادي.

تصور السلك الموجود في الشكل (10-2). ان القوة المغناطيسيه الناشئه ليست شيئ خفي ينتقل عن بعد. لقد أدرك فارادي أن هذه القوة المغناطيسيه شيئ حقيق موجود ينتشر حول السلك. ان ابر البوصلات المحاطة جميعها بالسلك الكهربائي تنحرف، مما يدل على أن القوة تنتشر على طول المكان المحيط بالسلك الكهربائي. يطلق على ذاك الشيئ المحيط بالسلك في أدبيات الفيزياء اسم المجال Filed. لا يقتصر هذا المجال على المغناطيس فقط، بل حتى الشحنات الكهربائيه تصدر مجالا كهربائيا. لنتأمل أهميه هذا المجال ، تخيل كما في الشكل (11-2) أن المجال الكهربائي الناشئ عن شحنه عباره عن خطوط تصدر على امتداد دائري. لاحظ عند النقاط القريبه من الشحنة تكون الخطوط متلاصقة، أي أن عددها في وحدة الحجم يكون كبيرا. تسمى عدد الخطوط تلك بالشده الكهربائيه. واذا بدأنا نتباعد عن عن الشحنة سيقل عدد الخطوط تدريجيا حتى تتلاشى نهائيا. في الواقع فسرت هذه الفكرة قانون كولوم بدقه كبيره. ان القوة الكهربائيه حسب قانون كولوم تتناقص مع مربع المسافه. لكن وبسبب سيطرة نهج نيوتن على تفكيرنا، كنا نتصور أن تلك القوة تنتقل بشكل

آني. لكن مايكل فارادي بعطينا الآن تفسرا مريحا جدا. ان القوة تنخفض مع مربع المسافة لأن عدد الخطوط الكهربائيه ينخفض مع المسافه بشكل تربيعي تماما كما يتنبأ قانون كولوم. والأجمل من ذلك أن تلك الخطوط من الممكن أن تصدر الى خارج



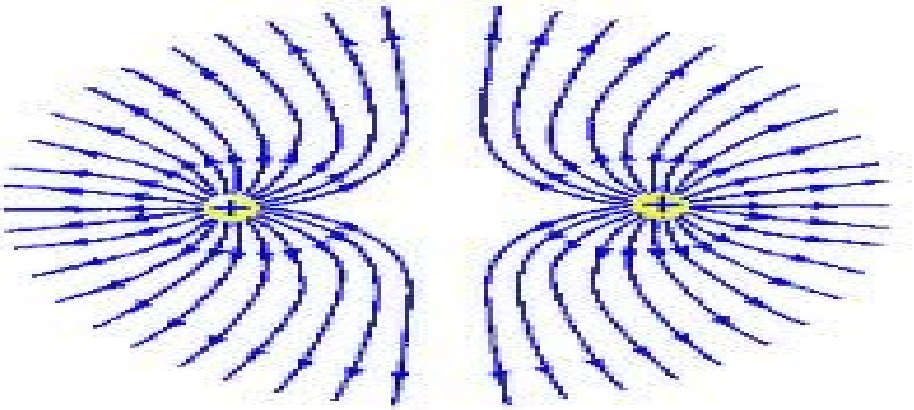
(A) (B)

شكل (11-2)

(A) خطوط المجال للشحنه الكهربائية الموجبه تصدر من الداخل الى الخارج. (B) خطوط المجال للشحنة الكهربائيه السالبه تصدرمن الخارج الى الداخل.

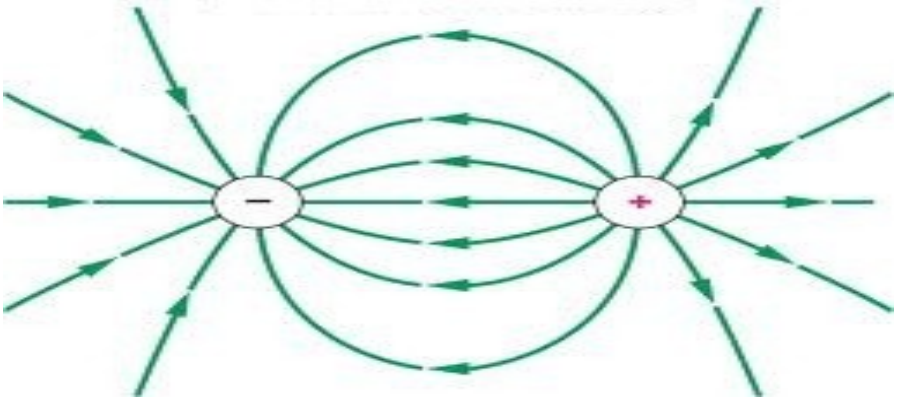
الشحنة أو الى داخلها. فعندما تكون هناك شحنة موجبة تكون خطوط المجال صادره من الداخل الى الخارج (الشكل A 11-2). وعندما تكون هناك شحنة سالبه تكون خطوط المجال صادرة من الخارج الى الداخل (الشكل B 11-2). تصور الآ ماذا سيحدث لو قمنا بتقريب شحنة موجبة من أخرى موجبه أيضا، ستنحني خطوط المجال الكهربائي متباعده عن بعضها البعض، كما في (الشكل 12-2). أما عندما نقوم بتقريب شحنة موجبة من أخرى سالبه ستنحني الخطوط وتصبح كأنها صادرة من الشحنة الموجبه ومنتهيه في الشحنة السالبه (الشكل 13-2).

لا يقتصر المجال الكهربائي على الشحنات فقط، بل ينطبق على المغناطيس كذلك. لكن بما أن المغناطيس لا يمكن أن يوجد بحاله منفرد موجبة أو سالبه، ستكون خطوط مجاله دائما صادرة من القطب الشمالي الموجب ومنتهية في القطب الجنوبي السالب (الشكل 14-2). ويمكن بيان خطوط المجال تلك برش برادة حديد على سطح مستو من الورق المقوى، ثم وضع مغناطيس عليها (الشكل 15-2). ستنتشر البراده على نفس شكل المجال.



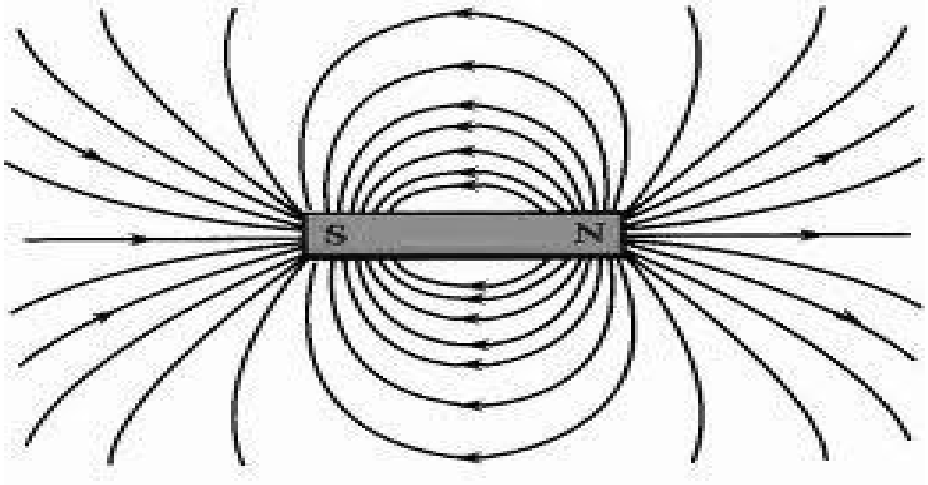
شكل (2-12)

عند تقريب شحنة موجبة من أخرى أيضا موجبه تنحني خطوط المجال الكهربائي لكليهما.



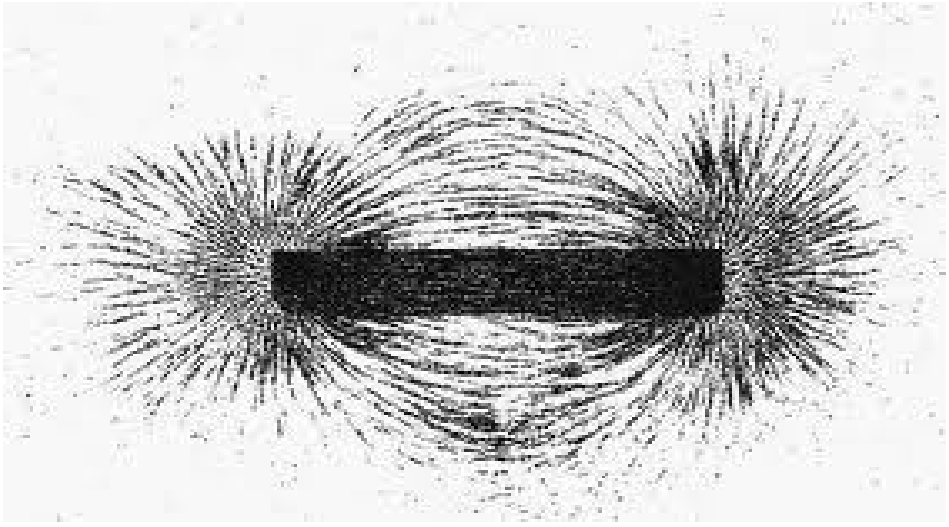
شكل (2-13)

عند تقريب شحنة موجبة من أخرى سالبه، تنحني خطوط المجال وتصبح كأنها صادرة من الشحنه الموجبة ومنتهيه في الشحنة السالبه.



شكل (2-14)

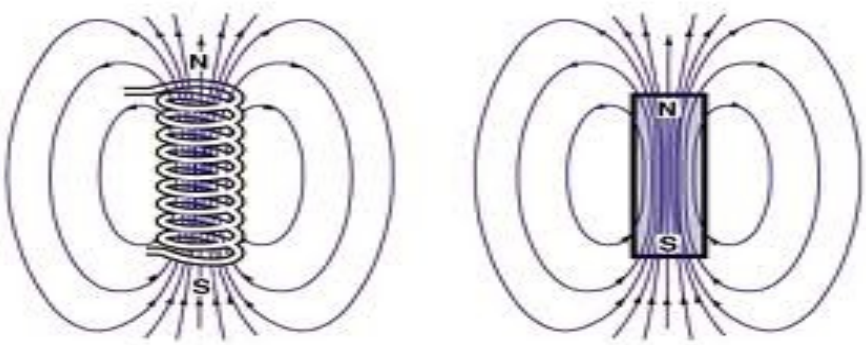
لا يمكن للمغناطيس أن يوجد على حالة منفرده سالبه أو موجبه مثل الشحنات الكهربائيه. لذلك تكون خطوط المجال المغناطيسي دائما صادرة من القطب الشمالي الموجب ومنتهية في القطب الجنوبي السالب.



شكل (2-15)

عند نشر براده حديد على ورق مقوى و وضع مغناطيس، سنجد برادة الحديد تتخذ شكل المجال المغناطيسي مثلما تصوره فارادي.

دعنى الآن نتلاعب أكثر مع الكهرومغناطيسيات طالما أننا قد فهمنا طبيعة القوة الصادرة منهما. نحن نعلم أن التيار الجاري في موصل يولد مجال مغناطيسي من حوله يتخد شكل دائري (الشكل 11-2). تخيل الآن ماذا سيحدث لو قمنا بلف السلك بشكل لولبي، كما في (الشكل 16-2). ماذا تتوقع أن يكون شكل المجال المغناطيسي الصادر؟ سيتخذ بالضبط نفس شكل المجال المغناطيسي الصادر من مغناطيس عادي! أليست نتيجه مدهشه. تصور بأنه لدينا سلكين لولبين يمر فيهما تيار كهربائي. ان هذين السلكين سيتصرفان وكأنهما مغناطيسين عاديين، حيث يتجاذبا ويتنافرا حسب وضعهما! ان التجربه تؤكد هذا الشيئ والفضل يعود الى مفهوم المجال.



شكل (16-2)

ان السلك اللولبي يتصرف بالضبط وكأنه مغناطيس عادي. حيث يتنافر ويتجاذب حسب وضعه بالنسبه لمغناطيس آخر.

ليس هذا كل شيئ بالنسبه لأهمية فكرة المجال. دعنى نعود الى تجربة فارادي في الحث الكهرومغناطيسي لنستخلص رائعة أخرى من روائع المجال. لقد برهنت لنا تجربة فارادي أن المغناطيس المتحرك قادر على توليد تيار متحرض في دائره كهربائيه مغلقه. أما لو كان المغناطيس ثابت، فلن يتولد تيار كهربائي أبدا مهما كانت شدة المجال المغناطيسي عاليه. ليست هذه الحاله الوحيده الممكنه لتوليد تيار متحرض في دائره كهربائيه. فمن الممكن أن نجعل المغناطيس ساكنا ونحرك الدائره الكهربائيه المغلقه ذهابا وايابا بالنسبة له. أو من الممكن كذلك أن نضع ملفا لولبيا يسري فيه تيار بالقرب من الدائره المراد توليد فيها تيار، ومن ثم نفتح ونغلق مصدر الكهرباء. والسؤال المهم الآن؛ لماذا يتحتم على المغناطيس أو الدائره الكهربائيه أن يكونا في حالة حركة حتى يتولد تيار متحرض؟ لماذا لا يتولد تيار في حالة السكون؟ في الحقيقة، من الصعب الاجابة على هذا السؤال من دون فكرة المجال.

عندما كان فارادي يجري هذه التجربه مرة بعد مرة لاحظ أن شدة التيار المتولد في الدائره تعتمد على قوة تحريك المغناطيس. لقد لمعت في رأسه الفكرة، ان التيار لا يتولد في الدائره الا اذا تغيرعدد خطوط المجال المغناطيسي، أي تتغير القوة المغناطيسيه التي تعبر هذه الحلقه. وبأي طريقة كانت، سواء بتقوية المغناطيس أو بتحريكه أو بتحريك الدائره نفسها أو بجميع الطرق السابقه دفعه واحدة. لذلك نقول، ان شدة التيار المتولد في الدائره يعتمد على معدل تغير خطوط المجال المغناطيسي التي تعبر الدائرة. ان ظاهرة تولد تيار كهربائي نتيجة لتغير عدد خطوط المجال المغناطيسي قد صادفتنا جميعنا في حياتنا. فعندما نقطع الموصل الكهربائي من نقطه الكهرباء التي على الحائط سنلاحظ تولد شراره عند نقطة القطع اذا لم نقم باطفاء المفتاح الكهربائي. الآن نستطيع فهم هذه الظاهرة طالما أن فارادي معنا. عندما يكون الموصل في الحائط ويسري فيه تيار، سيتولد منه مجال مغناطيسي يدور بشكل دائري حوله، كما تعلمنا من تجربه أورستيد. عندما تقوم بقطع التيار فجأه فأنك في الواقع تغير عدد خطوط المجال المغناطيسي فجأة. هذا التغير المفاجئ سوف يولد تيار كهربائي متحرض سريع، كما تعلمنا من تجربة فارادي. هذا التيار المفاجئ هو الشراره التي نلاحظها عند قطع الموصل الكهربائي فجأه. هل عرفت الآن السبب الذي جعلني أطير لأصطدم بخزانة الملابس عندما أصررت على انهاء لعبة سوبرماريو؟!

على الرغم من جمال أفكار فارادي وقدرتها المذهله في فهم الظواهر الكهرومغناطيسيه، لاقت معارضه شديدة من معاصريه. بل قد لاقت سخريه لاذعه بسبب عدم احتوائها على معادلات رياضيه. كانت بالنسبة لعلماء ذاك الزمان مجرد نظرية انشائيه خالية من مضمونها الرياضي. لقد كبر فارادي وتقدم به العمر، ولم يلاقي التقدير الكافي لمى ساهم به للعلم. ولكن في أحد الأيام طلب شاب مقابلة فارادي للحديث معه حول بعض الاكتشافات. لقد قال له؛ ان كل ما تنبأت به كان صحيحا، فخطوطك الكهرومغناطيسيه أكثر من مجرد خيال رياضي، انها موجوده مثلما نحن موجودون. هذا ما تقوله المعادلات الرياضيه! كان ذاك الشاب يدعى جيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell.

ان المكانه العلمية التي يحتلها ماكسويل في تاريخ العلم تقترب من مكانة جاليليو ونيوتن. وقصه ماكسويل مع فارادي تشبه قصه نيوتن مع جاليليو الى حد كبير. لقد كان جاليليو يحمل في رأسه أفكارا جديدة حول بنية قوانين الطبيعه، لكنه لم يترجمها الى معادلات. ان نيوتن هو من قام بتحويل أفكار جاليليو الى معادلات. يشبه هذا الوضع وضع فارادي مع ماكسويل. ففي الوقت الذي واجه فيه فارادي صعوبه في تحويل أفكاره الى معادلات، تكفل ماكسويل بهذه الخدمة لمى يملكه من قدرات رياضيه عظيمه. لقد وجد نيوتن لجاليليو و وجد ماكسويل لفارادي. لكن على عكس معادلات نيوتن التي عالجناها الى حد ما، تبقى معادلات ماكسويل صعبه وتتطلب مستوى متقدم بعض الشيئ في الرياضيات.

وهذا للأسف خارج عن أهداف هذا الكتاب. لكن سأحاول قدر المستطاع أن أبسطها للقارئ الكريم.

لقد وضع ماكسويل نموذج ميكانيكي أثيري ليصف به جميع الظواهر الكهرومغناطيسيه. في تجربه أورستيد، رأينا أن التيار الكهربائي المار في سلك قادر على حرف ابرة البوصله. لذلك اعتقد اورستيد أن التيار الكهربائي يثير زوبعه مغناطيسيه حول التيار. أدخل ماكسويل فكرة جديدة ميكانيكية معتمدا فيها على فكرة الأثير. لقد تصور أن مرور التيار الكهربائي داخل السلك أو أي مادة أخرى تحتوي على الأثير تثير دوامات محليه بجواره. وهذه الدوامات ستثير أخرى بجوارها حتى ينتقل التأثير المغناطيسي الى مسافات بعيدة. والتيار الكهربائي ليس سوى سيل من دوامات أصغر من الدوامات المغناطيسيه. في الواقع يبدو نموذجه هذا غريب بعض الشيئ وبعيد عن الواقع، ونراه هو بنفسه يقول:

(ان تصور أن ترتبط حركه جسيم ما بحركة دوامه من خلال تماس دائري كامل قد يبدو تصورا أخرق بعض الشيئ وأنا لم أقدمه على أنه صيغه لعلاقه ماثلة في الطبيعه أو حتى كفرضيه كهربائيه - كما أوده بشده أن يكون- وما هو بأي حال سوى صيغه لعلاقة قابله للتصور ميكانيكيا، وسهلة التحقيق، تبدو وكأنها تظهر الصلات الميكانيكيه الحقيقه بين الظاهره الكهرطيسية المعروفه؛ وأنا أتجرأ على القول أن أي شخص سيفهم الطبيعه الشرطيه والمؤقته لهذه الفرضيه، سيجد نفسه قد حصل على الأرجح على مساعدة منا لا أنه أعيق بواسطتها أثناء سعيه وراء التفسير الحقيقي لهذه الظواهر)[4].

اذن واضح لماذا أدخل ماكسويل هذا النموذج رغم غرابته. لقد أدخله ليخدم أهدافه ويستخرج منه المعادلات التي تحكم جميع الظواهر الكهرومغناطيسية ومن ثم سيتخلى عنه. بسبب نموذجه الميكانيكي الأثيري هذا اضطر ماكسويل الى ادخال مفهوم جديد غريب آخر حتى يحصل على الشكل النهائي للمعادلات الكهرومغناطيسيه. يدعى هذا المفهوم بتيار الازاحه Displacement current. حسب ماكسويل يوجد هذا التيار في كل المواد وهو موجود كذلك في الأثير. لقد صور ماكسويل أن كل المواد بما فيها الأثير تحتوي على جزيئات سالبه وأخرى موجبه، مقيدتان غير حرتان في الانتقال. لكن اذا تعرضت لمجال كهربائي فسوف تنزاح قليلا تلك الشحنات الموجبة والسالبه عن مواضعهما. الآن، اذا كان المجال الكهربائي المسلط متغير، سوف تكون تلك الازاحه هي الأخرى متغيره وستشكل بذلك شيئ يشبه التيار. انه لا يشبه التيار تماما، بل تستطيع أن تسميه بداية تيار أو شروع تيار. لكن حتى لو كان بداية تيار لابد وأن يولد مجال مغناطيسي حول ذاته.

دعنى نعود الآن لنستذكر الظواهر الكهرومغناطيسية التي مرت علينا. في تجربة اورستيد كان التيار الكهربائي المار في سلك قادر على توليد مجال مغناطيسي من حوله،

لكن التيار الكهربائي مصحوب دوما بمجال كهربائي متغير. وهكذا نستطيع أن نقول أن التغير في المجال الكهربائي يولد مجال مغناطيسي. التجربه الأخرى كانت تجربة فارادي؛ لقد رأينا كيف أن تحريك مغناطيس بالنسبة لدائره كهربائيه ساكنه قادر على توليد تيار كهربائي في تلك الدائره. ان تحريك المغناطيس ليس سوى تغير في المجال المغناطيسي، وان توليد تيار في الدائره، يعني توليد مجال كهربائي كما ذكرنا للتو. لذلك نقول ان التغير في المجال المغناطيسي يولد مجال كهربائي. وكلما كان التغير في أحد المجالين سريعا يصبح الآخر شديدا.

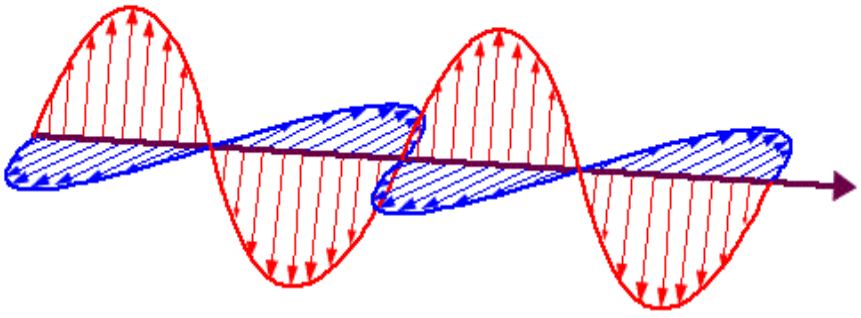
نعود الآن الى تيار ماكسويل الازاحي. كانت المعادلات الكهرومغناطيسية قبل ماكسويل غير متناسقة فيزيائيا. كانت تقتضي أن التغير في المجال المغناطيسي يخلق مجال كهربائي، لكن هذه المعادلات كانت لا تشير الى العكس! أي أن التغير في المجال الكهربائي لا يشير الى تولد مجال مغناطيسي. الشيئ الذي أزعج ماكسويل كثيرا، لكنه تغلب على هذه الصعوبه بعدما وضع تيار الازاحه. لقد أصبح بامكانه الآن كتابة المعادلات الكهرومغناطيسيه بشكل متناسق وعجيب جدا. بعدما أدخل تعديله، صار من الواضح جدا، أن التغير في المجال الكهربائي يولد مجال مغناطيسي والتغير في المجال المغناطيسي يولد مجال كهربائي. أن تيار الازاحه الذي وضعه ماكسويل لا يتواجد في المواد فقط، بل هو موجود في الفراغ الأُثيري أيضا. أي أن المجال الكهربائي والمغناطيسي قادران على التولد في الفراغ، بدون الحاجه الى مواد فيها تيارات مثل الموصلات الكهربائيه. والآن تصور في الفراغ الذي أمامك مجموعه لا متناهية من التيارات الازاحيه، حيث يتولد منها مجال مغناطيسي متغير يولد بدوره مجال كهربائي متغير وهذا بدوره يولد مرة أخرى مجال مغناطيسي متغير وهذا مرة اخرى بدوره يولد كهربائي..... في الحقيقه سأحتاج الى عدد لا نهائي من الورق حتى أكتب لك الى متى سيستمر هذا التغير! لكن هناك طريقة أخرى حتى ترى هذه التولدات؛ انظر الى الضوء الذي أمامك، انه ليس سوى هذه التغيرات المجالية! نعم، هذا ما استنتجه ماكسويل من معادلاته. لقد أدرك أن الضوء ليس سوى تغيرات سريعه بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي، حيث تنتشر تلك التغيرات بسرعه معينه في الفراغ. وتمكن ماكسويل من حساب تلك السرعه بدلاله قيمتين احداهما مرتبطه بالقوة الكهربائيه بين شحنتين وأخرى مرتبطه بالقوة المغناطيسيه بين تيارين. وقد استخدم ميكانيكا الموجات المعروفه، وكانت القيمة التي حصل عليها تساوي:

$$v_{EW} = 3 \times 10^8 m/s$$

ولا تقول لي بأنك نسيت هذه السرعه. انها سرعه الضوء التي بحثنا عنها في الجزء السابق من هذا الفصل!! هل تدرك مدى أهمية هذا الجمال الفيزيائي؟ لقد استنتجها ماكسويل بدلالات كهرومغناطيسيه خالصه. ولم يتردد بعد حصوله على هذه القيمه باعلانه و بالفم

المليان، أن الضوء ليس سوى تغيرات سريعه بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي. ومن الآن فصاعدا لا فرق في استخدام كلمتي الضوء أو المجال الكهرومغناطيسي.

دعنى الآن نلخص الوضع ونبسطه أكثر. ان الوصف الرياضي لقوانين الحقول يعتبر بحق، أهم حدث منذ أعمال نيوتن. في ميكانيكا نيوتن، نستطيع تحديد حاله الجسم المستقبليه بمعرفة حالته الابتدائيه. أما في معادلات ماكسويل، فاننا بمعرفة حالة المجال الكهرومغناطيسي في لحظة معينه، سيقودنا الى معرفة كيفية تغيره في المكان والزمان مستقبلا. ان مصدر المجال الكهرومغناطيسي هو الشحنات نفسها، فقط يعتمد على الحالة الديناميكيه للشحنة. لو كانت هناك شحنة كهربائية تتحرك بتسارع الى الأعلى والأسفل بحركه توافقيه، ستنتج هذه الشحنه مجال كهربائي متغير وهذا سيصحبه مجال مغناطيسي متغير ومن ثم مجال كهربائي متغير وهكذا.... ان هذين المجالين الكهربائي والمغناطيسي وجهان لعمله واحد، يتغيران بشكل متعامد على اتجاه انتشار الموجه الشكل (17-2). وعلى هذا تكون الموجه الكهرومغناطيسية موجه عرضيه.



شكل (17-2)

ليس الضوء سوى موجه كهرومغناطيسيه، حيث يكون المجال الكهربائي (الأحمر) والمجال المغناطيسي (الأزرق) عموديان على بعضهما، وكذلك عموديان على اتجاه انتشار الموجه.

في عام 1887، و حينها للأسف توفي ماكسويل، استطاع العالم الألماني هاينرش هرتز Heinrich Hertz من توليد موجات كهرومغناطيسيه غير مرئيه. وقد وجد أنها تسير بسرعة الضوء، تماما كما تنبأ ماكسويل. ويحق لك أن تتسائل لماذا لا نستطيع رؤية تلك الأمواج الكهرومغناطيسيه وهي ليست سوى ضوء ينتشر في الفضاء؟ الاجابه بسيطه، ان كل ما في الأمر يعتمد على طول الموجه أو ترددها. فالعين البشريه لا ترى سوء جزء صغير من الأطوال الموجيه، من 400 نانومتر (اللون البنفسجي) الى 700 نانومتر (اللون

الأحمر). ان الأمواج الكهرومغناطيسيه التي لها أطوال موجيه أعلى من اللون الأحمر لا يمكن أن ترى بالعين المجرده، كأشعه الراديو والمايكروويف والأشعه الغير مرئيه. وكذلك لا يمكن رؤيه الأمواج الكهرومغناطيسيه التي لها أطوال موجيه أصغر من اللون البنفسجي، كالأشعه فوق البنفسجيه وأشعه اكس وأشعه جاما. وهذه الأشعه لها أطوال موجيه قصيره، وبالتالي ترددااتها عاليه جدا، وتعتبر أشعه خطره على الجسم البشري. لذلك تجد في المستشفيات عند غرف تصوير أشعة اكس يضعون لافته مكتوب عليها ممنوع الاقتراب منطقة مشعه.

بعدما اكتشف ماكسويل أن الضوء ليس سوى موجه كهرومغناطيسيه، وبعدما برهن هرتز على ذلك، بدأ النسيان الجدي يدب في النظريه الجسيميه للضوء التي اقترحها نيوتن. لكن بدت الحاجه لوجود الأثير تزداد أكثر فأكثر. حتى لو كانت الموجات الكهرومغناطيسيه مختلفه عن الموجات الأخرى، الا انها تبقى موجات في النهايه، وهي بحاجه الى وسط ما حتى تنتشر فيه تلك الموجات. بالتأكيد كان ذلك الوسط هو الأثير نفسه. ان هذا الأُثير يضطرب عندما تنتشر فيه الموجات الكهرومغناطيسيه، كما يضطرب البحر عندما تنتشر فيه الموجات البحريه. لقد ظل العلماء يحاولون تفسير ميكانيكية الموجات الكهرومغناطيسيه في ظل مفهوم الأثير وتحت رحمته حتى عام 1887 حينما أتى الاختبار الفاصل بين الميكانيكا الكلاسيكيه والميكانيكا النسبيه. يطلق عاده على اسم ذلك الاختبار "تجربة مايكلسون مورلي Michelson–Morley experiment.

3 – تجربه مايكلسون - مورلي

تعتبر تجربة مايكلسون – مورلي واحدة من أدق وأهم التجارب في تاريخ الفيزياء. لقد تم أجراها لأول مرة بواسطة العالم الأمريكي ألبرت مايكلسون عام 1881، ومن ثم أعادها مرة أخرى بشكل أكثر دقه في عام 1887 مع مواطنه ادوارد مورلي. كان الهدف من التجربة قياس سرعة الأرض بالنسبه للأثير المفترض. وتقوم فكرة التجربه أساسا على قياس سرعة الضوء عندما تتغير سرعة الريح الأثيريه كما سنوضح بعد قليل. لكن قبل الدخول بتفاصيل التجربه، دعنى نضرب مثال سيقودنا بسهولة الى تجربة مايكلسون – مورلي.

تصور بأنك جالس تحت أشعة الشمس عند أحد أحواض السباحة في أحد الفنادق ذوي الخمس نجوم. وكان أمامك في الحوض سباح ماهر صاحب لياقه عاليه يسبح ذهابا وايابا في الحوض دون تعب أو كلل. و بما أن الفندق من مستوى خمس نجوم، فأن حوض السباحه مزود بنظام تشغيل تيارات مائيه. تصور بأن طول الحوض هو L وأن التيار يسير بسرعه u من الشرق الى الغرب. نود الآن أن نطلب من السباح، صاحب اللياقة العاليه، أن يسبح من بداية الحوض ذهابا وايابا، ونحسب كم من الوقت سيستغرق؟ افترض بأنه قبل

التحدي وبدأ بالسباحه من الغرب الى الشرق ومن ثم عاد مرة أخرى من الشرق الى الغرب. أي أنه سيسبح في الذهاب ضد التيار وفي الاياب مع التيار. ما هو الزمن الكلي المستغرق للذهاب والاياب؟ افترض بأن سرعة السباح هي c، في البدايه سيسبح ضد سرعة التيار u، أي أن سرعته ستكون بالنسبة لك هي $c-u$ وعندما يعود ستصبح سرعته مع سرعة التيار، أي ستكون $c+u$. وبما أن الزمن يساوي المسافة على السرعه، سيكون زمن الذهاب مساويا:

$$t=\frac{L}{c-u}$$

وبالمثل سيكون زمن الاياب:

$$t=\frac{L}{c+u}$$

وبالتالي يكون الزمن الكلي هو جمع معادلة الذهاب والاياب:

$$t_{total}=\frac{L}{c+u}+\frac{L}{c-u}$$

وسأترك أمر حسابها عليك، حيث ستجد الناتج يساوي:

$$t_{total}=\frac{2L}{c}\frac{1}{1-\frac{u^2}{c^2}}$$

والآن بما أن السباح ذو اللياقة العاليه قد أفادنا في استخراج هذه المعادله، سنشتري له عصير ملك شيك، وبعدما ينتهي منه، سنطلب منه تحدي آخر، آملين ألا يؤثر الملك شيك على لياقته العاليه. سنطلب منه الآن أن يقطع الحوض طولا، أي أنه سيسبح بشكل عمودي على اتجاه حركة التيار ذهابا وايابا. ستكون عملية الحساب هنا أكثر صعوبه بعض الشيئ، لأن فيها استخدام لحساب المثلثات. وفي هه الحاله لا يهم ان سبح صاحبنا من الشمال الى الجنوب أو العكس، لأن النتيجه واحده. فهو لا يتحرك مع أو ضد التيار كما في الحالة السابقة. عندما يتحرك من الشمال الى الجنوب فأن تيار الماء يقوم بازاحته قليلا ناحية الجنوب الغربي. ومن الممكن ايجاد - باستخدام حساب المثلثات - أن سرعة السباح ذهابا تساوي $\sqrt{c^2-u^2}$. وهي نفس سرعة الاياب. والآن بمثل المثال السابق يصبح زمن الرحله ذهابا وايابا هو:

$$t_{total} = \frac{2L}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

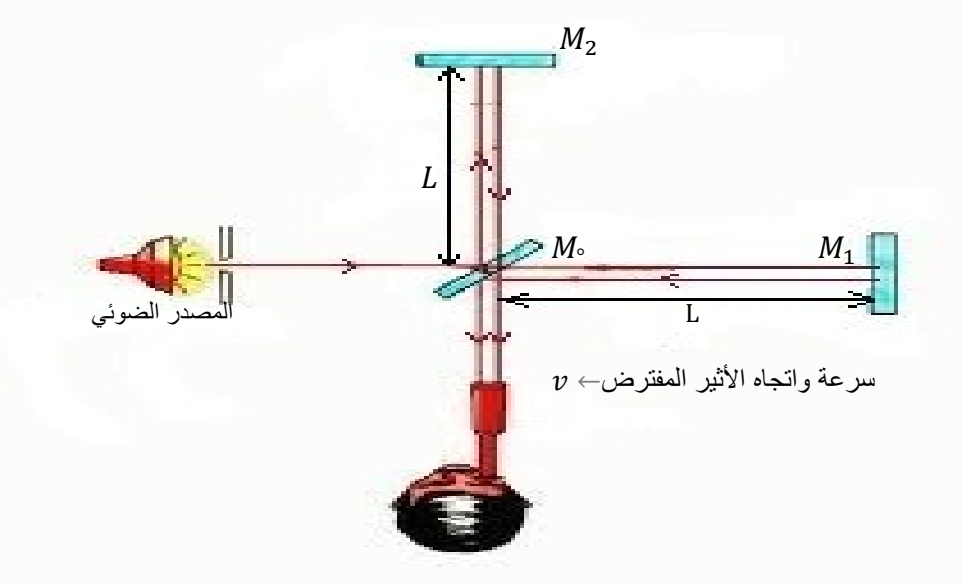
أي أن معامل التأخير هنا هو $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$. ومن الآن فصاعدا سنرمز لهذا المعامل بالرمز التالي:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

وهو معامل مهم للغاية، حيث ستراه تقريبا في كل معادله عندما نصل الى النظرية النسبيه. الآن، لو كان مقدار سرعة واتجاه التيار u غير معروفين قبل أن يبدأ سباحنا بالسباحه، فأننا يمكن معرفتهما بدلالة سرعة السباح c من المعادلات أعلاه.

في الحقيقه هذا ماقام به مايكلسون ومورلي لتحديد سرعة الأرض بالنسبة للأثير. لكن عوضا عن سباحنا فقد أستخدموا شعاع ضوئي وعوضا عن البحث عن سرعة واتجاه التيار المائي، كانا يبحثان عن سرعة واتجاه الأثير. يوضح الشكل (18-2) الجهاز المستخدم في تجربة مايكلسون – مورلي. حيث يتكون بشكل أساسي من مصدر للضوء S، ومرآه نصف مفضضه $M_\circ$ في المنتصف ومرآتين عاديتين M_1 و M_2. عندما تصل حزمة الضوء الى المرآه $M_\circ$ فأنها تنشطر الى حزمتين أحدهما تتجه الى المرآه M_1 ثم تعود مرة أخرى للمرآه $M_\circ$ حيث تنشطر مرة أخرى و يتجه جزء منها الى التلسكوب والنصف الآخر يتجه الى المصدر الضوئي - وليس له أي أهمية في التجربه – وكذلك النصف الآخر من الحزمه المتجه الى M_2 سيعود مرة أخرى الى $M_\circ$ حيث تمر نصف الحزمة الى المنظار ليلتقطها الراصد هناك. الآن تصور بأن الأرض تتحرك من الغرب الى الشرق بسرعه قدرها v. يمكننا في هذه الحاله أن نعتبر أن الأثير يسير بنفس السرعه من الشرق الى الغرب. تماما مثلما تخرج يدك من السياره، وتقيس سرعة الهواء بدلالة سرعة السياره. هذه الريح الأثيريه يجب أن تبطئ من سرعة الضوء السائره من المرآه $M_\circ$ الى المرآه M_1 الى $c - v$ في رحله الذهاب، ومن ثم تزيد من سرعة الضوء في رحلة الاياب الى $c + v$. في التجربة يجب أن تكون المسافه L بين المرآه $M_\circ$ والمرآتان M_1، M_2 متساويه. ان شعاعي الضوء المنعكسان من M_1 و M_2 سيتجمعان ويتوجهان الى التلسكوب وهنا تكمن فكرة التجربه. هل تتذكر في بداية هذا الفصل عندما كنا نتكلم عن تجربة يونغ ذات الشقين التي أثبتت أن الضوء موجه. سأطلب منك الآن أن تعود الى

الشكلين (4-2) و (5-2). في الشكل (4-2) نلاحظ عندما تكون الموجتان متسايرتان ستلتقي قمه موجه مع أخرى وبالتالي سيكون الناتج موجه ذات ذروه أعلى من كليهما وهو ما يعادل خط اضاءه في الشكل (5-2). أما عندما تلتقي قمة موجه مع قاع الأخرى، ستهدم كل منهما الأخرى ولن نحصل على أي موجه وهو ما يعادل خط داكن في الشكل (5-2).



شكل (18-2)

تجربة مايكلسون – مورلي

لقد كانت هذه فكرة مايكلسون لقياس تأثير الرياح الأثيريه على سرعة الضوء. بما أن المسافة بين المرآيا متساويه L، فهذا يعني أن الشعاعين الضوئيين سيصلان متزامنين الى التلسكوب منتجتا بذلك نمط تداخل يتألف من نقطة مضيئة بشده معينه في الوسط ومحاطة بحلقات من النور والظلمة. لكن نحن نتوقع أن تتأخر الموجه السائرة من المرآه $M_\circ$ الى المرآه M_1 ذهابا وايابا بسبب الريح الأُثيريه. الأمر الذي سيزيح خطوط أهداب التداخل قليلا. لكن نحن نعلم أيضا أن سرعة الضوء كبيرة جدا بالنسبة لسرعة الأثير، والتي تساوي سرعة الأرض. الأمر الذي سيصعب كثيرا قياس انزياح خطوط أهداب التداخل. لذلك اقترح مايكلسون و مورلي فكرة ذكية جدا. في أثناء ملاحظتنا لنموذج التداخل نقوم بلف الجهاز بأكمله بزاويه قدرها 90 درجه. هذا سيجعل سرعة الضوء تتغير على طول المسارين المتجهين الى M_1 و M_2. وهذا التأثير سيتسبب في تغيير نموذج التداخل، حيث

ستختفي بعض الحلقات المضيئة بشكل صغير جدا وستظهر مرة أخرى، لكنها ستكون منزاحه قليلا عن مواقعها السابقة. ولأن تجربة مايكلسون – مورلي تتضمن استعمال ظاهرة التداخل فان جهازهما يسمى "مقياس التداخل" *interferometer*.

ان مهمتنا الآن قد اختزلت في قياس ذلك الانزياح. في البدايه سنحسب الزمن الكلي لشعاع الضوء لرحله الذهاب والاياب من المرآه M_0 الى المرآه M_1. هل تستطيع حسابها؟ انها ببساطه نفس المعادله التي وجدناها بمساعدة صاحبنا السباح. لكن عوضا هنا عن سرعة التيار u سنضع سرعة الريح الأثيريه v. أما c فهي سرعة الضوء هنا. لذلك يمكننا كتابة الزمن الكلي كالتالي:

$$t_1 = \frac{2L}{c}\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

أما بالنسبة للزمن الكلي لرحلة الضوء من المرآه M_0 الى المرآه M_2 ذهابا وايابا، فكذلك وجدناه مع سباحنا عندما قطع الحوض بشكل متعامد مع التيار. وقد حصلنا على:

$$t_2 = \frac{2L}{c}\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

وبذلك يكون الفرق بين السرعتين هو:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2L}{c}\left[(1-\frac{v^2}{c^2})^{-1} - (1-\frac{v^2}{c^2})^{-1/2}\right]$$

ولأن $\frac{v^2}{c^2} \ll 1$ ، فيمكننا تبسيط هذا المقدار باستخدام التقريب الرياضي التالي:

$$(1-x)^n \approx 1 - nx \qquad (for \;\; x \ll 1)$$

في حالتنا هنا، $x = \frac{v^2}{c^2}$. لذلك نجد أن:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{Lv^2}{c^3}$$

يجب أن يلاحظ انزياح في خطوط التداخل عندما نقوم بلف الجهاز بأكمله بزاويه قدرها 90 درجة. لذلك ستتغير اتجاهات المرآتين M_1 و M_2، حيث سيتبادل الشعاعين أماكنهما.

ونتيجه للف الجهاز تسعون درجه، سيستغرق ذلك ضعف الوقت في المعادله الأخيره. وبالتالي يكون الفرق في الطور الموجي هو:

$$\Delta d = c(2\Delta t) = \frac{2Lv^2}{c^2}$$

وهذ يناظره انزياح في أهداب التداخل. يحسب هذا الانزياح بقسمة Δd على طول موجة الضوء المستخدم:

$$Shift = \frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$$

وعند تعويض $L = 11m$، و أخذ $v = 3 \times 10^4 m/s$ (سرعة الأرض حول الشمس)، سيكون فرق الطور الموجي بين الشعاعين هو:

$$\Delta d = \frac{2(11m)(3 \times 10^4 m/s)^2}{(3 \times 10^8 m/s)^2} = 2.2 \times 10^{-7} m$$

و هذي هي المسافه الاضافيه المفترض أن يقطعها الضوء بسبب الأثير. يجب أن تنتج هذه المسافه الاضافيه ازاحة ملحوظه في أهداب نموذج التداخل. وبما أن التأخير من رتبة $10^{-7} m$، فسنستخدم ضوء ذو طول موجي من نفس رتبة التأخير، لأن هذا سيساعد كثيرا في ملاحظة انزياح أهداب التداخل. لذلك في التجربه، تم استخدام ضوء ذو طول موجي في حدود 500 نانومتر. و وجدوا الناتج من معادلة الانزياح كالتالي:

$$Shift = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2} = \frac{2.2 \times 10^{-7}}{5.0 \times 10^{-7}} \cong 0.40$$

كان الجهاز المستخدم بواسطة مايكاسون و مورلي قادر على قياس انزياح قدره 0.01. ولكن كم كانت المفاجأة محزنه، فعندما أجرى مايكلسون و مورلي التجربه، لم يلاحظا أي تغير فعلي في خطوط الأهداب. كل ما لاحظاه من الانزياح كان أصغر من 0.01. وهذا يعني أن سرعه الأرض عبر الأثير تساوي $5\ km/s$ فقط !! لقد اعتقدى في البدايه أن سرعة الأرض حول الشمس قد تؤثر خلال فصول السنة المختلفه، لذلك أعادوا التجربة مرة أخرى بعد ستة أشهر (حيث ستكون الأرض متحركة في الاتجاه المعاكس عن الاتجاه الذي كانت عليه قبل ستة أِشهر)، ولكن لم يجدوا أي جديد. ان التجربة تفشل في تحسس الأثير. وبعد ذلك تم اعادة التجربة عدة مرات بطرق أكثر تطورا وحساسيه وبشروط

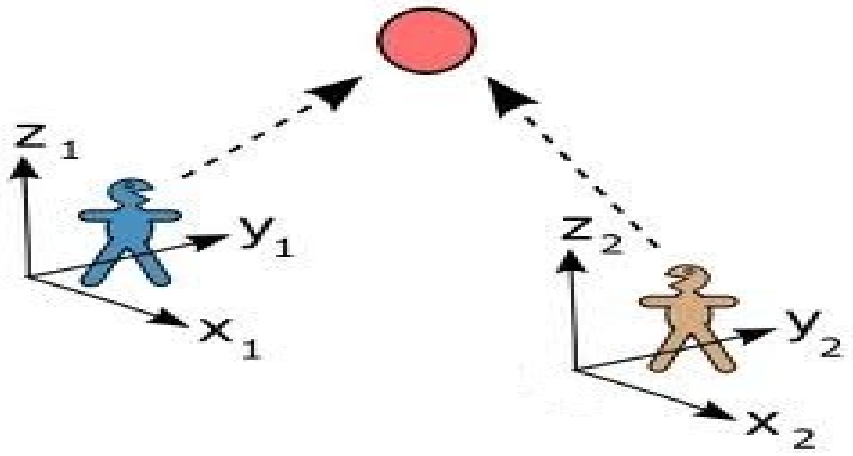
مختلفه، لكن النتيجة واحده، لا تغير في نموذج التداخل! الأمر الذي أدى الى استنتاج استحالة قياس سرعة الأرض بالنسبة للأثير.

لقد فشلت تجربة مايكلسون – مورلي في تحسس الأثير. فماذا يعني ذلك؟ هل الأثير لا وجود له، أم أننا بحاجة الى تفسير سبب اختفائه؟ في الواقع لم يرجح أحد الاحتمال الأول، وانصبت البحوث على تفسير سبب اختفاء الأثير. لكن لما كل هذا التمسك اللامعقول بالأثير؟ ما المميز فيه؟ في الحقيقه كان من الصعب فعلا التخلي عن فكرة الأثير. ان التخلي عنها يعني التخلي ضمنيا عن فضاء وزمان نيوتن المطلقين. وقد علمنا كيف ترسخت فيزياء نيوتن على تفكير العلماء لمدة قرون تليها قرون، مثلما ترسخت فكرة مركزية الأرض. وليس هذا السبب الوحيد لهذا التمسك اللامعقول بالأثير، فقد رأينا كيف برهن ماكسويل بما لا يدع مجال للشك أن الضوء ما هو الا موجة كهرومغناطيسيه، والموجه لابد و أن تحتاج الى وسط ما حتى تنتشر فيه، مثلها مثل أي موجة أخرى. لذلك انصبت جهود العلماء ونظرياتهم وأوراقهم العلمية على وضع نظرية شاملة للأثير، نستطيع بموجبها تفسير جميع المعادلات الميكانيكية والكهرومغناطيسية. لكن هل تعلم مدى صعوبة هذا الأمر؟ انني لا أبالغ ان قلت لك بأنها توازي الصعوبة الحالية التي تواجه الفيزيائيين في توحيد كل قوى الطبيعه في معادلة واحده!! كيف؟ لقد كان هناك تعارض لا مفر منه بين المعادلات الكهرومغناطيسية الماكسويليه و المعادلات الميكانيكية النيوتنيه. هذا التعارض أجبر أكبر الأدمغة في ذاك الزمان على العمل ليل نهار، لمدة نصف قرن، حتى يجدوا حل لهذا التعارض الظاهري. ومع كل هذا الجهد أتى الحل ترقيعيا جدا وغير مريح. سنرى الآن، ما هو ذاك التعارض الظاهري بين المعادلات الكهرومغناطيسيه والمعادلات الميكانيكيه؟ لكن قبل ذلك، دعنا أولا نلقي نظره على ما يسمى بالنسبيه الجاليليه - النيوتنيه.

4 – النسبية الجاليليه – النيوتنية

كثيرا ما نستخدم كلمة نسبي قي حياتنا اليوميه العملية. فعندما تكون متحركا بسيارتك بسرعة 100 كيلومتر في الساعه، ومر أمامك صديقك المتحرك أيضا بنفس السرعة لكن في الاتجاه المعاكس، ستتصل عليه وتقول له: لما كل هذه السرعة الجنونيه؟ سيجيبك بأنك أنت الذي تتحرك بسرعه جنونيه! ثم فجأه يتصل بكما صديكما الذي كان ينظر اليكما من نافذة منزله، ويقول: لا أنت ولا هو يتحرك بسرعة جنونيه، كل ما في الأمر أن الحركة بينكما نسبيه. أنت تتحرك بسرعة $100\ km/h$ وصديقك هو الآخر يتحرك بنفس السرعة بالاتجاه المعاكس، لذلك ستظهر سرعته بالنسبة لك كأنها $200\ km/h$. وهو بالمثل يراك تتحرك بنفس السرعه $200\ km/h$. لكن سرعتكما الفعليه هي $100\ km/h$. والآن يتضح معنى كلمة النسبية. فهي تعني أن الموقف الواحد قد يشاهد ويقاس بأشكال و أرقام مختلفة، بالاعتماد على مكان و حركة الناظر.

لذلك في الفيزياء، نحتاج الى ما يسمى بالاطار المرجعي Frame of Reference حتى نصف أي حركة أو حادثة تمر من أمامنا. الاطار المرجعي هو أن تصف نفسك بثلاث محاور (x, y, z). تصور أن هناك حادثه، لنقل انفجار نجم ما، والمطلوب منك انت وصديقك هو قياس موقع وزمن انفجار ذلك النجم. بما أننا قد فهمنا الآن أن الحركة نسبية وتختلف من مشاهد لآخر، فيجب أن تصف نفسك أنت باطار مرجعي مرمز برموز تختلف عن صديقك. لنقل أن اطار مرجعك أنت هو (x, y, z)، وصديقك هو (x', y', z') كما هو موضح في الشكل (19-2).



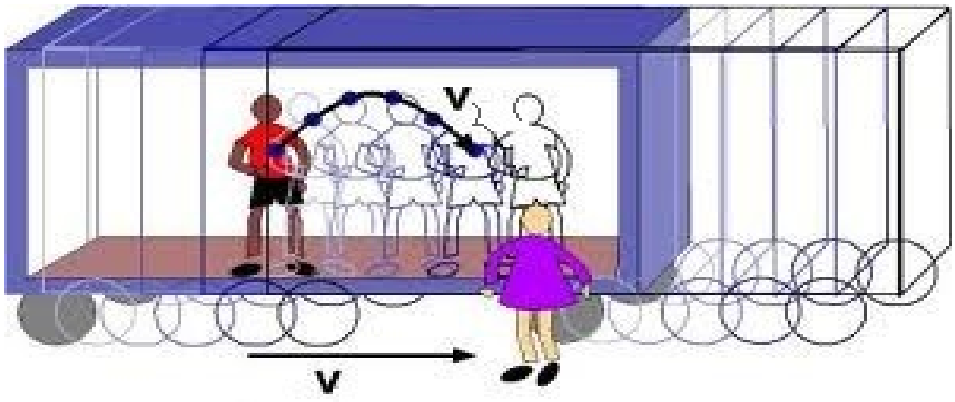
شكل (19-2)

لوصف حادثة ما، على كل راصد أن يصف نفسه باطار مرجعي يتكون من ثلاث محاور.

هناك اطار مرجع مميز في الفيزياء، وهو ما يسمى بالمرجع القصوري Inertial Frame. وهو مرجع يطيع قانون نيوتن الأول. أي أن هذا المرجع يتحرك بسرعة معينه ثابته في اتجاه معين بدون عجله، وبدون تغيرات مفاجئه بالسرعه. كذلك، عندما تتحرك بسرعة ثابته بالنسبة لجسم آخر يتحرك أيضا بسرعة ثابته، تكونا أنتما الاثنين مراجع قصوريه. ان خاصية المراجع القصورية تنطوي على مغزى فيزيائي رائع. لا يوجد هناك مرجع قصوري مفضل على الآخر. وهذا يعني أن نتائج تجربة ما على قطار يتحرك بسرعه ثابته، ستكون هي نفس النتائج لو أجرينا تلك التجربه والقطار متوقف. وهذا يقودنا الى المبدأ الشهير، الذي يسمى بمبدأ النسبيه، والذي ينص على:

(جميع قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها في جميع المراجع القصوريه)

وأقولها مقدما، هذا هو فرض آينشتين الأول في نظريته النسبيه، كما سنرى لاحقا. دعنا نوضح هذا المبدأ أكثر. تصور بأنك داخل قطار يسير بسرعة ثابته، وخارج القطار توجد موظفة القطارات وهي تراقب حركتك. الآن قذفت أنت كرة الى الأعلى، كيف ستبدوا بالنسبة لك و للموظفه؟ بالنسبة لك سترى الكرة ترتفع ومن ثم تنزل بشكل عادي جدا وكأنك على الأرض. لكن بالنسبة للموظفه، سترى الكرة تأخذ شكل ما يسمى بالقطع المكافئ parabola (الشكل 20-2). وعلى الرغم من أنكما لا تتفقان على الشكل الذي تأخذ الكره، ولا تتفقان على كميات أخرى مثل مكان الكرة، سرعتها، كمية حركتها، طاقتها الحركية، طاقة الوضع، الا أنكما ستتفقان على كميات أخرى ستظل ثابته بغض النظر عن الحركة النسبيه بينكما. تسمى تلك الكميات بالثابته أو غير المتغيره invariant. و أمثلتها، الكتله، الشحنة الكهربائيه، الزمن، فرق الطاقة، فرق الجهد، والقوة والعجله. ولأن هذه الكميات لا تتغير فأننا سنستنتج من المعادلات الرياضية أن قوانين نيوتن لا تتغير من مرجع قصوري الى آخر. وهذا يعني أن قوانين الحركة هي نفسها من مرجع قصوري الى آخر. فقانون حفظ الطاقة و قانون حفظ كمية الدفع ثابتان بين المراجع القصوريه على الرغم من اختلاف كمية الطاقة الكلية من مرجع لآخر. بعبارة أخرى نقول أن سرعة القطار الثابته v لا تؤثر على قوانين نيوتن الحركيه، لأنها أصلا



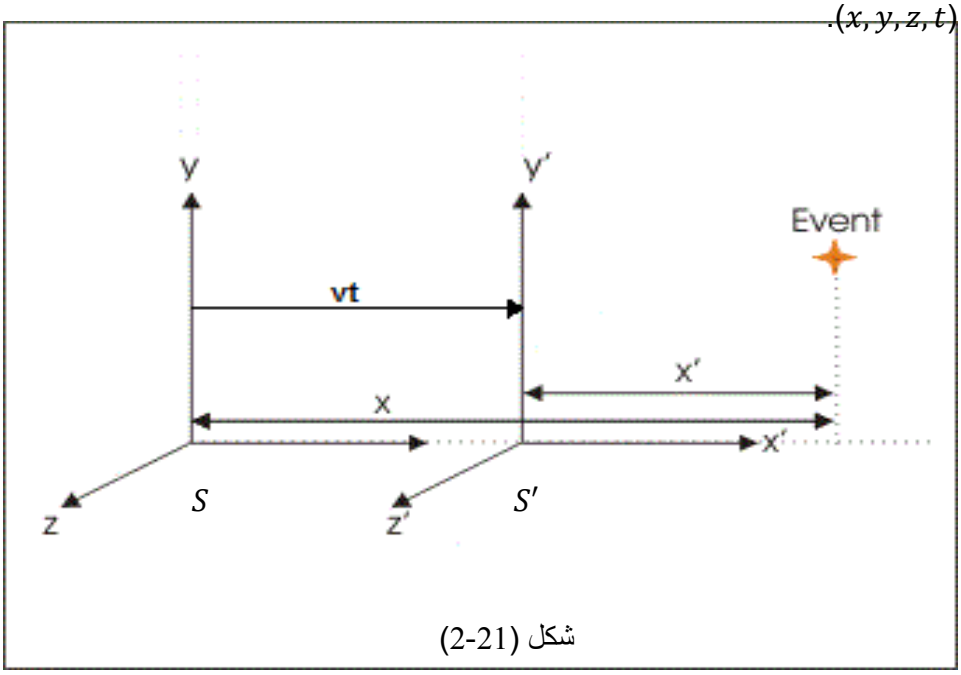
شكل (20-2)

على الرغم من اختلاف بعض الكميات الديناميكية من مرجع قصوري الى آخر، الا أن قوانين الحركة وحفظ الطاقة تبقى كما هي بغض النظر عن الحركة النسبية بين المراجع القصوريه.

غير داخله فيها. ويظهر لنا هذا المبدأ جليا عندما نكون داخل الطائره، وهي تسير بسرعة ثابته، حيث لا تأثير لحركة الطائره v علينا ونحن نأكل، بدون مطبات هوائيه طبعا، لأن وجودها يعني أن الطائره لا تتحرك بسرعة ثابته، وبالتالي ليست في مرجع قصوري.

في الحقيقة، يتضح مبدأ النسبيه أكثر مع اشتقاق المعادلات الرياضيه. لكن الأمر يتطلب ادخال حساب التفاضل من الدرجتين الأولى والثانيه، وهذا خارج أهداف هذا الكتاب. على أنه من الممكن الاشاره الى معادلات جبرية بسيطه مثلما أوردناها أثناء دراسة قوانين نيوتن. وسأكتفي بالاشاره الى كيفية بقاء قانون نيوتن الثاني كما هو عند الانتقال من مرجع قصوري الى آخر. ومن الممكن للشخص ذو الميول الرياضيه أن يشتقها ببساطه. لكن في البداية علينا أن نفهم ما يسمى بالتحويل الجاليلي.

تصور بأن هناك مرجعين قصوريين أحدهما ساكن S والآخر S'، حيث يتحرك هذا الأخير بسرعة ثابته v بالنسبة ل S (الشكل 21-2). تصور الآن بأن حدث شيئ ما في المرجع S'. أي حدث، سواء اشعال سيجاره أو انفجار شيئ ما، أو أي شيئ آخر. نحن نسميه بشكل عام حدث. هذا الحدث، وكما اتفقنا سابقا يجب أن نصفه بمرجع قصوري من ثلاث محاور (x, y, z)، بالاضافة الى الزمن t. أي نصف الحدث بأربع متغيرات (x, y, z, t).



شكل (21-2)

توصف الحادثة Eevent بواسطه ثلاث محاور (x, y, z, t) بالنسبة ل S، و(x', y', z', t') بالنسبة ل S'، وذلك باستخدام التحويل الجاليلي.

والمرجع المتحرك يجب أيضا أن تكون له محاوره الخاصه ولنرمز لها بالرموز (x', y', z', t'). السؤال الآن؛ كيف نجري معادلات التحويل من مرجع لآخر؟ بمعنى آخر، كيف نكتب x بدلاله x'. أو ما العلاقة بينهما؟ انها ببساطة ومن الشكل (21-2)، تكتب كالتالي:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

وتسمى هذه المعادلات بتحويلات جاليليو للمراجع Galilean transformation of coordinates. نلاحظ من هذه المعادلات أن التغيير لم يحصل الا في اتجاه المحور x. وذلك لأن المرجعين القصورريين يتحركان في هذين الاتجاهين فقط. الملاحظه المهمه الآخرى، هي تساوي الزمنين في المرجعين. هذا يعني أن الساعات في كلا المرجعين لا تختلف مهما تغيرت السرعه. لقد كان نيوتن يصور الزمان على أنه شيئ يصب بكيفيه واحده في جميع أنحاء الكون بغض النظر عن أي حركه سواء ثابته أو معجله. دعنا الآن نشتق المعادله الأولى بالنسبه للزمن، سنحصل على:

$$u'_x = u_x - v$$

حيث u'_x سرعة الحدث بالنسبة ل S'، و u_x سرعة الحدث بالنسبه ل S، v سرعة المرجع S' بالنسبة للمرجع S. تسمى هذه المعادلة بقانون جاليليو لجمع السرعات Galilean addition law for velocities. الآن نستطيع أن نفهم مغزى مبدأ النسبية. تصور قانون نيوتن الثاني:

$$F = ma$$

ان العجله ماهي الا مشتقة السرعه بالنسبة للزمن. أي نستطيع كتابة المعادلة السابقه كالتالي:

$$F = m\frac{du_x}{dt}$$

والآن سنستبدل u_x ب u'_x الموجودة بقانون جاليليو لجمع السرعات أعلاه، ومن ثم سنشتق (لا تقلق ان لم تفهم التفاصيل الرياضيه). سنجد أن الناتج هو:

$$F = m\frac{du_x}{dt} \dots !!$$

ألم تتعجب؟ ان القانون لم يتغير أبدا!! لماذا؟ لان مشتقة v (سرعة المرجع S' بالنسبة للمرجع S) بالنسبة للزمن تساوي الصفر. تذكر أن v سرعة ثابته غير معجله، وأن أي اشتقاق لأي قيمة ثابته، رياضيا، يساوي الصفر. وينطبق هذا السيناريو على قوانين حفظ الطاقة وكمية الحركه.

منذ أن اكتشف ماكسويل المعادلات الرياضية التي تحكم سلوك الكهرومغناطيسية، بدأت المشاكل تطرق أبواب الفيزياء النظرية. وبدأت التناقضات تزداد شيئا فشيئا حتى بلغت ذروتها مع تجربة مايكلسون – مورلي التي فشلت في تحسس الأثير كما رأينا. لقد تم افتراض الأثير الحامل للموجات الكهرومغناطيسية، وذلك للمحافظة على تماسك الأفكار النيوتنية والماكسويليه. وقد رأينا كيف كان ماكسويل يحاول جاهدا بناء نموذج أثيري ميكانيكي قائم على أفكار نيوتنية خالصه. لكن بعد فشل تجربة مايكلسون – مورلي في اكتشاف الأثير، زاد الوضع المعقد أصلا تعقيدا. وبدى أن الأفكار والمعادلات تتناثر بشكل غير معهود من قبل. ماذا يحدث؟! لابد من لم الشمل. هكذا كان لسان حال الفترة الممتدة من النصف الثاني من القرن التاسع عشر حتى البدايات المبكرة للقرن العشرين. لكن ما هي بالظبط تلك المشاكل والتناقضات بين القوانين الميكانيكية النيوتنية والمجالية الماكسويليه؟

5 – حملة انقاذ ما يمكن انقاذه

ربما يكون عنوان هذا الجزء هو الأنسب للفترة التي امتدت من بعد تجربة مايكلسون – مورلي حتى الخمس السنوات الأولى من بداية القرن العشرين. قبل الدخول في شرح التناقض الظاهري، دعنى نسترجع معادلات وأفكار ماكسويل. لقد أفلح ماكسويل في توحيد المجالين الكهربائي والمغناطيسي. اذ وجد أنهما وجهان لعمله واحده، يظهر أحدهما في غياب الآخر. وهذا التغير السريع المتبادل بينهما ينتشر بسرعة الضوء. لذلك كان الضوء نفسه ما هو الا موجة كهرومغناطيسيه. اضافة الى معادلات ماكسويل التي تحكم التغير في المجالين الكهربائي والمغناطيسي، يوجد هناك قانون يسمى بقانون لورنتز. ان معادلات ماكسويل وقانون لورنتز يشكلان حجر الأساس للنظرية الكهرومغناطيسيه. حيث نستطيع بتلك المعادلات تفسير جميع الظواهر الكهرومغناطيسية وتفاعلاتها.

لقد رأينا من قبل، في اكتشاف أورستيد، أن التيار الكهربائي المار في سلك قادر على حرف ابرة البوصله. لأن التيار الكهربائي يولد مجال مغناطيسي حول نفسه (الشكل 10-2). لكن ما هو التيار الكهربائي؟ انه وببساطه عباره عن سيل من الالكترونات المتتاليه التي تمر عبر السلك. اذن عندما يتحرك الكترون واحد فأنه يولد مجال مغناطيسي حول نفسه. تصور الآن بأن هناك شحنتين تتحركان بنفس السرعه ونفس الاتجاه، ستنتج كل منهما مجال مغناطيسي يؤثر على الشحنة الأخرى بنفس المقدار. لو علمنا مقدار شدة المجال المغناطيسي B، و سرعة الشحنتين u، وكميه شحنتهما q، ستكون القوة المؤثره عليهما نتيجة المجال المغناطيسي الناشئ من كل شحنة على الأخرى هو:

$$F = q\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B}$$

حيث العلامه ($\times$) تدل على ما يسمى بالضرب الاتجاهي cross product، وذلك لتحديد الزاوية بين اتجاه السرعة والمجال المغناطيسي. لكن لا يهمنا هنا أمر التفاصيل الرياضيه. كل ما يهمنا في هذا القانون هو وجود السرعة u، حيث سترى الآن أنها هي من سبب الصراع بين الأحباب! تأمل القانون مرة أخرى، انه قانون يحسب القوة، أن هذه الكمية كانت ما تكون، يجب أن تساوي بالنهاية الكتلة مضروبة في العجله، أي قانون نيوتن الثاني. ان القوة المؤثره بين الشحنتين تعمل على تجاذبهما أكثر فأكثر، وطالما أن القوة تعتمد على السرعه والسرعة نسبيه، ستكون القوة هي الأخرى نسبيه. وهذه بداية الطلاق بين الميكانيكا الكلاسيكية والنظرية الكهرومغناطيسيه. تذكر بأننا قد رأينا وباستخدام المعادلات الرياضية أن القوة لا متغيره ولا نسبيه Invariant. لكن نرى الآن بأنها قد صارت نسبيه، معتمدة على السرعه. فلو استبدلت السرعة u بالسرعه $u'_x = u_x - v$ ومن ثم وضعتها في المعادله أعلاه، لن تختفي v (سرعة المرجع S بالنسبة للمرجع S') من معادلة القوة!

ان لم تتعجب مما شرحناه في الأعلى، سأراهن بأنك ستتعجب من هذه التجربة الفكريه. لقد اتفقنا الآن على أن الشحنة الكهربائية المتحركة، تنتج مجال مغناطيسي حول نفسها. تصور بأن شخص ما يحمل معه شحنة كهربائية على متن قطار يتحرك بسرعة ثابته، وأنت متوقف بالخارج تراقب حركة الشحنة. طالما أن القطار يتحرك، ستتحرك الشحنة أيضا، وبالتالي ستنتج مجال مغناطيسي. لكن مهلا! ان الشحنة تتحرك بالنسبة لك أنت الواقف بالخارج وتراقب الحركة، ولكن بالنسبة للشخص الجالس مع الشحنة داخل القطار لا يرى الشحنة تتحرك أبدا. وهنا تنشأ مشكله معقدة: ان الشخص المتوقف خارج القطار سيرى مجال مغناطيسي، بينما الشخص الجالس داخل القطار لن يرى أي مجال مغناطيسي، لأن الشحنة لا تتحرك بالنسبة له أصلا! السؤال الآن: هل هناك مجال مغناطيسي أم لا؟ نصدق من ونكذب من؟!

يبدوا أن المشاكل قد كثرت وأثقلت ظهر الفيزياء. فمنذ أن وحد ماكسويل المجالين الكهربائي والمغناطيسي، وأعلن أن الضوء ما هو الا موجه كهرومغناطيسية، بدأت المشاكل تتوالى على الفيزياء الواحده تلو الأخرى. كان السؤال الأبرز من بعد اكتشاف الموجات الكهرومغناطيسية، عن الوسط الذي تنتشر فيه تلك الموجات. تم افتراض الأثير الضوئي كحامل لتلك الموجات. وبدأت حملة البحث التجريبي عنه، لكن التجارب فشلت في اكتشافه. ظهرت بعد ذلك بعض الحلول الترقيعيه، وكان أبرزها فكرة انجراف الأثير التي اقترحها فرسنل، والتي تعرضنا لها من قبل. في عام 1887 أتت تجربة مايكلسون – مورلي، وهي أدق تجربة لكشف الأثير. لكنها فشلت هي الأخرى في اكتشاف الأثير. بعدها بدأ بدأ الشعور بالقلق يتسرب الى فيزيائي ذاك الزمان، وباتة هناك حاجة ماسه لحل تلك المشكله، وانقاذ قلعة الفيزياء النظرية من الانهيار.

من جهة أخرى، رأينا كيف ظهرت معضلة أخرى لا تقل عن أختها الأثيريه: ان معادلات ماكسويل الكهرومغناطيسية لا تطيع التحويل الجاليلي. فقانون القوة الكهرومغاطيسية، والذي يطلق عليه اسم قوة لورنتز، لا يأخذ نفس الشكل عند الانتقال من مرجع قصوري الى آخر. أي أنه ينتهك مبدأ النسبيه. وهذا شيئ غير معهود أبدا في الميكانيكا الكلاسيكية. اذن لدينا الآن، مشكلتان رئيسيتان:

1- لماذا تفشل جميع التجارب في اكتشاف الأثير؟ ما هو التفسير؟
2- لماذا لا تطيع المعادلات الكهرومغناطيسية مبدأ النسبية؟

وبسبب هاتين المشكلتين، ظهرت حملة فيزيائيه لانقاذ ما يمكن انقاذه. واقصد بهذا الاسم هو انقاذ الفيزياء النظرية من هذي الشوائب. كانت الحملة تضم نخبة من أبرز فيزيائي العالم. فعلى سبيل المثال لا الحصر، برزت الأسماء التاليه: فيتزجرالد FitzGerald، فويغت voigt، لارمور Larmor، هيفيسايد Heaviside، طومسون Thomson، سيرل Searle. لكن يبقى القائدان العظيمان لتلك الفتره، هما، العالم و المعلم الكبير هنريك لورنتز Hendrik Lorentz، والرياضي المعجزه هنري بوانكاريه Poincaré Henri، صاحب الاكتشافات التي لا تعد ولا تحصى. تستطيع القول بأن هذين الاثنين، خاصة لورنتز، هما من فرشى الطريق بالزهور والسجاد الأحمر لآينشتين حتى يصل الى النظرية النسبية الخاصه بشكلها الحالي.

سنبدأ الآن من حيث انتهاء فشل تجربة مايكلسون – مورلي في اكتشاف الأثير. لقد ظهرت عده حلول لهذه المشكله، لكن معظمها لم يكن جديا ولم يلاقي قبولا أو ردة فعل واسعه. فمنهم مثلا من قال بأن الأرض لا تتحرك وهي مركز الكون، عائدين بنا الى عصر كوبرنيكوس، و مركزية الارض و تميز البشريه. ومنهم من أخذ بتفسير فرسنل، القائل بأن الأجسام المتحركة تجر معها الأثير. وكانت هناك تفسيرات أخرى.

الا أن هذه التفسيرات جميعها لم تكن متماسكة وكانت تعترض مع أفكار أخرى قد تم اثباتها مرارا وتكرارا بالتجربه.

لكن في عام 1889، أتى تفسير راديكالي مغاير تماما عن طريقة التفكير السائدة. اقترح العالم الايرلندي جيورج فيتزجرالد فرضية مفادها أن الأجسام التي تتحرك في الأثير تتقلص أطوالها في اتجاه حركتها. تشبه هذه الفرضية، كره مطاطية تتحرك في ماء أو وسط لزج. فعندما تتحرك الكرة تنبعج بسبب مقاومتها للوسط. وبعد ثلاث سنوات اقترح هنريك لورنتز، بشكل منفصل، نفس الفرضيه. ومما هو جدير بالذكر أن لورنتز بعد أن سمع أن فيتزجرالد قد سبقه في هذه الفرضيه، سارع في وضع اسم فيتزجرالد في فضل اكتشاف هذه الفكره. لو كان لدينا جسم طوله L، و يتحرك في الأثير، فسوف يتقلص طوله حسب المعادلة التاليه:

$$L = L_{\circ}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

حيث $L_{\circ}$ طول الجسم وهو ساكن، v سرعة الجسم، c سرعة الضوء. الآن، وعلى ضوء فرضية الانكماش نستطيع تفسير سبب فشل تجربة مايكلسون – مورلي في الكشف عن الأثير. انظر الى (الشكل 18-2)، ان الضوء الخارج من المصدر يذهب الى كلتى المرآتين M_1 و M_2. لكن اتجاه الحركة الى M_1 يتحرك مع الأرض. وطالما أن الارض تتحرك مع الأثير فسوف ينكمس الذراع من المصدر الضوئي حتى المرآه M_1 حسب معادلة انكماش الطول. ان هذا التقلص في الطول يعوض النقص المتوقع في الزمن بين الشعاعين الذاهبين الى المرآتين M_1 و M_2. لذلك لن نلاحظ أي تأخير في سرعة الضوء، وبالتالي لن نلاحظ أي انزياح في أهداب التداخل.

لكن مهلا! هل يعني هذا أن الفرضيه صحيحة؟ هل يوجد اثبات تجريبي لهذه الفرضيه؟ ان مقدار الانكماش صغير جدا جدا ولا يمكن ملاحظته تجريبيا. كذلك توجد هنا مفارقه عجيبه، ستوقعنا في عجز لقياس أثر هذا الانكماش بأي طريقه كانت. تصور أنك أردت أن تقيس التقلص الحاصل للجسم عن طريق مسطره. طالما أن الجسم يتحرك، فيجب على المسطره هي الأخرى أن تتحرك، لكن هذا سيجعل المسطره (أداة القياس) تتقلص أيضا، وبالتالي سنحصل على نفس القيمة في كل مره. ثم ان السؤال الأهم من كل ذلك؛ لماذا تتقلص الأجسام أصلا؟ ان الأجسام المتحركه في الأثير لا تشبه، بالضبط، كره المطاط المتحركه في سائل، كما شرحنا قبل قليل. لقد كان هذا مجرد مثال لتوضيح الفكره. لكن الأثير يختلف تماما عن أي مواد نعرفها. لقد كانت فرضيه الانكماش مجرد فرضيه لتعليل ممكن لنتائج تجربة مايكلسون – مورلي.

لكن العالم الكبير هنريك لورنتز استطاع أن يبرر فرضية تقلص الأجسام. وقام بتشييد صرحا نظريا مهيبا، ابتدأه منذ عام 1892 وانتهى به عام 1904. و أقولها بكل ثقة، لولا جهود لورنتز، لما اكتشفت النظرية النسبيه في ذاك العهد أبدا. لكن لو ألقيت نظرة على أبحاث لورنتز -ولا أنصحك بذلك- لملأت منها رعبا. كانت معادلاته صعبة ومعقدة للغايه، والسبب في ذلك بسيط؛ لقد كان مثل الذي يصرعلى امساك رأس ظله، وهو في فترة غروب الشمس! ان لورنتز لم يشك أبدا بصحة فضاء وزمان نيوتن المطلقين. بل ان كل البناء النظري الذي بناه، كان لانقاذ تصور نيوتن للفضاء والزمن المطلقين، مع تفسير معادلات النظرية الكهرومغناطيسية بوجود الأثير. لقد وضع نموذجا أثيريا معتمدا على الافتراضين التاليين:

1- الأثير ساكن سكون مطلق في الكون، ويستطيع أن يؤثر على الجسيمات الأوليه، لكن تلك الجسيمات لا تستطيع التأثير عليه.
2- سرعة الضوء ثابته في الأثير.

بهذين الافتراضين، استطاع لورنتز أن يتوصل الى عدة نتائج، من أهمها ما يسمى بالزمن الموضعي Local Time. لقد رأينا أن معادلات ماكسويل تنتهك معادلات التحويل الجاليليه. أي لو استخدمنا معادلات التحويل الجاليلي على معادلات ماكسويل و قوة لورنتز، فلن تحافظ هذه المعادلات على شكلها الأصلي. بل ستظهر تعبيرات اضافية في المعادلة من الرتبة $(\frac{v}{c})$ و $(\frac{v^2}{c^2})$. لاحظ لورنتز أن هذه التعبيرات الاضافيه تختفي اذا تم استبدال تحويلات جاليليو بهذه التحويلات الجديده:

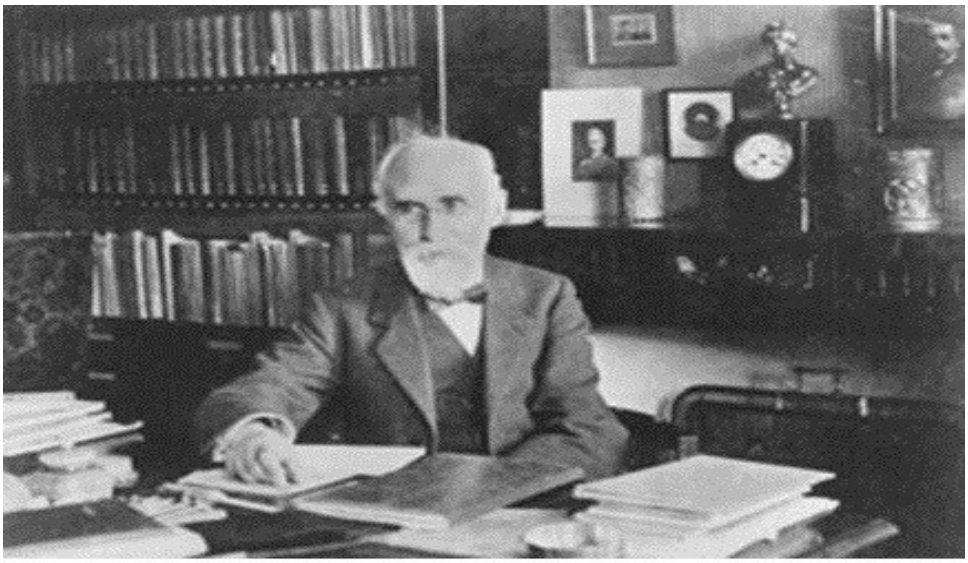
$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t - vx/c^2$$

نلاحظ بأن المعادلات الثلاث الاولى لم تتغير، لكن المعادله الاخيره قد تغيرت. هل تعلم كم هو ثوري هذا التغير الصغير؟! تأملها مرة أخرى، يوجد لديك زمنين مختلفين!! أي أن الزمن نسبي ويعتمد على الراصد! وهذا تعارض صريح مع زمن نيوتن المطلق الذي يصب بشكل وكيفيه



هنريك لورنتز

هنري بوانكاريه

واحدة في الكون، بغض النظر عن حركة أو سكون الراصد. لقد سمى لورنتز الزمن t' باسم الزمن الموضعي Local Time. لأن الزمن، كما هو واضح من المعادلة، يعتمد على المكان x. وهذا أول ربط ضمني بين المكان والزمان.

في عام 1904، خطى لورنتز خطوة أكبر من السابقه، وهي الخطوة الأهم قبل أن يدخل آينشتين في القصه. لقد نشر ورقة بعنوان (الظاهره الكهرومغناطيسية في نظام يسير بأي سرعة أقل من سرعة الضوء). لقد دمج تحويلاته المعدله أعلاه مع فرضية الانكماش التي اقترحها فيتزجرالد. وكان لورنتز قد برر فرضية الانكماش، مدعيا بأن الأجسام تنكمش نتيجة تأثير الأثير على الكترونات الجسم المتحرك، مما يجعل الأجسام تنكمش بنفس القيمة التي تنبأت بها معادله فيتزجرالد. وبعد أن دمج تحويلاته الجديده مع فرضية التقلص، حصل على التحويلات التاليه[5]:

$$x' = \gamma\,(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\,(t - \frac{vx}{c^2})$$

حيث $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$، وهو ما يسمى بمعامل لورنتز Lorentz factor. تسمى هذه التحويلات بتحويلا لورنتز Lorentz Transformations. وكان بوانكاريه هو من أطلق عليها هذه التسمية في عام 1905. نلاحظ بأن التغير قد كان بضرب المعادلتين الأولى والأخيرة بمعامل لورنتز. والآن نكون قد حصلنا على تحويلات قادرة على أن تجعل معادلات ماكسويل لا متغيره. أي أننا لو استخدمنا معادلات التحويل اللورنتزي تلك على معادلات ماكسويل و قوة لورنتز، وذلك عند للانتقال من مرجع قصوري الى آخر، فسوف تحافظ المعادلات على شكلها الأصلي.

لقد توصل لورنتز الى معادلات صحيحة، لكنه فسرها بشكل خاطئ تماما، لأنه كان معتمدا بالأساس على أفكار خاطئه. لقد اعتبر أن الانكماش في الطول شيئ حقيقي يحدث بالواقع، و اعتبر أن التحول في الزمن (الزمن الموضعي) شيئ وهمي ينتج من تفاعلات خفيه بين الكترونات الجسم والأثير. وفي أحيان أخرى كان يعتبرها مجرد أداة رياضية ارشادية تساعد في ايجاد التحويلات بين المراجع القصورية.

ولا عجب في كل ذلك، فقد قلت لك من قبل، كان مشروع لورنتز هو تفسير المعادلات الكهرومغناطيسية بوجود الأثير مع المحافظة على فضاء وزمن نيوتن المطلقين، مهما كانت التكلفه. ومع شكل هذا الحل المرقع، استطاع نموذج لورنتز أن يفسر عدة ظواهر من أهمها، ظاهرة الزيغ الضوئي و تأثير دوبلر وتجربة فيزو.

وفي عام 1904، وسع بوانكاريه دراسات لورنتز، واستطاع أن يسد معظم الثغرات التي كانت موجوده في نموذج لورنتز. توصل الى عدة نتائج مهمه جدا، واليك بعضها:

1- لا جدوى من محاولة قياس سرعة الأرض بالنسبة للأثير.
2- هناك حد أعلى للسرعة، لا يمكن تجاوزها، وهي سرعة الضوء c.
3- كتل الأجسام تزداد بزياده سرعتها.
4- أكد على المغزى الكوني لمبدأ النسبيه.

اضافة الى ذلك اقترح فرضية للتغلب على صعوبة فرضية انكماش الأجسام. كانت هناك صعوبه ظاهرية تواجه هذه الفرضية. فعندما يتحرك جسم ما بسرعة عالية، سوف ينكمش وبالتالي سوف تتغير البنية الداخلية لالكترونات ذاك الجسم. وهذا يعني أن تلك الالكترونات سوف تتفتت أو تنفجر. لذلك اقترح بوانكاريه قوة أخرى غير كهرومغناطيسية داخل الالكترونات لكي تحافظ على استقراره وتماسكه. واخذت تعرف تلك القوة باسم اجهادات بوانكاريه Poincaré stresses.

لقد بذل بوانكاريه جهودا جباره، والحق يقال، لو كان بوانكاريه ينظر الى المعادلات التي استنبطها من وجهة نظر فيزيائي، لحظي بشرف اكتشاف النظرية النسبية الخاصه. لكنه كان ينظر الى المعادلات من وجهة نظر رياضي بحت، ناهيك عن تمسكه بالأثير كفرضية أساسيه لأي نموذج. لقد أثمرت جهود لورنتز وبوانكاريه في حل كثير من التناقضات التي كانت موجوده بين الفيزياء الكلاسيكيه والنظرية الكهرومغناطيسيه. لكنها خلقت مشاكل أخرى. وافترضوا افتراضات ترقيعيه بين حين وأخرى. ومن دون شك لم يكن العلماء مطمئني القلب من كل هذه النماذج. لقد كثرت المشاكل وتداخلت بشكل عصي على الفهم الواضح والبسيط. اننا الآن بحاجة الى عقلية من الطراز الجاليلي – النيوتني. اننا بحاجه الى عقليه ثوريه، تعيد لنا ترتيب أوراقنا التي تبعثرت في كل مكان، وتضعنا على الدرب الصحيح. هنا يدخل آينشتين أخيرا، بشكل أشبه بالدراما، محدثا ثورة علميه، لا تضاهيها ثوره، الا من طراز ثورة نظريه الكم أو الثورة الدارونيه.

ملاحظات الفصل الثاني

1. من الممكن اهمال حركه كوكب المشتري في هذه المحاكمه، فعندما تدور الأرض نصف دوره حول الشمس يكون كوكب المشتري قذ دار بزاويه صغيره جدا يمكن اهمالها.
2. اذا أردت معرفه طريقه برادلي والتي تسمة بظاهره الزيغ أو الانحراف الضوئي Aberration of light، يمكنك الاطلاع على: **النسبيه وجذورها،** يانيش هوفان، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر. كذلك انظر: **النسبيه في متناول الجميع،** جيمس كولمان، دار المعارف المصريه.
3. مايكلسون هو أول عالم أمريكي يحصل على جائزه نوبل في الفيزياء، وذلك عام 1907.
4. يانيش هوفمان، **النسبية وجذورها،** ترجمة: مروان عريف، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الأولى، 2000.
5. تجدر الاشاره هنا، الى ذكر اسمي العالمين فويغت voigit- و لارمور Larmor. فلقد وضع الأول تحويلات تشبه التحويلات اللورنتزيه في عام 1887. لكن كان قد بناها على أفكار تخص تأثير دوبلر والمواد غير قابله للانضغاط. أما لارمور فقد طور تحويلات معتمدة على تحويلات لورنتز، في عام 1897. أي قبل أن يدمج لورنتز تحويلاته الجديدة مع فرضية الانكماش. لكن كلى التحويلين لا يشبهان التحويلات اللورنتزيه المعروفه اليوم.

الفصل الثالث

النظرية النسبية الخاصه

"المنطق سيأخذك من أ الى ب، بينما الخيال سيأخذك الى كل مكان"

آلبرت آينشتين

1 – فرضيتان من ذهب

ولد آلبرت آينشتين عام 1897، العام التي توفي فيه ماكسويل، في بلدة ألم Ulm الألمانيه. نشأ في أسرة عادية جدا لا يوجد في تاريخ أجدادها ولا عبقري واحد. كان أبوه، هرمان آينشتين و عمه، يملكان مصنعا صغيرا للأدوات الكهربائية البسيطة، حيث مصدر رزق العائله، التي تعاني من بعض الصعوبات الماليه. عرف عن طفولة أينشتين الكسل والخمول، لم يتعلم النطق حتى بلغ الثالثه، ولم يكن هناك شيئ يشير بأنه سيكون واحد من أعظم العقليات في تاريخ البشريه. وعندما أرسله أبوه الى احدى المدارس الابتدائيه، نصحه مدير المدرسه بأن يبحث لابنه عن أعمال يدويه، لأنه لا ينفع لأي عمل ذهني.

كان أينشتين يقضي فترات طويله في مصنع العائلة الكهربائي. وقد لاحظ عمه اهتمام آينشتين الصغير بالأدوات الكهربائيه. وعندما بلغ آينشتين الخامسة من عمره أهداه عمه بوصله مغناطيسيه، ظلت عزيزه عليه حتى فارق الحياة. كان آينشتين الطفل، مندهشا باستمرار من طرف ابرة البوصله التي تشير دائما الى الشمال أينما وضعتها.

لما بلغ أينشتين السابعة عشر من عمره، علم نفسه الرياضيات وعلوم أخرى، وبذلك استطاع الدخول الى معهد العلوم التطبيقيه في مدينة زيورخ. في عام 1902 حصل آينشتين على وظيفة بسيطة في مكتب تسجيل براءات الاختراع في مدينه برن Bern السويسريه. وفي عام 1905 انفجرت عبقريته بشكل غير طبيعي تماما. انفجار شبيه بالانفجار الذي حدث مع نيوتن عندما كان منعزلا في مدينة وولستورب. نشر ثلاث أوراق علميه، في المجلة الألمانيه الشهيره Annalen der Physik. ومن دون أي مبلاغه تعتبر تلك البحوث التي نشرها أسس الفيزياء الحديثة كلها. في ورقته الأولى تكلم عن الحركة البروانيه، مقدما كثيرا من التنبؤات حول حركة الجزيئات الموزعه بشكل عشوائي في السوائل، ومؤكدا على النظرية الذرية للمادة. في ورقته الثانية طرح نظريته الشهيره في الفوتونات ليحل بها مشكلة التأثير الكهروضوئي، ممهدا الطريق الى نشوء نظرية الكم، التي قد بدأها العالم الألماني وصديق آينشتين وصاحب المجلة العلمية السابقه ماكس بلانك. أما ورقته الثالثه فقد كانت بعنوان (حول كهروديناميكية الأجسام المتحركه) وهي ما يعرف اليوم باسم "النظريه النسبيه الخاصه".

دعنى الآن ننتقل الى النظرية النسبيه الخاصه بهدوء نسبي حتى نفهم كيف كان يفكر آينشتين. لنعد الى ظاهرة الحث المغناطيسي، التي تكلمنا عنها في الفصل السابق. لقد اكتشف فارادي أن المغناطيس المتحرك قادر على توليد تيار كهربائي في دائرة كهربائيه. و بالمثل لو كانت الدائره الكهربائية هي من تتحرك والمغناطيس هو الثابت، سينتج أيضا تيار كهربائي في الدائره. لكن هنا نقع في مشكله تفسير الظاهرة. ان المغناطيس المتحرك يولد مجال

آلبرت آینشتین

كهربائي، وهذ المجال هو المسؤوول عن تحريض تيار كهربائي في الدائره. لكن اذا كان المغناطيس ساكنا، فأنه فقط يولد مجال مغناطيسي. ويكون هذا المجال هو المسؤول عن تحريض تيار كهربائي في الدائره عندما نحركها. هل أدركت المشكله أم بعد؟ حسنا، دعنى نأخذ هذا المثال حتى تدرك ماهية المشكله: تصور بأنك جالس في قطار، يتحرك بسرعة ثابته، و يوجد داخل القطار مغناطيس عملاق، بحيث اذا مر القطار تحت أسلاك الكهرباء التي في الشارع، سيولد فيها تيار متحرض. وتصور بأنني موجود خارج القطار أراقب التيار المتولد بالتحريض المغناطيسي. المطلوب مني أنا (خارج القطار)، ومنك أنت (داخل القطار) أن نقيس ونفسر سبب تولد التيار المتحرض في الأسلاك. بالنسبة لي، سيكون سبب تولد التيار، هو حركة المغناطيس العملاق داخل القطار. ان حركة المغناطيس العملاق ستولد مجال كهربائي، وهذا بدوره يحرض تيار في الأسلاك بقيمة قدرها لنقل x. لكن أنت، داخل القطار، ماذا ستقول؟ انت تتحرك مع المغناطيس بسرعة ثابته، لذلك سيكون المغناطيس بالنسبة لك ساكن تماما، وبذلك لن ترى مجال كهربائي، بل سترى مجال مغناطيسي عادي، سيكون هو السبب، بالنسبة لك، في تحريض تيار كهربائي في الأسلاك، لكن بنفس القيمة x التي رصدتها أنا خارج القطار. أنا أقول أن السبب في توليد تيار متحرض في الأسلاك هو المجال الكهربائي، وأنت تصر على أن السبب هو المجال المغناطيسي! فمن فينا الصادق؟ ان السيد آلبرت آينشتين، صاحب الستة وعشرين ربيعا، يقول لنا، وبكل بساطه، بأن كلانا صحيح. ما أبسط هذا الرجل! أنت تراه مجال مغناطيس وأنا أراه مجال كهربائي، ونبقى حبايب، أين المشكله!! لكن بشرط واحد، هو وجوب أن يكون مقدار القوة المتولد واحدة بالنسبة لي ولك. هكذا شق آينشتين طريقه، ليضع لنا الفرض الأول في نظريته وهو:

(جميع قوانين الميكانيكا يجب أن تكون هي نفسها في جميع المراجع القصوريه)

هل ترى شيئ جديد في هذا الفرض؟ بالطبع لا، فلقد رأيناه عندما كنا نتكلم عن النسبية الجاليليه النيوتنيه. في الواقع، هذه الفرضيه موجوده منذ جاليليو. لكن آينشتين الآن يوسعها ويعطيها مغزى كوني شامل لم يكن موجودا في السابق. لقد جعله مبدأ ينطبق على كل الظواهر الكونيه. سواء الديناميكيه أو الكهرومغناطيسيه أو البصريه، بل حتى على المكان والزمان نفسيهما كما سنرى. في حين كان في السابق وحتى عهد لورنتز و بوانكاريه، كان هذا المبدأ ينطبق فقط على الظواهر الديناميكيه. ان آينشتين يود أن يقول لنا كل شيئ نسبي في الكون وليس من المفيد أن نتكلم و نبحث عن المطلق.

لقد كان آينشتين ماخي التفكير، أي متأثرا بطريقة تفكير ماخ كثيرا. ولقد تكلمنا عن ماخ في الفصل الأول من هذا الكتاب. كان ليبنيز أول من انتقد فكرة الفضاء المطلق، التي اقترحها نيوتن. ومن بعد ذلك انتقل صداها الى ماخ، حيث وسعها بشكل علمي رائع. ان

لورنتز وبوانكاريه، كانا يسيرا على خطى نيوتن. بينما آينشتين كان يسير على خطى ماخ. وقد ذكرت من قبل بأن آينشتين وصف نفسه بالتلميذ المخلص في نهاية رساله أرسلها الى ماخ. يبدوا بالفعل أن الألمان، لهم طريقة تفكير ثوريه، انهم عباقرة بالفعل.

دعنى نوضح معنى مقولة (كل شيئ نسبي). تلك المقوله التي تعود الى ليبنيز وماخ والآن نحن في طريقنا الى آينشتين، حيث سيضعها بشكلها النهائي.

تصور بأنني أنا و أنت، نمتلك مركبتان فضائيتان، واننا بصد رحلة فضائيه الى كوكب ما، لنستريح من هموم الأرض ومشاكلها التي لا تنتهي. لقد بدأنا الرحله، وأنت بدأت بالاقلاع، وصارت سرعتك 4000 ميل في الساعه. الآن يجب علينا أنا و أنت أن نكون نسبيين مثل ماخ وآينشتين. فعندما تقول أن سرعتك 4000 ميل بالساعه، عليك أن تحدد بالنسبة لماذا؟ ستقول بالنسبة للأرض. بعدة فترة من الزمن أصبحت خارج الأرض، وما زلت تقول بأنك سرعتك هي 4000 ميل في الساعه. وأسألك مرة أخرى، بالنسبة لماذا؟ أنت الآن خارج كوكب الأرض بأكمله، قد تكون سرعتك تلك، بالنسبة لكوكب المريخ أو بالنسبة للشمس؟ تجاوبني: بالنسبة لكوكب زحل. الآن انطلقت أنت الى الفضاء العميق، ولم تعد تستطيع أن ترى أي جسم في الفضاء. و فجأة مررت أنا بجانبك بسرعة 1000 ميل في الساعه. ماذا ستستنتج؟ ستدرك بأن سرعتي تساوي 5000 ميل في الساعه. السبب في ذلك هو معرفتك المسبقة بأن سرعتك عندما غادرت الأرض كانت تساوي 4000 ميل في الساعه. لكن هل هذا كلام صحيح تماما؟ في الحقيقه ليس بالضروره، قد تكون سرعتي أنا 6000 وأنت 5000 أو قد تكون سرعتي 9000 و أنت 8000. تذكر أننا في فضاء معتم و سرعتي و سرعتك تقاس بالنسبة لبعضنا البعض فقط. بل انه حتى من الممكن أن أكون أنا ساكن و أنت تتحرك بسرعة 1000 ميل في الساعه الى الوراء. اذن نستنتج أن الحركة نسبيه تماما، ولا معنى للحديث عن حركة مطلقة، أي بالنسبة لشئ ساكن سكون مطلق. ان كلمة سرعة بحد ذاتها تصبح عديمة المعنى، اذا لم تكن بالنسبة لشئ ما. جميع السرعات التي نذكرها في حياتنا اليوميه تكون بالنسبة للأرض. تصور أن السفر عبر الفضاء صار أمرا طبيعيا بالنسبة للبشر. ستجد أن برج المراقبه يقول لكابتن احدى السفن الفضائيه، رجاءا، أبطئ من سرعتك الى 1000 ميل في الثانية بالنسبة للثقب الأسود الذي بجوارك! طبعا، من الأفضل أن يبقى الكابتن بعيدا عن الثقب الأسود، حتى لا يتحول طاقم الرحلة وركابها الى طبق معكرونه فاخر!!

اذن الكلام عن الحركة بالنسبة لشيئ مطلق لا معنى له من الأساس. لا يوجد في الكون جرم سماوي يمكن اعتباره مرجعا مطلقا. فالأرض تدور حول محورها، وكذلك تدور حول الشمس، والشمس وطاقم كواكبها بدورهم يدورون حول مجرتنا درب التبانه، ومجرتنا تدور مع مجرات أخرى حول الكون و.... هل أدركت الآن لماذ لورنتز وبوانكاريه ومن

سبقوهم قد أتعبونا كثيرا بنظرياتهم؟ انهم يفترضون و يبحثون عن شي غير موجود أصلا، مرجع ثابت مطلق سموه (الأثير).

لماذا كانت معادلات ماكسويل لا تطيع مبدأ النسبيه؟ أي لماذا تتخذ شكل مختلف عند الانتقال من مرجع قصوري الى آخر. افترض الفيزيائيين أن المعادلات ستأخذ شكلها المميز اللامتغير، بالنسبة لمرجع ثابت مطلق مميز هو الأثير. وقد رأينا كيف تصدى لورنتز وبوانكاريه الى هذه المهمه، وخلصوا الى استنتاجات مهمه، لكنهم في نفس الوقت خلقوا لنا مشاكل أخرى.

ان آينشتين لا يرفض فكرة الأثير كليا، لكنه يقول وبكل بساطه؛ لماذا نتمسك أصلا بشئ فشلت جميع التجارب في ايجاده. و الأهم من ذلك، هو عدم حاجتنا لهذه الفرضية أصلا. وسنرى أيضا، أن النتائج التي حصل عليها آينشتين لا تتنبأ بأي شكل من الأشكال بوجود الأثير.

بعد انتهائنا من فرض آينشتين الأول، لننتقل الى فرضه الثاني، ومن دون مقدمات، ينص هذا الفرض على:

(سرعة الضوء ثابته دائما في الفراغ بالنسبة لأي راصد)

ومرة أخرى، ليس هذا الفرض جديدا. فقد توصل له لورنتز وبوانكاريه في أبحاثهم. ولكن كالعاده تم تأويله بشكل خاطئ.

لنعد مرة أخرى، أيها القارئ الصبور، الى سفننا الفضائيه. تصور بأنني أسير بسرعه قدرها 100 ميل في الثانيه بالنسبة لك. بعد ذلك قمت أنا باطلاق صاروخين، لهما سرعة تساوي 300 ميل في الثانيه، أحدهما أطلق في اتجاه سير مركبتي الفضائية والآخر في عكس اتجاه سير المركبه. و كل ما هو مطلوب منك، قياس سرعة هذين الصاروخين من سفينتك الفضائيه؟ لا أعتقد بأن هذا شيئ جديد عليك، فلقد صرت تعلم قانون جمع السرعات، وكيفيه حسابه. ان الصاروخ السائر في اتجاه مركبتي، يتم جمع سرعته مع سرعة مركبتي، والصاروخ السائر في عكس اتجاه المركبه، يتم طرح سرعته من سرعة مركبتي. لذلك سرعة الأول ستكون 400 ميل في الثانيه، بينما ستكون سرعة الصاروخ الآخر 200 ميل في الثانيه.

الآن، سنعيد نفس التجربة بالضبط، لكن هذه المرة سأستبدل اطلاق الصاروخين بشعاعين ضوئيين. والمطلوب منك حساب سرعة الشعاعين. من البديهي للعقل الانساني أن يقوم باستخدام قانون جمع السرعات. لأن شعاع الضوء بالنهايه يبقى سرعة. أنت تعلم بأن سرعة الضوء تساوي 186 ألف ميل في الثانية، لذلك، بالنسبة لشعاع الضوء الصادر في

اتجاه المركبه، ستقوم بجمع سرعة الضوء مع سرعة المركبه وتحصل على سرعة تساوي 286 ألف ميل في الثانيه، بينما ستقوم بطرح شعاع الضوء من سرعة المركبه، بالنسبة للشعاع السائر في عكس اتجاه المركبه، وبذلك تحصل على سرعة تساوي 86 ألف ميل في الثانيه. ومن دون مقدمات، ليس في هذين الجوابين شيئ من الصحه! ان سرعة الضوء تبقى واحده سواء تحركت في اتجاه الضوء أو عكسه أو وقفت تماما، أو حتى -وهذا مستحيل- لو سرت أنت أو أنا بسرعة الضوء! ستبقى سرعة الضوء دائما 186 ألف ميل في الثانيه، غير معتمدا أبدا على حركة مصدره. قد يبدوا ذلك غريبا جدا، لكن ماذا نفعل، انه قانون كوني، والقوانين الكونيه لا تسير حسب أهوائنا أو منطق عقولنا.

اذن لدينا فرضيتان، يطلب منا آينشتين أن نسلم بهما فقط:

1- **جميع قوانين الميكانيكا يجب أن تكون هي نفسها في جميع المراجع القصوريه**
2- **سرعة الضوء ثابته دائما في الفراغ بالنسبة لأي راصد**

في الحقيقه، هاتين الفرضيتان قد تم اثباتهما بالتجربة، قبل أن يضع آينشتين نظريته النسبيه. فهما الشيئان الوحيدان اللذان تم اثباتهما بعدة طرق. لكن بالنسبة للفرضية الأولى، فكما قلنا من قبل، كان يعتقد أنها صالحة فقط للأنظمة الميكانيكيه. لكن آينشتين جعلها فرضيه صالحه لكل الظواهر الفيزيائيه. أما فرض ثبات سرعة الضوء، فقد رأينا كيف أثبتته تجربة مايكلسون – مورلي[1]، وتجارب عديدة من بعدها، كانت قد أنشأت في الأساس للبحث عن الأثير. أما هذا الأثير، فلم يكن آينشتين بحاجه له على الاطلاق.

سنواصل الآن السير على خطى أينشتين، ونرى نتائج هاتين الفرضيتان. ان النظرية النسبيه معروفه لدى العامه بتعقيدها و صعوبة فهمها. في الواقع هذا غير صحيح. هي بحد ذاتها ليست صعبه، لكن نتائجها، فعلا، صعبة التصديق لمن لم يعتاد على سماعها.

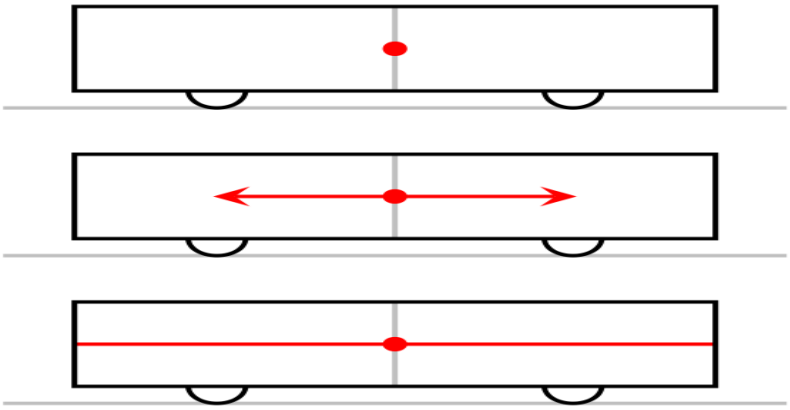
2 – نتائج الفرضين

برأيي يقع الذنب نسبيا على نيوتن، في جعل علماء الفيزياء، نوعا ما، يتأخرون في اكتشاف النظرية النسبيه. ان شبح فضائه وزمانه المطلقين قد ساد تماما على تفكير الفيزيائيين من بعده. لكن هذا أمر طبيعي جدا، لأن نيوتن، هو أول من بنى قوانين فيزيائيه متكامله. لذلك من الطبيعي جدا على أي شخص في بداية اكتشاف قوانين الطبيعه، أن يرى المكان و الزمان مطلقين. كما أن تماسك قوانين نيوتن التي بناها على فرضيتي المكان والزمان المطلقين، هي من جعلت تلك فروضه تؤخذ كمسلمتين. وفوق كل ذلك تبدو تلك الفروض جميله جدا وتتماشى مع الحس العام بالنسبة لأي شخص. و لما كانت فرضيتي

المكان والزمان المطلقين ثوريتان، قد أسسهما شخص أسطوري بوزن نيوتن، فمن العداله أن يعدلهما شخص أسطوري آخر بوزن آينشتين.

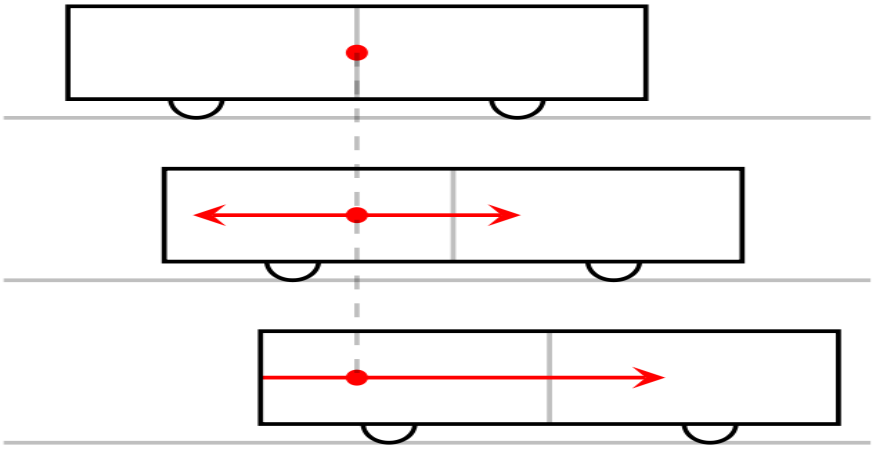
سنعود أنا وأنت من رحلتنا الفضائيه- التي اكتشفنا فيها فرضيتي آينشتين – الى الأرض. وسنقوم بتجربه أخرى، على الأرض، لنستكشف نتائج فرضيتي آينشتين. لأننا لسنا بحاجه الى مركبات فضائيه هذه المره. بل كل ما نحتاجه هو قطار متحرك، بحيث تكون أنت من يركب بداخله، وأنا أنظر اليك من الخارج. وسنقوم بتجاربنا الفيزيائيه، وجميع أدواتنا معنا.

تصور بأنك أنت، داخل قطار يتحرك بسرعه منتظمة قريبه من سرعة الضوء، وأنا أقف خارج القطار أراقب ماذا يحدث معك في الداخل. و تصور أيضا، بأنه يوجد مصباح ضوئي معلق في منتصف القطار تماما. عندما يشتعل ذلك المصباح، سيصدر ضوء ينتشر في أرجاء القطار بسرعة واحدة تساوي سرعة الضوء c. المطلوب مني ومنك، هو ملاحظة الضوء المتجه الى مقدمة القطار والضوء المتجه الى المؤخره. و السؤال هو: هل ستصل ومضتى الضوء في نفس الوقت؟ بالنسبة لك أنت داخل القطار، سترى أن الومضتين ستصلان في نفس الوقت الى المقدمة والمؤخرة (الشكل 1-3). لكن ماذا عني أنا المراقب خارج القطار؟ سأرى شيئ مختلف عنك!! سأرى بأن ومضة الضوء المتجه الى المؤخره تصل قبل ومضة الضوء المتجه الى المقدمة! كيف يكون ذلك؟ هل من الممكن أن تقع حادثتين يراهما شخص تحدثان في نفس الوقت بينما لا يراهما آخر متزامنتين؟ ان آينشتين يقول لنا، وبكل ثقه، نعم. اليك الفكرة، في اللحظة التي صدرت منها ومضتي الضوء الى المقدمة والمؤخره، يكون القطار قد تحرك مسافه معينه الى الأمام. أي أن جدار القطار الأمامي يحاول الهروب من ومضة الضوء المتجه اليه، بينما الجدار الخلفي يتحرك ناحية الومضه المتجه اليه (الشكل 2-3). لذلك سأرى أنا المراقب في الخارج، أن ومضة الضوء المتجه الى مؤخرة القطار تصل قبل ومضة الضوء المتجهه الى مقدمة القطار. بينما أنت داخل القطار لا ترى ذلك، لأنك في حركة منتظمة داخل القطار. وهنا تأتي ملاحظة آينشتين المذهله؛ ان جميع الأشياء التي أمامك الآن، بما فيها الكتاب الذي بين يديك، تراها بعدما يسقط عليها الضوء وينتقل الى عينيك. انظر الى أبعد نقطة من حولك، انك تراها بعدما ينتقل الضوء منها الى عينيك. لكن بسبب سرعة الضوء العاليه جدا جدا، يبدو لنا بأننا نرى الأشياء التي أمامنا لحظيا. لكن عند استخدام المسافات العملاقه، يتضح معنى القول أكثر. انظر الى نجوم الليل، هل تحسب بأنك تراها وهي معلقة بالسماء هكذا لحظيا. انك ترى الضوء التي أصدرته تلك النجوم قبل مليارات السنين! انك ترى ماضيها، وليس حاضرها الآن. لقد أدرك آينشتين بأنه حتى الضوء يحتاج الى وقت لينتقل من مكان الى آخر. لكن الضوء مختلف عن جميع السرعات الأخرى. هل تذكر الفرضية الثانيه؟ ان سرعة الضوء ثابته بالنسبة لأي مشاهد مهما كانت حركته ووضعه. لذلك عندما اشتعل المصباح الضوئي داخل القطار،



شكل (3-1)

بالنسبة للشخص ، داخل القطار، سيرى ومضتي الضوء السائرتان الى مقدمة ومؤخرة القطار، قد وصلتا الى الجدارين في نفس الوقت.



شكل (3-2)

بالنسبة للشخص الواقف خارج، سيرى بأن ومضة الضوء المتجهه الى مؤخرة القطار، تصل قبل ومضة الضوء المتجهه الى مقدمة القطار، وذلك بسبب حركة القطار.

تكون الومضه المتجه الى المقدمة والمؤخرة تسير بسرعة واحده ثابته بالنسبه لك أنت داخل القطار و بالنسبة لي أنا خارج القطار. وهكذا توصل آينشتين الى الاستنتاج التالي:

الحادثتان التي تبدوا متزامنه بالنسبة لمرجع قصوري معين، ليست بالضروره أن تكون متزامنه لمرجع قصوري آخر

وفي ذلك يقول أينشتين:

(وبمقارنة هذين التوقعين نقع على نتيجه مذهله تناقض وضوحا المفاهيم التي تبدو راسخه في عرف الحس العام والفيزياء التقليديه. هناك حادثان، هما وصولا شعاعي الاشاره الواحده الى الجدارين، يراهما الراصد الداخلي متواقتين ويراهما الراصد الخارجي غير متواقتين. ان الفيزياء التقليديه تفرض ضمنا وجود ميقاتيه واحده، بمعنى أن الزمن ينساب واحدا لدى كل الناس، أي أن ميقاتيه واحده تكفي، ويمكن أن تخدم كل الراصدين في أي مرجع كانوا، شريطه أن يروها فقط. وعلى هذا فان العبارات التي مثل (تواقت) و (قبل) و (بعد) كان لها معنى مطلق مستقل عن أي مرجع يرصد الزمن منه. فالحادثان اللذان يبدوان متواقتين من مرجع ما، لابد، في عرف القيزياء التقليديه، من أن يبدوا متواقتين أيضا من أي مرجع آخر)[2].

اذن بالفعل لقد توصل أينشتين الى استنتاج ثوري، انتزع فيه صورة الزمان المطلق التي آمن بها كل الناس، والتي رسخها نيوتن في الفيزياء بشكل جوهري. ان الزمن يعتمد على وضع الراصد. تعال الآن لنفحص هذه النتيجه أكثر فأكثر.

دعنى نركز الآن على شعاع الضوء الذاهب الى مقدمة القطار. لقد أدركنا بأن زمن وصول الاشاره الضوئيه الى جدار القطار الأمامي مختلف بالنسبة لي ولك. أنت تراه يصل الى الجدار قبل أن أراه أنا، في الخارج، وسبب ذلك كما أوضحنا، هو هروب الجدار من هذه الومضة الضوئيه نتيجة حركة القطار. حتى نرى ذلك، سنقيس أنا و أنت الفترة الزمنيه منذ صدور الضوء من مصدره حتى وصوله الى الجدار ومن ثم عودته مرة اخرى الى المصدر. لنتفترض بأنك قد قست الفترة الزمنيه، وأطلقت عليها الرمز $\Delta t_{\circ}$. ان قياسي أنا لهذه الفترة الزمنيه لن يكون مساويا لقياسك، بل ستكون فتره زمنيه أطول. سأجد بأن فترتي الزمنيه تساوي:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\circ}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

حيث v سرعة القطار، c سرعة الضوء. أي أن فترة زمن ذهاب الضوء وايابه بالنسبة لي تساوي فترت زمنك Δt، مضروبه في معامل لورنتز γ، والذي يساوي:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

وقد رأيناه كثيرا من قبل. وعلى ذلك نقول بشكل عام:

الساعات المتحركة تجري ببطئ بالنسبة للمشاهد الساكن

لكن علينا الآن أن ننتبه لشيئ هام آخر. تذكر ماذا تقول الفرضية الأولى؛ جميع قوانين الميكانيكا يجب أن تكون هي نفسها في جميع المراجع القصوريه. أي أنك أنت المتحرك مع القطار وتنظر الي أنا في الخارج، تستطيع أن تتعتبر نفسك ساكنا وأنا من يتحرك اليك بنفس السرعه، وبذلك تصبح معادلة تأخر الزمن السابقه، صحيحه أيضا بالنسبه لك أنت في الداخل. أي أنك سترى الزمن يجري ببطئ خارج القطار، بينما يجري بشكل طبيعي داخل القطار. وأنا أرى الزمن يجري ببطئ داخل القطار، بينما يجري بشكل طبيعي خارج القطار. وليس فينا أحد صحيح والآخر مخطئ. كلانا محق، والسبب هو طبيعة الزمن النسبيه نفسها.

اليك الآن نتيجة أخرى، لا تقل غرابه عن أختها. نحن نعلم بأن السرعة تساوي المسافة ضرب الزمن:

$$d = c \, . \, t$$

ونحن نعلم كذلك بأن سرعة الضوء ثابته تماما بالنسبة لي ولك؟ وهنا تظهر مشكله؛ ان الزمن الذي استغرقه الضوء للوصول الى جدار القطار الأمامي، مختلف بالنسبة لي ولك. فأنا أراه بعد أن تراه أنت، وبالتالي زمن قياسي لوصوله يختلف عن زمن قياسك. وعلى ذلك لو عوض كل واحد منا زمنه الخاص في المعادله السابقه، سيحصل كل منا على قيم مختلفه لسرعة الضوء! وهذا غير مقبول، لأن الفرضية الثانيه، وكذلك التجربه، تقول لنا بأن سرعة الضوء ثابته بالنسبة لأي راصد. اذن ما هو الحل؟ الحل هو أن المسافه أو الطول هو الآخر يجب أن يتغير مع الحركه. أي أن الطول هو أيضا شيئ نسبي، مثله مثل الزمن تماما. لقد اشتق آينشتين معادلة تغير الطول مع الحركه، و وجدها كالتالي:

$$L = L_{\circ}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

حيث $L_{\circ}$ طول الجسم وهو ساكن. أي أنني سأراك أنت والقطار والمسافة التي يقطعها الضوء، وكل شيئ آخر داخل القطار، قد انكمشت أطوالهم. ومرة أخرى، هذا أمر نسبي، أي أنك أنت، داخل القطار، لن ترى هذا الانكماش، سترى كل شيئ بطوله الطبيعي، بينما ستراني أنا الواقف خارج القطار، وكل ما حوالي، قد انكمشت أطوالنا بالنسبة لك، بنفس قيمة المعادلة السابقه. والسبب، مرة أخرى، هو صلاحية قوانين الفيزياء في جميع المراجع القصوريه. في الحقيقه، هذه المعادلة ليست جديده علينا، فقد رأيناها من قبل. أنها المعادلة التي اقترحها فيتزجرالد ولورنتز. لكن كان تفسيرهما مختلف تماما. كان اقتراحهما يتمثل في انكماش الأجسام التي تتحرك في الأثير. أي أن الانكماش هو انكماش حقيقي وليس ظاهري، كما اقترح آينشتين. وهذا هو سبب فشل جميع النظريات السابقه على النظرية النسبيه. اذ كانت كلها نظريات تحاول أن تطيع وجود الأثير، بينما آينشتين لم يجد ما هو ملزم لافتراض ذلك الأثير. بل كل ما هو ملزم اطاعته، ثبات سرعة الضوء بالنسبة لأي راصد.

بهاتين النتيجتين للزمان والمكان، حافظ آينشتين على ثبات سرعة الضوء. ان سرعة الضوء تساوي المسافة على الزمن. بالنسبة لك داخل القطار ستكون معادلتك هي[3]:

$$c = \frac{L_{\circ}}{T_{\circ}}$$

بينما بالنسبة لي، ستكون المعادله:

$$c = \frac{L_{\circ}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{T_{\circ}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{L_{\circ}}{T_{\circ}}$$

أي أن سرعة الضوء لم تتغير بالنسبة لي كذلك. لقد أدرك آينشتين أن الزمان و المكان أمرين نسبيين، يتغيران حسب موضع الراصد، بينما سرعة الضوء ثابته ثبات مطلق. لقد وجد كميه لا متغيره invariant تربط الزمان والمكان وسرعة الضوء معا:

$$\sqrt{c^2T^2 - L^2}$$

سنختلف أنا وأنت حول قيم T و L، لكن سيكيف كل منهما الآخر، بحيث نبقى دائما نحصل على قيمة واحدة في كل مرة نفيس فيها الطول - الزمن. وهذا ما يشرحهه لنا آينشتين:

(ألا نستطيع أن نفترض تغيرات، في ايقاع الميقاتيه المتحركة وفي طول العصا المتحركه، تجعل من سرعة النور نتيجه لهذه التغيرات؟ الحقيقه أننا نستطيع ذلك. وفي هذه النقطة بالذات يتركز الفرق الأول بين النسبيه والفيزياء التقليديه. ويمكن أن نعكس هذا التسلسل فنقول: اذا كانت لسرعة الضوء قيمة واحده في كل المراجع، فلابد للميقاتيات من أن يتغير ايقاعها بالحركة ولا بد للعصي من أن يتغير طولها بالحركه ولابد من امكانيه تعيين القوانين التي تتحكم في هذين التغيريين[4].)

لقد قضى آينشتين تماما على زمن نيوتن المطلق الذي يصب في الكون في كيفيه واحده. كانت الحادثتان المتزامنتان بالنسبة لشخص ما، تكون بالضرورة متزامنة بالنسبة لأي لشخص آخر. لأن الحادثتان متزامنتان بالنسبة للزمن الكوني المطلق. لكننا أصبحنا أكثر ثقة الآن، وبتنا نعلم بعدم صحة فكرة الزمان والمكان المطلقين. وكما يقول آينشتين علينا[5]:

(...أن نتخلص من الأحكام المسبقة الراسخة في أعماقنا والتي نكررها ونؤمن بها دون تمحيص)

الآن، لدينا زمان ومكان نسبيين. الأمر الذي يترتب عليه كثير من الأمور كما سنرى. أول هذه الأمور هو التحويل من مرجع الى آخر. لقد رأينا في بداية الفصل السابق، كيف نحول من مرجع الى آخر، عن طريق ما يسمى بالتحويلات الجاليليه، و وجدنا تلك المعادلات كالتالي:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

لكن واضح جدا بالنسبة لنا الآن -بعدما أصبحنا نسبيين- عدم توافق هذه المعادلات مع ما استنبطناه من نسبية المكان والزمان. لاحظ المعادله الأولى، تحتوي على مسافه x وزمن t. ونحن نعلم الآن بأن الحركه تجعل الزمن يتباطئ، والطول ينكمش. ونلاحظ من المعادلة الأخيره، أن الزمن واحد لا يتغير من مرجع الى آخر. وهذا غير صحيح. لذلك راح آينشتين يبحث عن تحويلات جديده تتفق مع نسبية المكان – الزمان، ووجد ضالته في:

$$x' = \gamma\,(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\,(t - \frac{vx}{c^2})$$

ويا للعجب! انها تحويلات لورنتز، التي وضعها لكي يحافظ على شكل معادلات ماكسويل عند الانتقال من مرجع الى آخر! لقد اعتقد لورنتز بأن هذه التحويلات تنطبق على الظواهر الكهرومغناطيسيه فقط. وقد اشتقها معتمدا على فرضية الأثير الساكن، وانكماش الأجسام عند تحركها في الأثير. وعلى الرغم من أن المعادلة الأخيره، تدل بشكل واضح على تغير الزمن من مرجع الى آخر، الا أن لورنتز اعتبره زمن وهمي غير حقيقي، فقط أداه رياضيه تبسط لنا المعادلات. وظل متمسكا بفكرة الزمن المطلق. بينما آينشتين اشتق هذه التحويلات من فرضيتين بسيطتين. ان هذه التحويلات تنتج من طبيعة المكان والزمان نفسيهما، ولسنا بحاجة الى فكرة الأُثير، ولا الى أطوال تنكمش انكماش حقيقي في الأثير.

ان قوانين الفيزياء تبنى بشكل تدرجي، بحيث يعتمد كل قانون على القانون الذي قبله. لذلك اذا سقط أحد هذه القوانين، سيتسبب في سقوط البقيه. ان اكتشاف آينشتين لنسبية الزمان - المكان قد تسبب في سقوط جميع قوانين نيوتن. لأن الزمان و المكان بمثابة درجة السلم الأولى، التي بنى نيوتن قوانينه عليها. ولما أسقط آينشتين هذه السلمه الأولى، فقد سقط بناء نيوتن بالكامل. وأصبحنا بحاجة الى بناء قوانين جديدة تتماشى مع طبيعة الزمان - المكان النسبيه. فالتعديل لابد أن يطول قانون جمع السرعات وجمع قوانين نيوتن في الحركه.

لنعد مرة أخرى الى محطتنا. أنت داخل القطار تتحرك بسرعة u تساوي 60 ميل في الساعه، بالنسبة لي أنا الملراقب الخارجي. سينضم الينا شخص ثالث، يسير داخل قطار آخر بسرعة v تساوي 30 ميل في الساعه، أيضا بالنسبة لي، وسيكون متجها في عكس اتجاه قطارك. والسؤال الآن: ما هي السرعة النسبية بينكما؟ حسب قانون جمع السرعات الكلاسيكي سيكون الناتج:

$$v' = u + v = 60 + 30 = 90$$

لا شيئ غريب في ذلك. لكن تصور الآن بأن لديكما قطارين يتحركان بسرعات عاليه جدا تقترب من سرعة الضوء. أنت تتحرك بسرعة 0.7 من سرعة الضوء، أي $0.7c$، و صاحبنا الآخر يتحرك بسرعة 0.4 من سرعة الضوء، $0.4c$. والسؤال مرة أخرى، كم تبلغ السرعة النسبية بينكما؟ لو استخدمنا نفس المعادلة أعلاه، سيكون الناتج:

$$v' = 0.7c + 0.8c = 1.1c$$

أي أن الناتج سيكون أعلى من سرعة الضوء. لكن نحن نعلم بأن هذا ممنوع. لأن سرعة الضوء هي الحد الأعلى للسرعه في الكون. لذلك اشتق آينشتين قوانين جديده لجمع السرعات، معتمدا على تحويلات لورنتز، ووجدها كالتالي:

$$v' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

الآن لا حظ، حتى لو كانت سرعة أحدكما تساوي سرعة الضوء. لنقل بأن سرعتك أنت تساوي سرعة الضوء، $u = c$. عندما يتم تعويض تلك القيمة في المعادلة أعلاه سنحصل على:

$$v' = \frac{c - v}{1 - \frac{v}{c}} = \frac{c\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)} = c$$

ومرة أخرى نحصل على نتيجه أنيقة جدا. حتى لو وصلت سرعة أحدكما الى سرعة الضوء، ستكون السرعة بينمكا هي سرعة الضوء. ان سرعة الضوء مميزه جدا، تبقى ثابته بغض النظر عن كيفية حركتنا.

هناك شيئ ما قد واعدتك به عندما كنا في الجزء الأول من بداية الفصل الثاني. ربما نسيته، ولكن أنا أتذكره. لقد كنا نتكلم عن نظرية الأثير حينها. و لو رجعت الى ذاك الجزء، سترى بأن فرسنل قد اشتق معادله تحسب سرعة الضوء في زجاج قرينة انكساره n، وقد كانت المعادلة كالتالي:

$$v_n = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

حيث v سرعه الموشور الزجاجي بالنسبه للأُثير. وقد قلنا بأن فيزو قد تحقق من هذه المعادله تجريبيا. لكن في عام 1907، أي بعد ظهور النظرية النسبيه، استخدم العالم الألماني ماكس فون لاوه Max von Laue قانون جمع السرعات، الذي وجده آينشتين، على تجربة فيزو و وجد النتيجة التاليه:

$$v = \frac{c}{n} + \frac{v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}{1 + \frac{v}{cn}}$$

الآن، لاحظ لوكانت سرعة الجسم v صغيره جدا بالنسبة لسرعة الضوء. أي $\frac{v}{c} \ll 1$، ستتخذ المعادله السابقة الشكل التالي:

$$v_n = \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

وهي معادلة فرسنل الأصليه! لكن هذه المعادله قد وضعت لتفسير النتيجة السلبيه لقياس سرعة الأثير بالنسبة للأرض. فحسب فكره فرسنل سينسحب الأثير مع الأرض أثناء حركتها، وبالتالي لا يمكن قياس سرعته بالنسبه للأرض. لكننا الآن قد قطعنا شوطا طويلا في فهم قوانين الطبيعه. ونحن نعلم بأن الأثير غير موجود أصلا، فجميع تلك النظريات كانت مصطنعه. ان تحقق فيزو من تلك المعادله لا يعني بأن تفسير فرسنل صحيح. بل تعني بأن قانون جمع السرعات الذي وجده آينشتين هو الصحيح.

3 – حد السرعة والديناميكا النسبيه

لماذا سرعة الضوء هي الحد الأعلى للسرعه؟ نحن لم نرى ذلك كفرضيه. اذن من أين أتت؟ صحيح أنها ليست فرضيه، لكنها نتيجه. ارجع الى المعادلتين الخاصتين بتمدد الزمن، وانكماش الطول. و تخيل أن سرعة الجسم v قد وصلت الى سرعة الضوء c. سنجد أن الناتج هو:

$$\Delta t = \infty$$

$$L = 0$$

أي أن الزمن سيتوقف، والطول سينكمش حتى يصبح طوله صفرا!! وهذا شيئ لا يمكن تصوره في الواقع. لذلك، قبل أن يكتشف آينشتين النظرية النسبيه، كان يقول بأنه قد تخيل نفسه يمتطي شعاع ضوء، وحاول أن يتصور ماذا يحدث؟ لكنه واجه صعوبه في تخيل ذلك. لا أبعاد لا زمن لا شيئ..!

لقد قلت في وقت ما، بأن النظرية النسبية قد ضربت المكان والزمان المطلقين، وهما الشيئان الأساسيان الذي بنى نيوتن جميع قوانين الفيزياء عليهما. الأمر الذي تطلب تعديل كل شيئ، واعادة بناء معمار فيزيائي آخر. من بين تلك الأشياء التي يجب أن يطولها التعديل هي قوانين نيوتن في الحركة التي تكلمنا عنها في الفصل الأول. لم يعد التحويل الجاليلي سوى حالة خاصه من التحويل الكوني الأشمل وهو تحويل لورنتز، الذي قلل لورنتز نفسه من أهميته عندما استنتجه، واعتبره حاله خاصه من التحويل الجاليلي. لكننا نرى الآن بشكل جلي أن التحويل الجاليلي ما هو الا حالة خاصه من التحويل اللورنتزي، ينتج عندما تكون

سرعة الأجسام صغيره جدا بالنسبه لسرعة الضوء. اذن يجب أن تتعدل قوانين الديناميكا النيوتنيه، بحيث تطيع التحويل اللورنتزي، ولا تتعدى سرعة الضوء.

أول تلك القوانين التي تخطر علينا هو قانون نيوتن الثاني، والذي ينص على تناسب القوة مع العجله:

$$F = ma$$

والسؤال هو؛ هل يحترم هذا القانون نتائج النظرية النسبيه الخاصه؟ الجواب، لا. تصور بأن قوة ثابته قد بدأت بالتأثير على جسم ما، كان ساكنا عند بدئ التأثير. سيتسارع الجسم ويتسارع أكثر فأكثر بوتيره ثابته مع مرور الوقت. أي يزداد بسرعة معينه ثابته، لنقل مثلا، 10 متر في كل ثانيه. اذا استمر الحال هكذا سيأتي وقت سيتحرك فيه الجسم بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وهذا مستحيل كما نعلم. لقد اشتق آينشتين قانون جديد للعجله، يختلف عن قانون نيوتن باحتوائه على معامل لورنتز. لكن شكله يخبرنا بحقيقه مدهشه. عندما كنا نتكلم عن قوانين نيوتن، أتينا على ذكر معنى الكتله. وقد عرفنا الكتله على أنها مقياس لمقاومة الحركة أو التغير. وضربنا مثال لجسم كبير يبدي مقاومة عاليه للحركه، مقارنه بجسم صغير، عندما نسلط عليهم نفس القوة. اذن الكتلة هي سبب مقاومة التغيير في الحركه. لكن قانون القوة الجديد، يخبرنا أيضا بأن سرعة الجسم أيضا، تقاوم أي قوة خارجيه تحاول أن تزيد من تعجيل ذلك الجسم. أي أن الجسم الساكن سيقاوم القوى الخارجية لتغيير حركته بمقدار أقل من الجسم الذي يتحرك. وكلما اقتربت سرعة الجسم من سرعة الضوء، سيبدي ذلك الجسم مقاومة عنيفه جدا ضد القوى الخارجيه التي تحاول تسريعه أكثر، حتى اذا بلغت سرعة الجسم سرعة الضوء، يصبح من المستحيل أن نزيد في تسارع الجسم وهما حاولنا. و هكذا أصبح قانون القوة الجديد متماشيا مع تحويلات لورنتز ومتطلبات النسبيه، من وجود سقف أعلى للسرعة في الكون لا يمكن تجاوزه، وهي سرعة الضوء.

اذن الجسم الساكن يقاوم التسريع بواسطة كتلته السكونيه. بينما الجسم المتحرك يقاوم التسريع بواسطه كتلته السكونيه بالإضافة الى سرعته، والتي يعبر عنها بالطاقة الحركيه. لكن طاقة الحركه تحتوي على السرعه v، وهذه كميه متغيره، اذن ستعتمد الكتله في هذه الحالة على سرعة الجسم v، وبالتالي ستصبح الكتلة كمية نسبيه هي الأخرى. نستطيع أن نوجزها بالمحاكمة التاليه: الكتلة و القصور الذاتي ما هما الا وجهان لعملة واحده، والقصور الذاتي يزداد مع زيادة السرعة، اذن الكتلة تزداد مع زيادة السرعه. وتعطى معادلة الزيادة تلك كالتالي:

$$m = \frac{m_\circ}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

حيث $m_\circ$ كتلة الجسم وهو ساكن. لكن هل تعلم عزيزي القارئ، كم هو مضلل هذا التعريف؟! لقد وضعته لسببين؛ أولهما لأن آينشتين قد استخدمه في ورقته عام 1905، وثانيهما لكثرة ما يستخدم هذا التعريف في الكتب. سواء الكتب الجيدة أو الرديئه.

ان أول من أشار بشكل واضح وصريح الى مفهوم زيادة الكتلة مع السرعه، هو هنريك لورنتز. لكن قبل لورنتز كانت هناك أصداء تجريبيه حول هذه القضيه. فقد كان جوزيف طومسون أول من فتح باب هذه القضيه عام 1881، عندما بين أن الأجسام المشحونه تبدي مقاومه للحركه أعلى من الأجسام الغير مشحونه. أي كأن الأجسام المشحونه تكتسب كتلة اضافيه! لكنه لم يعتبر هذه الزيادة حقيقيه في الكتله، بل اعتبرها زيادة ظاهريه. بعد طومسون تابع العالمين اوليفر هيفسايد (1889) و جورج سيرل (1897) تلك القضيه، واستنتجوا بأن المجال الكهربائي للشحنات المتحركه يتصرف و كأنه يمتلك كتله اضافيه، غير كتلة الجسيم نفسه. وقد اعتبر هيفسايد أن هذه الزيادة في القصور الذاتي زياده حقيقيه، وليست ظاهريه كما قال طومسون. وقد اكمل كل من ماكس ابراهام و فلهلم فين، تلك البحوث وتوصلوا الى نتائج مشابهه.

لكن جميع هؤلاء العلماء، كانت نظرتهم كهرومغناطيسيه بحته. وكانوا يتحدثون عن زيادة طاقة المجال الكهربائي والمغناطيسي، واعتبارهما هما الأساس، بدلا عن الأساس الميكانيكي. لذلك لم يشر أحد، بشكل صريح، الى مفهوم زيادة الكتله مع السرعه. لكن لورنتز هو أول من أشارالى ذلك بشكل واضح في عام 1889. وقد عرف الكتله على أنها حاصل تقسيم القوة على العجله. لذلك وجد نوعين من الكتله: اذا كان اتجاه القوة موازي لاتجاه السرعة، يكون شكل المعادله كالتالي:

$$m = \gamma^3 m_\circ$$

واذا كان اتجاه القوة عمودي على اتجاه السرعه، تصبح المعادله كالتالي:

$$m = \gamma\, m_\circ$$

نلاحظ مباشرتا بأن هذه المعادله تشبه معادلة آينشتين. ولقد أطلق ماكس ابراهام في عام 1902، اسم الكتلة الطوليه Longitudinal mass على النوع الأول، والكتلة المستعرضه Transverse mass على النوع الثاني. رغم أن ابراهام قد استنتج صيغتين أكثر تعقيدا

بكثير من صغتي لورنتز. ذلك لأنه كان أول من طبق ما يسمى بديناميكا هاملتون – لاغرانج Hamilton – Lagrange Dynamic على الأنظمه الكهرومغناطيسيه.

لقد استخدم آينشتين نفس تعريفي الكتله أعلاه في ورقته الخاصه بالنسبيه عام 1905. لكنه لم يذكر شيئ اسمه الكتله النسبيه. ان أول من أطلق تسمية الكتلة النسبيه Relativistic Mass كان ريتشارد تولمان Richard Tolman وذلك في عام 1912. وقد ظل مفهوم الكتلة النسبيه و كتلة السكون، قائمين و معتمدين في أكثر الكتب، حتى الحديثة منها. لكن في السنوات اللاحقة، لم يحبذ آينشتين هذا التعريف، وقد أرسل رساله الى الكاتب و المحرر لنكولن بارنيت Lincoln Barnett، كان هذا نصها:

(انه ليس من الجيد أن نضع تعريف الكتله $M = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ للأجسام المتحركه، حيث أنها لا تعطي تعريفا واضحا. ان من الأفضل أن لا نضع تعريف غير تعريف "الكتلة السكونيه" m بدلا من M، فمن الأفضل أن نشير الى تعبيري الزخم والطاقه للجسم المتحرك [6].)

أي من الأفضل استخدام تعبيري الزخم النسبي والطاقة النسبية بدلا من تعريف الكتلة النسبيه. لكن لماذا شعر آينشتين بضلالة هذا التعريف؟ ان معادلة الكتلة النسبية تخبرنا بزيادة كتلة الجسم مع حركته. تصور الآن بأن هناك جسم كتلته تساوي مثلا 400 كيلوغرام يتحرك بسرعة تساوي 0.2 من سرعة الضوء، سيبدو للمشاهد الخارجي بأن الكتلة، حسب معادلة نسبية الكتله، قد أصبحت:

$$m = \frac{m_\circ}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} = \frac{400}{0.9797} = 408.2$$

والسؤال الآن، ما معنى هذه الزياده؟ اذا قلت بأنها زياده حقيقه، فأنك تنتهك قانون حفظ الكتله! من أين تأتي هذه الزياده؟ هل تخلق كتلة اضافيه من العدم؟! طبعا لا. لذلك كان هذا التعريف مضلل، على الرغم من كثرة استخدامه في الكتب. لكن المؤلفين الحديثين، مثل جون ويلر Wheeler و تايلور Taylor قد تجنبوا هذا التعريف، وذلك في كتابهم الرائع (فيزياء الزمكان) Spacetime Physics:

(ان مفهوم الكتله النسبيه يؤدي الى سوء فهم.....انه يجعل زيادة طاقة الجسم مع السرعة أو الزخم يبدو وكأنه متصل مع تغيرات داخليه في تركيبة الجسم. في الواقع، ان زيادة الكتلة مع الطاقة لا تنبع في الجسم ذاته، لكنها تأتي كنتيجه حتمية لخصائص تركيبة الزمكان نفسها[7].)

نحن الآن أمام حقيقه فيزيائيه تقول لنا بأن زيادة سرعة الجسم تقاوم محاولة تسريعه من القوى الخارجيه. ان كمية السرعة تدخل بشكل جوهري في تعريف كمية الحركه وطاقة الزخم وتعريف القوة أيضا. لذلك لم تسلم هذه التعريفات من التغيير. ان السرعه في النهايه ما هي الا طاقة، لذلك نطلق تسميات مثل طاقة الحركه وطاقة الزخم. و بما أن السرعة تقاوم التغيير، اذن تكون السرعة شيئا ما يشبه الكتله، والسرعه طاقه، اذن تكون الطاقه هي صوره من صور الكتله والعكس صحيح. لقد اشتق آينشتين معادلة طاقة الجسم الكليه عندما يكون متحركا بسرعة قدرها u. حيث وجدها كالتالي:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

وعندما يكون الجسم ساكن $(u = 0)$ تتخذ المعادلة السابقه الشكل التالي:

$$E = mc^2$$

و هي المعادلة الأشهر في الفيزياء الحديثه. والتي لطالما وجهت اليها تهمة صناعة القنابل النوويه[8]. ان هذه المعادلة تخبرنا بأنه حتى الأجسام التي تكون في حالة سكون، تمتلك طاقه عاليه جدا جدا! والحق يقال، لقد توصل بوانكاريه وآخرون الى نفس شكل هذه المعادلة بالضبط قبل آينشتين، لكنهم اعتبروا أن هذه المعادله صالحه للطاقة الكهرومغناطيسيه فقط. في حين اعتبرها آينشتين كباقي معادلاته، صالحه لكل جسم وطاقه كان ما كان شكلها ومنبعها وأساسها.

4 – العالم رباعي الأبعاد

لا شك بأننا الآن قد أصبحنا نفكر بشكل مختلف تماما عن طبيعة المكان والزمان. ويعود الفضل الى الرجال الذين أوصلونا الى الفهم الصحيح لطبيعة المكان - الزمان النسبيتين. لو عدت وألقيت نظرة على تحويلات لورنتز، لوجدتها تعامل الزمان ككميه عاديه شأنها شأن المكان. بل أكثر من ذلك، نرى من معادلة التحويل الخاصة بالزمن، أن الزمان يذوب بشكل جذري في المكان. انك تستطيع أن تكتب الزمان بدلاله المكان والمكان بدلالة الزمان. وهذا واضح جدا من المعادلتين الأولى و الأخيره من تحويلات لورنتز. لقد تكلمنا في بداية هذا الفصل عن كيفيه وصف الحادثه. اننا نحتاج الى مرجع قصوري يتكون من ثلاث محاور مكانيه لوصف الحادثه، بالاضافة الى محور الزمن. وهذا شيئ واضح في حياتنا اليوميه، فعندما تواعد شخص ما، فأنك تصف له المكان و وقت اللقاء. وهذا اقرار منك، حتى قبل أن تعرف النسبيه، بأن الزمان كيان ضروري لوصف الشيئ. وقد رأينا ان استخدام الزمان

لوصف الحادثة موجود منذ تحويلات جاليليو. لكن الزمان كان يعتبر مطلق يجري بشكل ثابت بالنسبة لجميع الراصدين. ونحن نعلم الآن، بفضل النظرية النسبية، أن هذاغير صحيح تماما. ان نسبية الزمان و معاملته في المعادلات معاملة المكان، قد جعلت أستاذ آينشتين، الرياضي هرمان منكوفسكي Hermonn Minkowski بأن يعامل الزمن كبعد عادي حاله من حال الأبعاد الأخرى (x, y, z).

حتى نفهم ذلك، دعنى أنا و أنت نعود الى تجاربنا مرة أخرى. ستركب أنت هذه المره سياره، وتنطلق في عدة جولات. ستقطع مسافه 8 أميال بسرعة ثابته قدرها 90 ميل في الساعه لكل الجولات، وستعيد التجربه عشر مرات. أما أنا فسيقتصر دوري على تحديد زمن كل جوله تقوم بها. لنفترض بأنك قد قطعت الجوله الأولى في 4 دقائق. من المفترض أن يكون قياسي لجميع جولاتك الأخرى أيضا 4 دقائق، طالما أنك تحافظ على نفس سرعتك في كل جوله. لكنني تفاجئت بأن الجولتين الأخيرتين قد استغرقت منك 4.5 و 5 دقائق على التوالي. أي أن هناك زيادة في الوقت! فما الذي حدث؟ سيتبادر الى ذهني أن هناك عطل ما في السياره؟ لكنك تبتسم وتقول لي: بأن الجولتين الأخيرتين لم تقطعهما بخط مستقيم، بل قطعتهما بخط مائل في الاتجاه الشمال الشرقي (الشكل 3-3). أنا لا أعلم لماذا فعلت ذلك، لكنك ستساعدني في الشرح كثيرا. عندما قمت بسلك الطريق بشكل مائل، فأنك قد جعلت المسافه تطول أكثر، وبالتالي زمن الرحله قد زاد هو الآخر. بلغة الفيزياء، نعرضها كالتالي؛ ان سرعة السياره البالغه 90 ميلا في الساعه قد أعطت جزئا من سرعتها الى الاتجاه الشمال الشرقي. لذلك كانت السرعة في كل جولاتك الأولى مكرسه بالكامل من الاتجاه الجنوبي الى الشمالي بدون أي انحرافات. لكن عندما بدأت تميل الى الاتجاه الشمال الشرقي، فأنك تكون قد أعطيت جزء من سرعتك الى ذاك الاتجاه. وهذا هو سبب زيادة الوقت في الجولتين الأخيرتين، على الرغم من أن السرعة واحده.

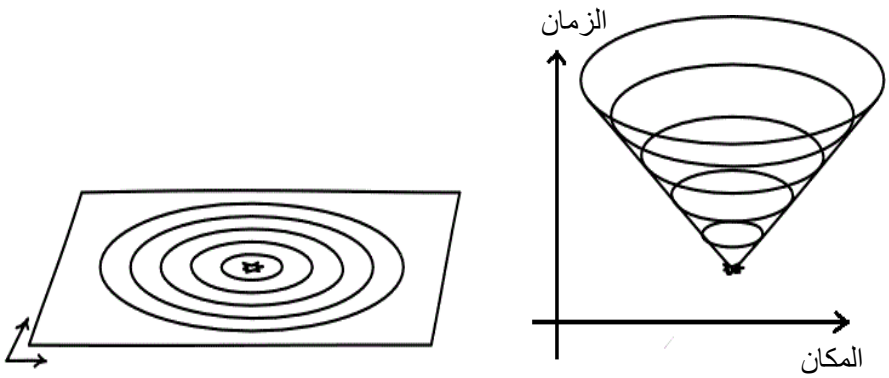
شكل (3-3)

في الجولات الأولى كنت تقود السياره بخط مستقيم. لكن في الجولتين الأخيرتين، بدأت تميل الى التجاه الشمال الشرقي.

بنفس هذه الطريقه تقريبا، أدخل كل من منكوفسكي ومن ثم آينشتين هذه الفكره، لكن على البعد الزمني. كيف؟ أنت الآن ساكن تقرأ هذا الكتاب. لكن هل الوقت سكن معك أيضا؟ بالطبع لا، فعقارب ساعتك تتحرك باستمرار شئت أم أبيت. هذا يعني بأنك الآن تتحرك عبر بعد الزمن بسرعة ثابته. هل تعلم كم هي سرعتك الآن عبر ذاك البعد الزمني؟ انك تتحرك بسرعة الضوء!! تمهل قليلا...طالما نحن متوقفين تماما عن الحركة في البعد المكاني فأننا نكرس كل حركتنا في البعد الزمني. تماما مثلما كنت أنت مكرس كل سرعتك في البعد الجنوبي الشمالي، عندما كنت تقود السياره. لكن عندما انحرفت عن مسارك في الجولتين الأخيرتين، أعطيت جزء من سرعتك للبعد الشمال الشرقي. هذا ما يحدث لنا بالظبط عندما نتحرك في أي اتجاه مكاني. طالما نحن ساكنين فأننا نتحرك بسرعة الضوء في البعد الزمني، لكن عندما نتحرك في البعد المكاني، فأن سرعتنا في البعد الزمني تقل عن سرعة الضوء. اذا كنت مشوشا بعض الشيئ، فكل ما عليك هو تذكر معادلة تباطئ الزمن. أنت الآن ساكن، اذن تسير بسرعة الضوء في البعد الزمني، لكن عندما تتحرك فسوف تعطي جزء من حركتك للبعد المكاني. لكن كيف يبدوا الوضع في البعد الزمني؟ نحن بالتأكيد لا نشعر الآن بأننا نتحرك بسرعة الضوء في البعد الزمني، وبالتالي عندما نتحرك في البعد المكاني لن نشعر بأن سرعتنا قد قلت عن سرعة الضوء في البعد الزمني. في الواقع لا يأخذ هذا الكلام على تلك الطريقه الحرفيه. عندما تتحرك في البعد المكاني، فأن ساعتك تسير بشكل أبطأ، وقد رأينا ذلك في معادلة تباطئ الزمن. ان تكات ساعتك البطيئه، هي التي تعني بأن سرعتك قد قلت عن سرعة الضوء في البعد الزمني. والآن ماذا لو وصلت سرعتك الى سرعة الضوء في البعد المكاني؟ ماذا سيحدث للحركة في البعد الزمني؟ هل تعرف الاجابه؟ ستكون سرعتك في البعد الزمني مساوية للصفر، وتكون حركتك كلها مكرسة للبعد المكاني فقط. وهذا ما يعادل في قولنا بأن ساعتك سوف تتوقف عن الحركه، الأمر الذي تبأت به النظرية النسبيه. وبذلك لن تهرم ولن تتقدم في العمر أبدا!!

اذن لا مفر من استخدام أربع معطيات لتحديد حادثة ما، ثلاثة لتحديد المكان و واحده لتحديد الزمان. ولا يوجد ما يميز الواحد فيهم عن الآخر. ففي النهايه جميعهم وجوه مختلفة لعملة البعد. لذلك كلمة مكان ينقصها تداخل كلمة زمان بها، وكلمة زمان ينقصها تداخل كلمة مكان بها، وبناءا على هذه المحاكمه تم اختراع المصطلح الأكثر شمولية "الزمكان" Spacetime. والآن أصبح لك الحق أن تقول لأصدقائك، بأنك تستطيع الحركة عبر الزمان مثلما تستطيع الحركه عبر المكان!

سأنتقل الآن لشرح جزء مهم في فكرة الزمكان وهو ما يسمى بالمخروط الضوئي Light cone. تصور بأنك قد ألقيت حجر في بركة ماء ساكنه. ستحدث موجات مائيه، يتوسع حجمها مع مرور الزمن (الشكل 4-3). اذا أردنا أن نرسم ذلك الحدث بيانيا، وندخل بعد الزمن فسوف نقوم برسم محورين أحدهما عمودي يمثل الزمن وآخرين أفقيين يمثلان



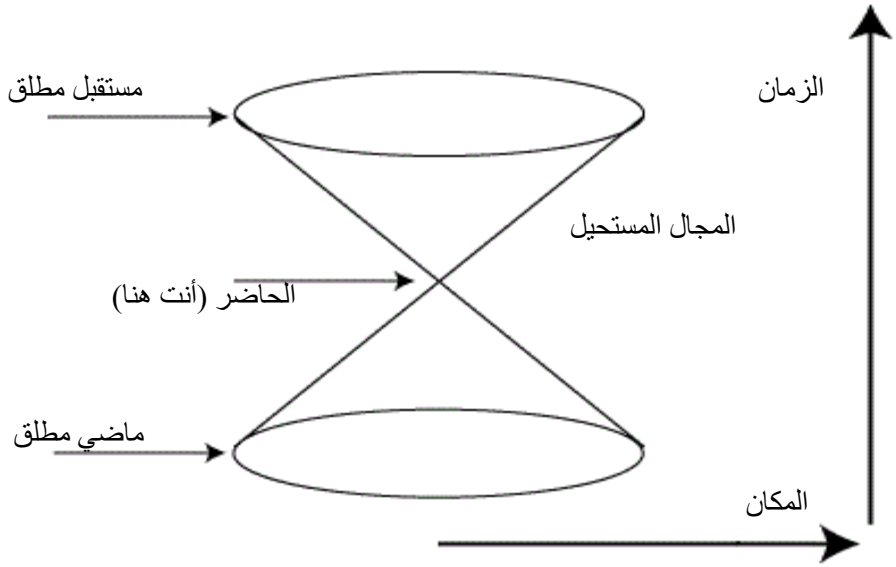
شكل(4-3)

عندما ترمي حجر في بركة ماء ساكنه، فسوف تصنع موجات يكبر قطرها بمرور الزمن. نستطيع وضع بعد الزمن على المحور العمودي، و الأبعاد المكانيه على محور المكان، وبذلك يكبر نصف قطر الموجه المائيه مع مرور الزمن.

المكان[9]، كما هو موضح بالشكل نفسه على اليمين. و طالما أن الزمن هو المحور العمودي، فسوف يكبر قطر دائرة الموجه معه. وبالتالي نستطيع تخيل شكل الدوائر وهي تتوسع وكأنها مخروط يتجه الى الأعلى.

الآن، كل ما هو مطلوب منك أن تنسى الموجات المائيه وتحل محلها موجات ضوئيه. ولا اشكال في ذلك، لأن كليهما موجات. لكن موجات الضوء، كما نعلم غريبه بعض الشيئ، و ذلك لأن سرعتها ثابته تماما بمجرد صدورها من منبعها. ولا علاقه لها بسرعة المصدر أو وضعه. وهذا الأمر لا ينطبق على الموجات المائيه. لذلك لا بد أن نحصل على بعض الأفكار الجديد، لنرضي خاطر ثبات سرعة الضوء.

أنت تعلم بأن الضوء يغادر من جسمك باستمرار، سواء نتيجة انعكاس الضوء الساقط عليك أو نتيجه صدور ضوء حراري من جسمك[10]. هذا الضوء مجرد أن يصدر من جسمك، فأنه ينتشر في كل جهه من حواليك. لذلك سيتوسع هذا الضوء مع مرور الزمن ككرة ضوئيه، تشبه موجات الماء السابقة الذكر. وبنفس الطريقه، نستطيع تصور موجات الضوء الخارجه من جسمك تنتشر بشكل مخروط يتجه نحو المستقبل. و هذه المرة، سنرسم أيضا مخروط ضوئي يتجه نحو الماضي، كما هو موضح بالشكل (5-3).



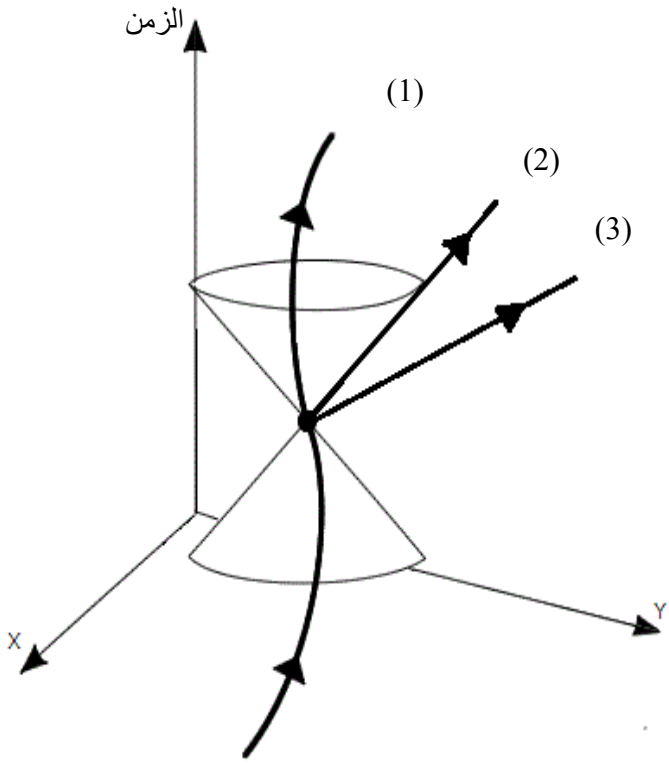
شكل (5-3)

المخروط الضوئي للماضي والحاضر والمستقبل

لكي نفهم ما يعني ذلك المخروط، تصور معي المثال التالي. أنت الآن متوقف في الحاضر (انظر الشكل نفسه)، وقد قمت باشعال سيجاره -وأتمنى أن تقطع هذه العادة السيئه-، اذن لدينا حدث وهو (أنت تشعل سيجاره). هذا الحدث سينتقل على شكل ضوء مخروطي الى المستقبل المطلق، على النحو المبين في الشكل نفسه. ان منطقة المستقبل المطلق، من الممكن أن تتأثر بما يحدث في الحاضر. فلو كان هناك شخص يبعد عنك ثلاث سنوات ضوئيه، فسوف يراك بعد ثلاث سنوات تشعل سيجارتك، وعليه يستطيع التنبؤ بأن الحادث القادم سيكون اطفاء السيجاره. لكن تصور بأن هذا الشخص يبتعد عنك بسرعة أعلى من سرعة الضوء الى المستقبل المطلق. في هذه الحالة لن ولم يستقبل حادثة اشعالك للسيجاره أبدا! وهذا الشخص سيقع في منطقة المجال المستحيل، كما موضح في الشكل نفسه. وقد سميت بهذا الاسم، لأنه من المستحيل أن يتحرك أن شيئ بأسرع من سرعة الضوء. فجميع الحوادث التي تقع في المجال المستحيل ، لا تؤثر و لا تتأثر بما يحدث في الحاضر. تصور بأن الشمس قد انفجرت فجأه، لن يصلنا هذا الحدث مباشرتا، بل سننتظر ثمان دقائق، حتى نشعر بذلك على الأرض. أي بكلمات أخرى نقول؛ في اللحظه التي انفجرت فيها الشمس، سنكون نحن على الأرض واقعين في المجال المستحيل لمخروط حادثة انفجار الشمس. وبعد ثمان دقائق، سوف ندخل في المخروط المستقبلي لحادثة الانفجار. أما منطقة الماضي المطلق، فتمثل كل الحوادث التي من الممكن أن تؤثر على الحاضر. ان جميع أضواء النجوم التي تشاهدها في سماء الليل، قادمه من منطقة الماضي المطلق. فهذه الاضواء قد غادرت

قبل مليارات السنين. لذلك نقول بأن الضوء القادم من هذه النجوم، قد انطلق منذ ماضينا السحيق.

طالما أنه لا يوجد شيئ يتحرك بسرعة الضوء. فأن أي حادثة تحدث لا بد أن تقع داخل مخروط الضوء. لذلك يتم عاد رسم خط داخل مخروط الضوء يسمى بالخط العالمي world line (الشكل 6-3). وهذا الخط يمثل مسارك من الماضي الى الحاضر الى المستقبل. بالنسبة للفوتونات فأن خطها العالمي يقع بالضبط على خطوط المخروط، لأنها تتحرك



شكل (6-3)

المسار (1) يمثل الخط العالمي للجسم الذي يتحرك بسرعة أقل من سرعة الضوء. المسار (2) الخط العالمي للأجسام التي تتحرك بسرعة الضوء. المسار (3) الخط العالمي للأجسام التي تتحرك بأسرع من سرعة الضوء، وهذا محال.

بسرعة الضوء. والأجسام التي تتحرك بسرعة أقل من سرعة الضوء تقع داخل المخروط. أما تلك التي تتحرك بسرعه أعلى من سرعة الضوء، فخطوطها العالمية تقع خارج حدود المخروط. لكن وكما نعلم هذا أمر مستحيل.

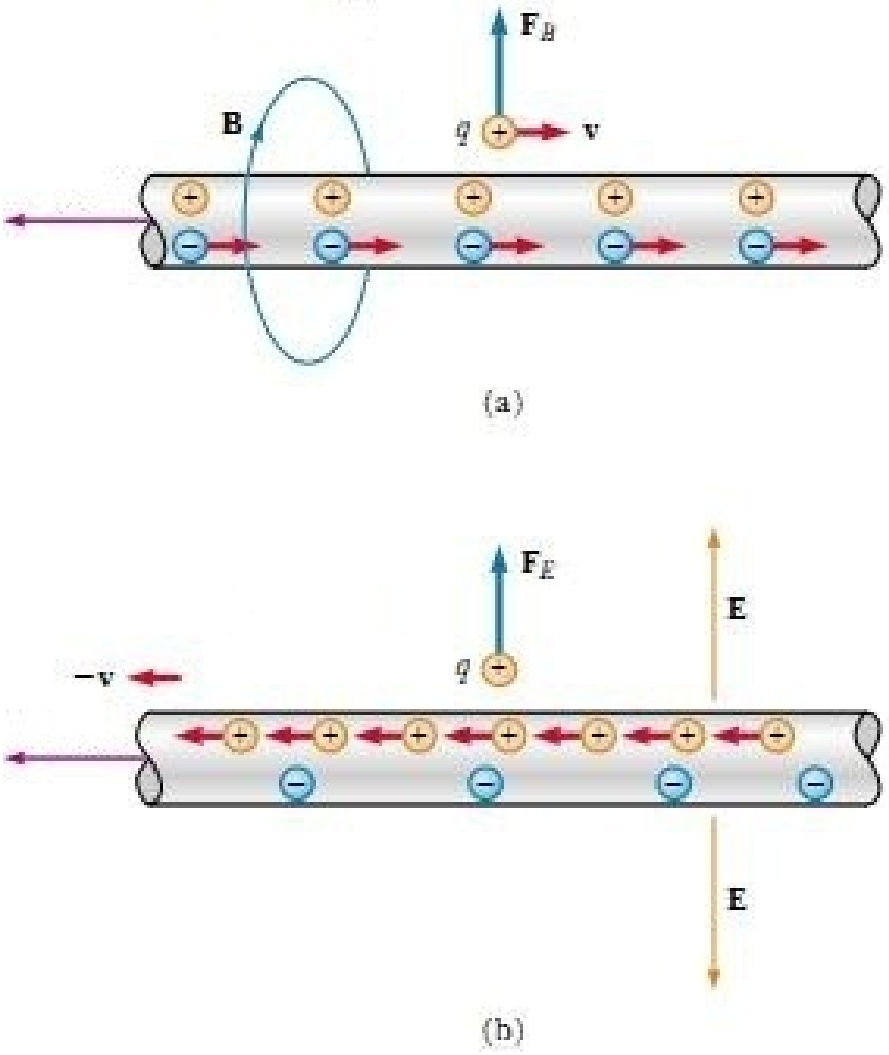
5 – النسبية الخاصه و النظرية الكهرومغناطيسيه

ان المشكلة الرئيسيه التي جعلت آينشتين يصل الى النظريه النسبيه، هو عدم انسجام قوانين ماكسويل والنظرية الكهرومغناطيسيه مع تحويلات نيوتن – جاليليو. لقد تحدثنا عن مفارقة تحويل المجالين الكهربائي و المغناطيسي في بداية هذا الفصل. عندما تكون أنت داخل قطار متحرك و معك شحنة كهربائيه، فأنك لن ترى مجال مغناطيسي، لأن الشحنة بالنسبه لك ساكنه. لكن أنا خارج القطار لابد أن أرى مجال مغناطيسي، لأن الشحنة بالنسبة لي متحركه! لقد تطرق آينشتين الى هذه المشكلة في نفس ورقته الشهيره التي نشرها عام 1905.

لنفهم العلاقة بين النسبية والكهرومغناطيسيه، دعنى نستخدم المثال التالي لنصف كيف يكون المجال في احدى المراجع القصوريه كهربائيا، بينما يكون نفس المجال مغناطيسيا في مرجع آخر. تصور بأنه لدينا موصل كهربائي تتحرك فيه الشحنات السالبة ناحية اليمين، بينما تتحرك الشحنات الموجبه ناحية اليسار. وأيضا تصور بأنه لدينا شحنة اختبار q تتحرك ناحية اليمين بسرعة قدرها v. بالنسبه لشخص ساكن داخل الموصل، سيرى أن كثافه الشحنات السالبه المتجه ناحية اليمين تساوي كثافة تلك الشحنات الموجبه المتجه ناحية اليسار (الشكل 3-7a). وبالتالي سيكون مجموع الشحنة الكليه على الموصل مساويا للصفر. وعليه تكون أيضا شدة المجال الكهربائي مساويه للصفر $E = 0$. لكنه سيرى مجال مغناطيسي B يحيط بالموصل، وبالتالي ستنشأ قوة مغناطيسيه قدرها F_B، ستدفع شحنة الاختبار الى الأعلى، كما هو مبين بالشكل نفسه.

ماذا سيكون الآن، نفس الموقف، لكن بالنسبة الى شخص يتحرك مع شحنة الاختبار؟ هذا الشخص سيرى أن الشحنات السالبه التي على الموصل تتحرك بشكل أبطئ من الشحنات الموجبه، لأن اتجاه حركته مع اتجاه حركة تلك الشحنات السالبه، وعكس اتجاه حركة الشحنات الموجبه. و بسبب ظاهرة انكماش الطول ستصبح المسافة بين الشحنات الموجبه أقصر من المسافة بين الشحنات السالبه. وبالتالي تكون كثافة الشحنات الموجبه أكثر من الشحنات السالبه (الشكل 3-7b). هذا يعني أن مجموع الشحنة الكلية على الموصل لا تساوي الصفر، من وجهة النظر تلك، لأن الشحنات الموجبه تبدوا أكثر. وعليه لن يكون المجالى الكهربائي مساويا للصفر في هذه الحاله. بل ستنتج الشحنات الموجبه مجالا كهربائيا يتجه من الموصل الى شحنة الاختبار، وبالتالي ستندفع شحنة الاختبار الى الأعلى بقوة قدرها F_E، بسبب ذلك المجال الكهربائي. وهكذا، ما يبدوا أنه مجال مغناطيسي في مرجع

الموصل تحول الى مجال كهربائي في مرجع شحنة الاختبار. لكن بشرط أن تبقى قوانين الفيزياء واحده لكلا المرجعين. أي $F_B = F_E$.



الشكل (7-3)

(a) بالنسبة للشخص الذي ينظر الى الموقف من الموصل، سيكون مجموع الشحنه الكليه على الموصل مساويا للصفر. لكنه سيختبر مجال مغناطيسي يدفع شحنة الاختبار بقوة قدرها F_B الى الأعلى. (b) بالنسبة للشخص الذي يتظر للموقف من شحنة الاختبار، سيرى بأن المسافات تنكمش بين الشحنات الموجبه. وبالتالي لن تكون مجموع الشحنه الكليه على الموصل مساويه للصفر. بل ستنتج الشحنات الموجبه مجال كهربائي، سيدفع شحنة الاختبار الى الأعلى بقوة قدرها F_E. اذن هناك اختلاف في تفسير سبب دفع شحنة الاختبار، لكن هناك اتفاق على تساوي القوتين الدافعتين.

ملاحظات الفصل الثالث

1. يقال أن آينشتين لم يكن على علم، في تلك الفتره، بتجربة مايكلسون – مورلي. فقد كان كل ما هو مهم بالنسبه له، التوافق النظري المنطقي.
2. آلبرت آينشتاين / ليوبولد انفلد، **تطور الأفكار في الفيزياء من المفاهيم الأوليه الى نظريتي النسبيه والكم**، ترجمه عن الفرنسيه: د. أدهم السمان، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الاولى، 1992.
3. سأستخدم هنا الرمز $T_{\circ}$، بدلا من $\Delta t_{\circ}$. لكن هناك فرق في المعنى. ان $\Delta t_{\circ}$، تعبر عن الفترة الزمنيه لانتقال الضوء الى جدار القطار ومن ثم عودته مرة أخرى. بينما $T_{\circ}$، تعبر عن قرائة ساعتك مباشرتا. كأن تقول: الساعة الآن تشير الى الحادية عشرأو الثانية عشر والنصف.
4. آلبرت آينشتاين / ليوبولد انفلد، **تطور الأفكار في الفيزياء من المفاهيم الأوليه الى نظريتي النسبيه والكم**، ترجمه عن الفرنسيه: د. أدهم السمان، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الاولى، 1992.
5. نفس المصدر السابق.
6. L. B. Okun (1989), "The Concept of Mass", Physics Today 42 (6): 31–36
7. E. F. Taylor, J. A. Wheeler (1992), Spacetime Physics, second edition, New York
8. سوف نتحدث عن هذا الموضوع لاحقا.
9. من المفترض أن تتخيل الرسمة بثلاثة أبعاد.
10. جميع الأجسام التي تمتلك درجة حراره أعلى من الصفر المطق، تطلق اشعاع حراري على شكل ضوء.

الفصل الرابع

الاثباتات التجريبيه للنظريه النسبيه

"لا يمكن البت في المسائل الفيزيائيه عن طريق الاعتبارات الجماليه ولكن الطريق اليها يكمن في العمل التجريبي، وهذا يقتضي جهدا مملا"

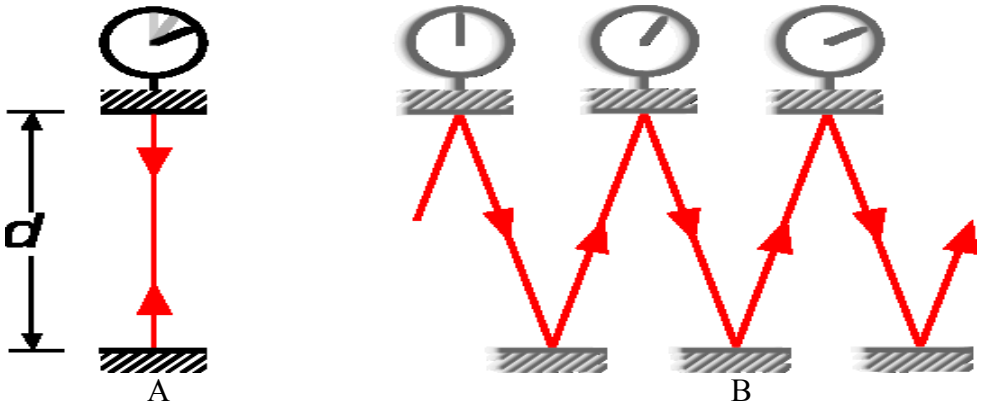
ماكس بلانك

1 – تباطئ الزمن و انكماش الطول

أولا، و قبل الخوض في الأدله حول ظاهرتي تباطئ الساعات و انكماش الأطوال، علينا أن نتذكر ما المقصود بالساعه هنا. قد يتبادر مباشرتا الى ذهن القارئ، ساعة اليد العاديه. في الحقيقه لا شك في أن هذه ساعه، لأن عقارب ساعتك تتحرك بانتظام كل ثانيه و كل دقيقه و كل ساعه. بهذه الطريقه نستطيع ابتكار ساعات تختلف عن ساعه اليد. لقد استخدم جاليليو نبضات قلبه كساعه، وفي أحيان أخرى كان يجعل شخصا ما يقوم بعزف نغمه معينه بشكل دوري منتظم. نستطيع كذلك أن نستخدم البندول كمقياس للزمن. اذن الساعه ليست سوى شيئ ما يجري بشكل دوري منتظم.

بناءا على هذه المحاكمه، نستطيع صنع أدق ساعه على الاطلاق. وهي فوتون ضوئي ينعكس بين مرآتين متوازيتين. ان الفتره الزمنيه لذهاب الفوتون الى المرآه السفليه و عودته مرة أخرى الى المرآه العلويه (الشكل 4-1A)، يماثل عقرب ساعتك عندما يتك تكه واحده. لكن هنا نستخدم فوتون ضوئي، لذلك سيكون أدق من عقرب ساعتك بكثير. لاحظ في الشكل نفسه (B) عندما تتحرك المرآه، فان الفوتون سيقطع مسافه أطول، وبالتالي سيستغرق زمنا أطول. أي يبدوا و كأن تكة الفوتون مع المرآه المتحركه أبطئ من تكته مع المرآه الساكنه. و هكذا، نستطيع اعتبار أن أي حركه منتظمه هي مقياس للزمن.

ان أشهر دليل على ظاهرة تباطئ الزمن، هو ما يسمى (تجربة انحلال الميون). الميون muon عباره عن جسيم أولي غير مستقر له شحنه سالبه أو موجبه، يتفكك في غضون



شكل (4-1)

(A) ان حركة الفوتون الى أعلى وانعكاسه من مرآه تمثل تكة عقرب الساعة العاديه. (B) عندما تتحرك المرآه فان الفوتون يقطع مسافة أطول و بالتالي تكة الساعة ستكون أبطأ.

ميكروثانيتين ($2.2 \times 10^{-6} s$) الى الكترون أو مضاد الالكترون (البيزترون) مع اطلاق نيوترينوات. اذن عندما يتكون الميون ، يكون له عمر ثابت محدد الى ان يتفكك الى جسيمات أخرى. بهذه الطريقه نستطيع أن نعتبر أن عمر الميونات عباره عن ساعه لقياس الزمن.

في الواقع، يتكون الميون في طبقات الجو العليا، بعدما تصطدم الأشعه الكونيه العاليه الطاقه، مع ذرات طبقة الغلاف الجوي للأرض. لذلك ستكون اللحظه التي تخلق فيها الميونات و اللحظه التي تتفكك فيها الى جسيمات أخرى، أفضل ساعه لاختبار نبوئة النظرية النسبيه حول ظاهرة تباطئ الزمن.

دعنا الآن نرى كيف سيكون وضع الميونات بالنسبه لراصد على الأرض. تتحرك الميونات بسرعه قريبه جدا من سرعة الضوء، و بذلك ستصبح ظاهرة تباطئ الزمن واضحه جدا عليها. تصور بأن أحد الميونات قد خلق عند قمة جبل ارتفاعه 4800 متر. اذا اخذنا في الاعتبار أن أن عمر الميون 2.2 ميكروثانيه، وسرعته قريبه من سرعة الضوء، فان المسافه التي سيقطعها، من وجهة نظر راصد على الارض، تساوي تقريبا 650 متر قبل أن يتفكك. اذن، لا يوجد وقت كافي لأن يصل الميون الى الأرض لأن طول الجبل 4700 متر، بينما هو ينحل عند 650 متر. لكن ما بينته التجارب، كان مثير للدهشه. لقد تبين أن هناك عدد كبير جدا من الميونات يصل الى الأرض قبل أن يتفكك! كيف يكون ذلك؟ اذا بقيت تنظر الى الزمان على الطريقة النيوتنيه المطلقه فبالتأكيد ستبقى هذه معضله بدون حل. أم اذا نظرت الى الزمان على الطريقة اللورنتزيه – الآينشتاينيه، فانك ستحل المسأله بمنتهى البساطه. ان الميونات، تتحرك بسسرعه قريبه جدا من سرعه الضوء، لذلك لا بد أن نستخدم الميكانيكا النسبيه عوضا عن الميكانيكا النيوتنيه. أي يجب أن نأخذ بالاعتبار ظاهرتي تباطئ الزمن و انكماش الطول حتى تظهر النتائج طبيعيه جدا.

طالما أن سرعة الميون تساوي تقريبا 0.99 من سرعة الضوء، فانه بموجب النسبيه، يجب استخدام المعادله الخاصه بتباطئ الزمن. لو استخدمنا المعادله التي اشتقيناها في الفصل السابق، و عوضنا عن سرعة الميون ب 0.99 من سرعة الضوء، و استخدمنا زمن تفكك الميون وهو ثابت 2.2 ميكروثانيه، سنجد أن الناتج يساوي تقريبا 16 ميكروثانيه. الآن، اضرب هذا الزمن بسرعة الميون (0.99 من سرعة الضوء) ستجد أن الناتج يساوي تقريبا 4700 متر! ويا للجمال النظري! ان هذا هو طول الجبل كما يراه الراصد الذي على الأرض! اذن عند أخذ ظاهرة تباطئ الزمن بالاعتبار، فستجري الأمور بشكل طبيعي جدا.

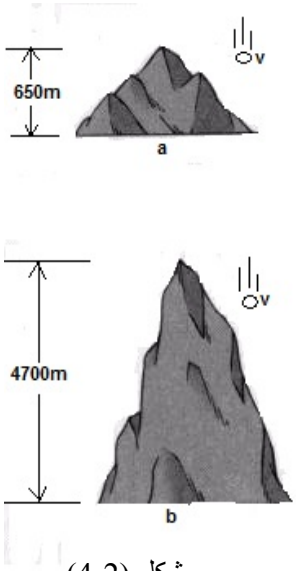
لكن رغم ذلك، لا تزال هناك مشكله؟ تخيل لو كان هناك شخص ما قد صغرنا حجمه و جعلناه يمتطي الميون. كيف ستبدوا الأحداث بالنسبه له؟ ان زمن تفكك الميون بالنسبه له

يساوي 2.2 مايكروثانيه، لأنه هو لا يشعر بتباطئ الزمن، فهو يرى الأمور الميقاتيه تجري بشكل طبيعي من منظوره. لكن كما بينا أعلاه الزمن 2.2 مايكروثانيه لا يكفي أن يقطع مسافة ارتفاع الجبل البالغه 4700 متر؟! دعنا، نجد المسافه التي سيقطعها الميون من مرجع الميون نفسه. بما أن سرعته 0.99 من سرعة الضوء، وزمن تفككه يساوي 2.2 ميكروثانيه، فان حاصل ضربهما يساوي تقريبا 650 متر. اذن، كيف يقطع الميون مسافه 4700 متر بالنسبه للمراقب الذي على الأرض، بينما يقطع 650 متر فقط من مرجع الميون نفسه؟! مره أخرى، اذا حاولت أن تحل المشكله من وجهة نظر نيوتن حول المكان فسوف يخيب ظنك. لكن اذا نظرت للمكان من وجهة نظر لورنتزيه – آينشتاينيه، فلن تواجه أي مشكله.

لنحلل كيف سيبدوا الأمر بالنسبه لشخص ما يتحرك مع الميون. بما أن الميون يتحرك من أعلى الى أسفل بسرعه قريبه من سرعة الضوء، فسيبدوا بالنسبة للشخص المتحرك مع الميون أن الجبل يتحرك من أسفل الى أعلى بسرعه 0.99 من سرعة الضوء. لقد بين لنا لورنتز و آينشتين لاحقا، أن الأجسام المتحركه بسرعه كبيره جدا، تعاني من انكماش في اتجاه حركتها بالنسبه للراصد المتوقف. اذن الشخص المتحرك مع الميون يستطيع أن يعتبر نفسه ساكنا و الجبل هو من يتحرك اليه بسرعه الى أعلى. الآن، طالما أن الجبل يتحرك باتجاه الميون، فأن الجبل سيبدو منكمشا بالنسبة للشخص المتحرك مع الميون (الشكل 2-4 a). و نستطيع بكل بساطه حساب مقدار ذلك الانكماش من معادلة تقلص الأطوال التي رأيناها في الفصل السابق. سنجد أن الجبل يتقلص بالنسبة لمرجع الميون الى 650 متر تقريبا. و هنا أقصى درجات جمال النظريه. ان هذه القيمه تساوي بالظبط حاصل ضرب سرعة الميون في زمن تفككه بالنسبه للشخص المتحرك مع الميون نفسه!

الذي حدث يمكن تفسيره بالكلمات البسيطه التاليه: الراصد الذي على الأرض يرى أن الميون يعيش عمر أطول، بسبب ظاهرة تباطئ الزمن، لكنه أيضا سيقطع مسافه أطول (طول الجبل). لكن الشخص الذي يتحرك مع الميون يرى أن عمر الميون أقصر لكنه يقطع مسافه أقصر كذلك، بسبب تقلص طول الجبل. و بناءا على ذلك سيتفق كلا الراصدين على قيمه واحده لعدد الميونات التي ستصل الى الأرض. و هنا مرة أخرى، نشاهد مدى قوة التماسك الرياضي للنظرية النسبيه؛ لقد اختلف كلا الراصدين حول طول عمر الميون، واختلفا كذلك حول طول الجبل، لكن اتفقا على قيمة معينه واحده لعدد الميونات الواصله الى الأرض. اذن، بالفعل يتغر الزمان و المكان بالزياده و النقصان، بحيث تبقى سرعه الضوء و قوانين الفيزياء ثابته بالنسبه لأي راصد.

لقد كان برونو روسي Bruno Rossi و هالي Haale هم أول من أجريا هذه التجربه في عام 1940. و كانت أول تجربه مباشره تؤكد ظاهرة تباطئ



شكل (2-4)

(a) يبدو الجبل من وجهة نظر شخص ما يتحرك مع الميون قد تقلص كثيرا بسبب سرعته القريبه جدا من سرعة الضوء. (b) من وجهة نظر المراقب الذي على الأرض، يبدوا طول الجبل طبيعيا، لكن عمر الميون يصبح أطول.

الزمن التي تنبأ بها آينشتين عام 1905. بعدها في عام 1963 حسن كل من دايفيد فريش David H. Frisch و سميث Smith نتائج التجربه السابقه. و قد قاسوا ما يقارب 563 ميون بالساعه. و من ثم في السنوات اللاحقه، انهالت تجارب قياس عمر الميونات بوسائل أكثر تطورا، و قد كانت جميعها تؤكد مدى دقة معادلة تباطئ الزمن مع السرعات العاليه جدا.

ان هذا الدليل حول اطاله عمر الميون يعتبر دليل مباشر حول ظاهرة تباطؤ الزمن. لكن و على الرغم من أنه يثبت أيضا ظاهرة انكماش الطول، الا أنه اثبات غير مباشر. لا يوجد شخص قادر على رؤية الميون و هو يتحرك، حتى يراه ينكمش. لكن انكماش الطول كان ضروريا حتى يتماشى مع تباطئ الزمن و فق معادلات النظرية النسبيه. في الحقيقه لا يوجد الى اليوم اثبات مباشر لظاهرة انكماش الطول. ولا عجب في ذلك، لأن الأجسام الوحيده التي تتحرك بسرعه قريبه من سرعة الضوء هي الجسيمات الذريه الأوليه، و هي جسيمات ابعادها صغيره جدا جدا على القياس، ناهيك عن تدخل مبدأ هايزنبيرغ الذي يحد من قياسك باستمرار[1]. لكن ما مع هذا رأينا كيف أن أن تمدد عمر الميون يعطي دليل ضروري، لكن

غير مباشر حول انكماش الطول. و هناك أدله أخرى حول ظاهرة انكماش الطول، لكن جميعها تعتبرغير مباشره.

2– مفارقة تناقض التوأمين

طالما أننا قد ألفنا الحديث عن ظاهرتي انكماش الطول و الزمن، فاننا قد أصبحنا في الوضع المناسب لذكر أشهر مفارقه في النظرية النسبيه الخاصه. تلك المفارقة التي يطلق عليها عادة اسم (تناقض التوأمين) Twin Paradox. و تكاد ترى أن جميع الكتب التي تتكلم عن النسبيه، لا تنسى ذكر هذه المفارقه الشهيره.

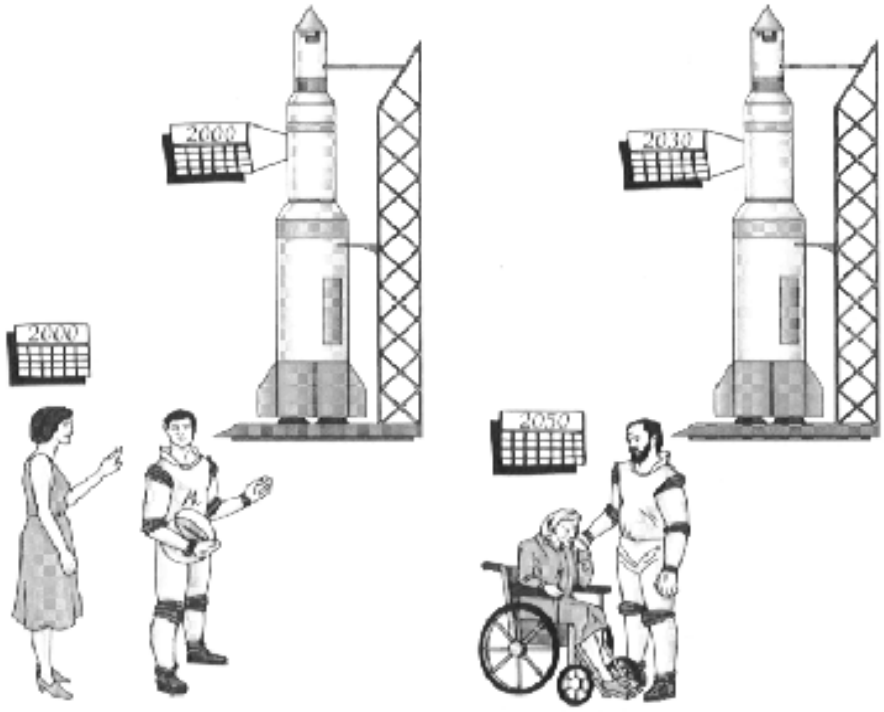
لقد قلنا بأن الساعه هي مجرد شيئ ما يقوم بحركه منتظمه. فالساعه العاديه و الساعة الرمليه و البندول و حتى ضربات القلب، كلها أشياء تقيس الزمن. دعنى نركز على آخر واحده (ضربات القلب). انها بمثابة ساعه بيولوجيه تعمل بانتظام.

تصور بأنه لدينا توأمين، أحمد وحنان، يبلغان من العمر عشرين عاما. أحمد قرر أن يقوم برحله الى كوكب ما يبعد عنا عشرين سنه ضوئيه، بواسطه سفينه فضائيه تتحرك بسرعه 0.8 من سرعة الضوء [0.80c]. بينما ظلت اخته حنان تنتظره على الأرض. الآن، حسب ظاهرة تباطئ الزمن، سترى حنان أن ضربات قلب أحمد ستتباطئ بمعدل:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=\sqrt{1-\frac{(0.80c)^2}{c^2}}=0.6=60\%$$

أي بالنسبة لحنان، سينبض قلب أحمد ثلاث مرات مقابل كل خمس ضربات لقلبها. و بعد مرور خمسين عاما، حسب رزنامه حنان، عاد أحمد. لكن المفاجئه أن أحمد يقول لنا بأن رحلته قد استغرقت فقط ثلاثين عاما، بحسب رزنامته الخاصه التي كان يحملها معه في سفينته الفضائيه. اذن، عمر حنان الآن، سبعين عاما، بينما عمر أحمد خمسين عاما فقط، على الرغم من أن عمريهما كان عشرين عاما قبل أن يغادر أحمد (الشكل 3-4). ان السبب بلا شك هو ظاهرة تباطئ الزمن. اذن أين التناقض في الموضوع؟

ان التناقض يكمن في نظرة أحمد الى حنان. تذكر مبدأ النسبيه القائل، بأن قوانين الفيزياء هي نفسها من مرجع قصوري الى آخر. بالنسبه لأحمد، و هو داخل سفينته الفضائيه، سيرى حنان و الأرض يبتعدان عنه بسرعه 0.8 من سرعه الضوء. لأن أحمد، يرى نفسه ثابت و حنان مع الأرض يتحركان مبتعدين عنه. اذن، أحمد سيرى أن ضربات قلب حنان أبطئ من ضربات قلبه، و بالتالي بعدما يعود الى الأرض، سيرى أن حنان قد أصبح عمرها خمسين عاما، بينما هو من أصبح عمره سبعين عاما! اذن من يهرم قبل من؟! ما الحل؟



شكل (3-4)

عندما غادر أحمد كان عمره و عمر اخته حنان عشرين عاما. لكن، بعدما سافر بسفينته الفضائيه بسرعة قريبه من سرعة الضوء وعاد الى الأرض، تفاجئ بأن أخته قد أصبحت أكبر منه بعشرين عاما!

الحل هو أن أحمد ليس في مرجع قصوري حتى يطبق مبدأ النسبيه على حنان. عندما أقلع من الأرض، فانه بالتأكيد قد زاد من سرعته، وعندما أدار سفينته الفضائيه، للعودة الى الأرض فلابد أنه قد أبطأ من سرعته، وكذلك عندما هبط على الأرض، غير من وضعية سرعته. ما أود قوله، هو أن أحمد ليس في مرجع قصوري. فالمرجع القصوري هو مرجع يتحرك بسرعه ثابته دائما، بدون أن يغير من سرعته في لحظه ما. ان حنان لا تشعر بأي تغير في حركتها على الأرض، لكن أحمد سيشعر بتغير في حركته عندما يقلع و يستدير للعودة و يهبط. لذلك تطبيق نتائج النظرين النسبيه من أحمد على حنان غير صحيح، بينما تطبيق النتائج من حنان على احمد هو الصحيح، وبذلك لا يوجد أي تناقض.

الآن، بالنسبة لحنان، الكوكب الذي ذهب أحمد اليه يبعد 20 سنه ضوئيه $(20\ ly)$ [2]. اذن، حسب منظورها، سيستغرق أحمد:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{20\ ly}{0.8c} = 25\ \text{Year}$$

هذا فقط لرحلة الذهاب. أي أن المجموع الكلي لرحلة أحمد، حسب حنان تساوي 25+25=50 سنه. لكن ما هو الوضع بالنسبة لأحمد؟ تذكر أن أحمد يتحرك بسرعه عاليه جدا، وبالتالي يجب أن يطبق ظاهرتي انكماش الطول و تباطئ الزمن. طالما أنه يتحرك متوجها الى الكوكب، فسوف تنكمش المسافة التي تفصل بينه و بين الكوكب حسب معادلة انكماش الطول الى:

$$L = L_{\circ}\sqrt{1 - \frac{(0.8c)^2}{c^2}} = 12\ ly$$

و بالتالي، سيكون الزمن المستغرق بالنسبة له:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{12\ ly}{0.8c} = 15\ \text{سنه}$$

و عليه، يكون المجموع الكلي لرحله أحمد ذهابا و يابا تساوي 15+15=30 سنه. الآن، قبل أن يغادر أحمد، كان عمره هو و اخته عشرين عاما، هي انتظرت خمسين عاما حتى عاد أحمد، اذن عمرها قد اصبح 20+50=70. بينما أحمد استغرقت رحلته كلها فقط ثلاثين عاما، اذن عمره قد اصبح 30+20=50. و هذا هو ما توقعناه. بالطبع أحمد لا يشعر بأن الزمن قد تباطئ أو أن عمره قد طال. هو فقط قطع مسافة تساوي ثلاثين سنه ضوئيه، وليس خمسين سنه ضوئيه، وذلك بسبب ظاهرة انكماش الطول.

يا ترى، هل يمكن اجراء مثل هذه التجربه عمليا؟ من ذلك البطل الذي سيقبل بأن يتجول في الفضاء؟ ثم حتى لو أننا وجدنا ذلك البطل، أي سفينه فضائيه ستتحرك بسرعه 0.8 من سرعه الضوء!؟ من الواضح أنها تجربه ذهنيه لا أكثر.

لكن هل ستصدق أن هذه التجربه قد أجريت عمليا في عام 1971!! لكن بدل من أحمد و حنان، تم استخدام أدق ساعه على وجه الأرض. ساعه السيزيوم الذريه[3]. وكانا صاحبي هذه الفكره هما هافل Hafele و كيتنغ Keating (الشكل 3-4)[4]. لقد أخذوا أربع ساعات سيزيوم ذريه على متن طائره نفاثه، و قاموا بجوله حول العالم، مرة في الاتجاه الشرقي و

مرة في الاتجاه الغربي، ثم عادوا الى الأرض وقارنوا الساعات التي معهم مع ساعة سيزيوم ذريه، تركوها في المختبر على الأرض. وقد جعلوا جميع الساعات متزامنه قبل القيام بالرحله. و عندما عادوا الى الأرض وجدوا أن الساعات التي معهم غير متفقه مع التي على الأرض، مأكدين مرة أخرى صدق تنبؤات النظرية النسبيه. لكن يجب أن ننتبه بأن هذه التجربة معقدة بعدة عوامل، أولا: الساعه الموجوده على الأرض ليست في مرجع قصوري، فنحن نعلم بأن الأرض تدور بعجله حول الشمس، وبالتالي تكون الساعه التي على الأرض متحركه و ليست ثابته. ثانيا: النظرية النسبيه العامه، تتنبأ بأن قوة الجاذبيه تقل كلما ارتفعنا الى الأعلى، وهذا شيئ يؤثر على سير الساعات التي في الطائره. ثالثا: يجب أيضا الأخذ بعين الاعتبار عجله تسارع و تباطئ الطائره النفاثه عند الدوران. و عندما تم أخذ كل تلك العوامل بالاعتبار، وجدوا أن أن الساعات التي معهم قد تأخرت بمقدار 59 ± 10 نانوثانيه[5]، خلال رحلتهم في الاتجاه الشرقي (مع اتجاه حركة الأرض). و وجدوا أن الساعات قد كسبت 273 ± 7 نانوثانيه، عندما تحركوا في الاتجاه الغربي (عكس اتجاه حركة الأرض). وهذه النتائج تتفق بشكل كبير مع معادلة تباطئ الزمن التي رأينها سابقا. لقد كانت تلك التجربه، اثباتا صريحا و مباشرا على ظاهرة تباطئ الزمن. وأكثر من ذلك كانت هذه التجربه محاكاة مباشره للتجربه الذهنيه الشهيره "تناقض التوأمين". و في السنوات اللاحقه تم اجراء المزيد و المزيد من هذه التجربه، و كلما زادت الدقه، توافقت النتائج أكثر فأكثر مع تنبؤات النظرية النسبيه. كم أتمنى لو كان آينشتين حيا ليرى هذه التجربه، ويتحفنا بتعليقاته الرائعه.

3– اثبات الديناميكا النسبيه

ان أولى التجارب التي دعمت صحة الديناميكا النسبيه قد تمت ما بين عامي 1901 و1915، على يدي وولتر كاوفمان Walter Kaufmann وألفرد بوخرر Alfred bucherer وآخرون. وكما هو واضح تاريخيا، أن جزء من هذه التجارب قد تم اجرائها قبل أن يضع آينشتين النسبيه الخاصه. لذلك، كان هذان الأخيران يبحثان في موضوع يعتقدون بأنه لا صلة له بالنظريه النسبيه. اننا نعلم اليوم بأن أشعة بيتا عباره عن سيل من الالكترونات السريعه. لكن لم يكن في ذاك الوقت أمرا سهلا على الباحثين أن يعروفوا ماهية هذه الأشعه. لذلك كان كاوفمان وبوخرر يبحثان في كنة هذه الأشعه.

شكل (3-4)

هافل Hafele و كيتنغ Keating في عام 1972 و معهم أربع ساعات سيزيوم ذريه في الطائره لاختبار صحة ظاهرة تباطئ الزمن كما تنبأت بها النظرية النسبيه.

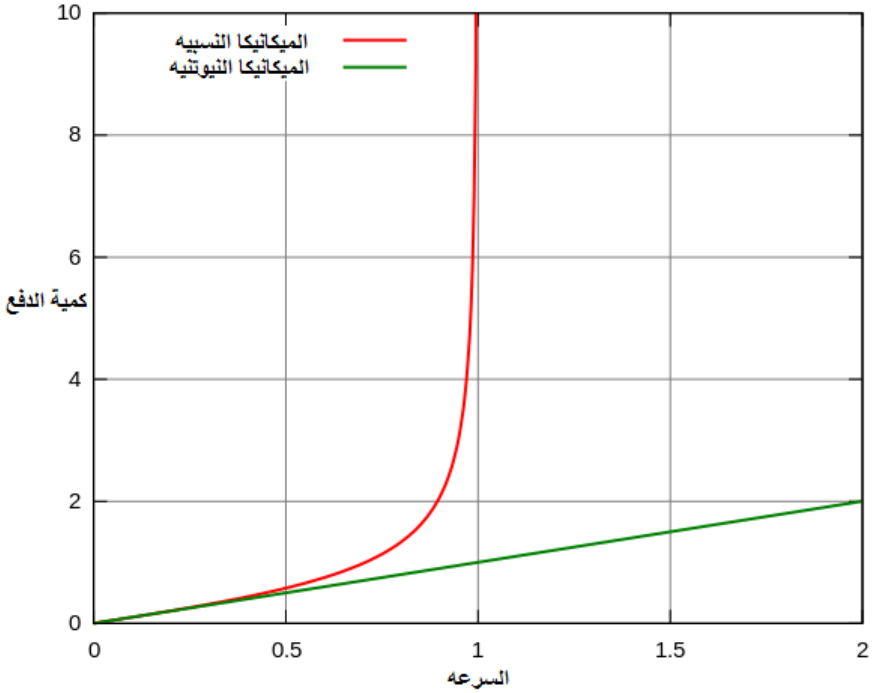
كانت تجاربهم تركز على قياس انحراف جسيمات بيتا عند إدخالها في مجال مغناطيسي بشده معينه. وكانت الكمية التي يقيسونها في كل مره هي نسبه كتلة الالكترون الى شحنته. لقد وجدوا أن تلك النسبه تتغير باستمرار مع زيادة السرعه. بالطبع لا يمكن ان يكون التغير في كميه الشحنه، لأنه من المعروف أن الشحنه كميه ثابته لا تعتمد على السرعه. لذلك سرعان ما تبادر الى الأذهان أن الذي يتغر هو كتلة تلك الجسيمات. وهنا يجب ان أنوه مره أخرى الى التطور التاريخي للنظرية النسبيه. لقد قلنا في الفصل السابق، أن مفهوم زيادة كتلة الجسم مع سرعته مفهوم مضلل، ومن الأفضل استخدام مفهوم كمية الدفع بدلا عنه. لكن بالطبع كان كاوفمان وبوخرر وغيرهما يعتقدان بأن الكتله هي من تزداد مع السرعه تماشيا مع الأبحاث النظرية الكثيره التي تؤيد هذا الكلام في ذاك الوقت، حتى قبل ظهور نسبية آينشتين. لكن نحن أدركنا ان معادلة زيادة الكتله مع السرعه لا معنى لها ومن الأفضل استخدام معادلة كمية الدفع النسبيه.

ان معادلة كمية الدفع النيوتنيه تعطى كالتالي:

$$p = mv$$

أي أن العلاقة بين بين كمية الدفع والسرعه علاقة خطيه. لكن اشعه بيتا (الكترونات سريعه) تتحرك بسرعه $0.75 - 0.25$ من سرعة الضوء. وإذا ما استخدمنا نفس العلاقه السابقه لكمية الدفع، فاننا نحصل على نتائج لا تتفق مع القياسات اطلاقا. لكن عند استخدام معادلة الدفع النسبيه:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



شكل (4-4)

النتائج المخبريه تتفق مع الخط الأحمر، متماشيتا مع معادلة كمية الدفع النسبيه. بينما الخط الأخضر يمثل كمية الدفع الكلاسيكيه ونلاحظ بأنه يوجد اتفاق بينهما في السرعات المنخفضة فقط. لكن عند السرعات العاليه يجب استخدام الميكانيكا النسبيه.

فاننا نحصل على نتائج تتماشى مع المعادلة بالظبط (الشكل 4-4). ومما هو جدير بالذكر أن كاوفمان قد قال بعد تجربته، كما يشرح لنا هوفمان:

[ان نتائج القياسات لا تتوافق مع افتراض اينشتاين – لورنتز الأساسي. ومضى قائلا ان النتائج أتت في صالح نظريتين أخريين. وكان لورنتز الذي صعقته النتائج السلبيه للتجربه جاهزا للدفاع عن معادلاته التي شقي في وضعها. أما آينشتين فقد ظل غير منزعج أبدا قائلا: ان كلتا النظريتين "الأخريين" لهما في رأيي احتماله أقل ضاله لأن تكونا صحيحتين لأن فرضيتهما الأساسيتان الخاصه بكتلة الالكترونات المتحركه لا تفهم من خلال الأنظمة النظريه التي استطاعت تفسير ظاهره أكثر تعقيدا. وكما نرى هنا فقد علق آينشتين ثقة كبيره

على احساسه بالجمال أكثر مما فعله تجاه نتائج التجربه ولم يلبث ان تبين خطأ كاوفمان، وأكدت تجارب لاحقة كانت أكثر دقة صحة معادلات لورنتز وآينشتاين[6].

واليوم تعتبر مثل هذه التجارب مجرد عمل روتيني بالنسبة لفيزيائي الجسيمات الأوليه العاملين في المعجلات العملاقه. بل ان مصممي تلك المعجلات يأخذون في الاعتبار معادلات الديناميكا النسبيه. وسواء تم اختبار معادلة كمية الدفع النسبيه أو معادلة كمية الحركه النسبيه او الطاقة الكليه النسبيه، فان النتائج جميعها تتفق بشكل دقيق مع المعادلات.

4– و ماذا عن المعادلة الأشهر؟

لا شك بأنه يتبادر الى ذهنك الآن، أنني أقصد من عنوان هذا الجزء معادلة تكافؤ الكتلة والطاقه، التي تكتب بشكلها الشهير:

$$E = mc^2$$

و هذه المعادلة نالت من الشهرة ما ناله آينشتين نفسه. لكن و كعادة الأشياء الشهيره، دائما ما تحاكى حولها الأساطير و الاشاعات. لقد أتهم آينشتين مرارا وتكرار بأنه هو من تسبب بكارثتي هيروشيما و ناكازاكي. لكن و كما يقول ستيفن هوكينغ؛ ان من يقول ان معادلة آينشتين هي سبب ما حدث في هيروشيما كمن يقول ان قانون نيوتن في الجذب العام هو سبب سقوط الطائرات! ثم ان نفس شكل هذه المعادلة بالظبط قد اشتقها هنري بوانكاريه قبل آينشتين، فلماذا بوانكاريه بريئ من التهمه؟ و على الرغم من أهمية هذه المعادلة، الا أنها ليست بأكثر أهميه من قانون الجذب العام و قانوني الديناميكا الحراريه و معادلة شرودينغر و غيرهما من معادلات الفيزياء الأساسيه. الا أن شهرتها كانت سياسيه أكثر منها علميه، ناهيك عن ارتباطها بآينشتين وما حدث في هيروشيما و ما لحقه من نظرة العالم الى بداية نشوء العصر الذري و تصارع الدول الكبرى، وبدء الحديث عن نهاية العالم. كل هذه الأشياء ساهمت في جعل معادلة تكافؤ الكتله و الطاقه معادلة أسطوريه بمعنى الكلمه. لكننا نحن هنا سنحلل معناها النظري و التجريبي، بعيدا عن جانبها السياسي والقصصي.

ينبغي علينا أولا أن نفهم ماذا نقصد بالطاقة وماذا نقصد بالكتله؟ بالنسبة للكتله فأعتقد بأننا جميعنا نعرف ما هي الكتله. هي مقدار ما يحتويه الجسم من ماده. انت و انا كتله، الكتاب الذي تقرأه كتله. بشكل عام نقول كل ماله وزن كتله. لكن ما هي الطاقه؟ في الحقيقه الطاقة أيضا شيئ مالوف في حياتنا اليوميه. الحركه، الضوء، الحراره، الكهرباء و المغناطيس و غيرها جميعا عباره عن مفهوم للطاقه.

لقد كانت الميكانيكا الكلاسيكيه، تميز و بشده بين مفهومي الكتله و الطاقه و تعاملهما على أساس أنهما شيئان مختلفان تماما. ان الميكانيكا الكلاسيكيه تنفي بشكل أو بآخر أن يكون أي

جسم له، على سبيل المثال، طاقة حراريه أو كيمائيه كامنه فيه. لكن ما تقوله لنا الميكانيكا النسبيه مختلف كليا. انها تدعي بأن الجسم سواء كان متحركا أو ساكنا، فانه يمتلك مخزن هائل من الطاقة الكامنه فيه. عندما يتحرك جسم ما، فان طاقته الكامله تعطى، بحسب النظريه النسبيه كالتالي:

$$\mathrm{E}^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

حيث m كتلة الجسم، p كمية دفع الجسم، c سرعة الضوء. الآن، تصور بأن الجسم ساكن، أي سرعته أو كمية دفعه تساوي صفرا، عندها تصبح المعادلة أعلاه كالتالي:

$$E = mc^2$$

أي أن الجسم حتى عندما يكون ساكنا فانه يمتلك طاقة بصورة ما. كيف يكون ذلك؟

حتى نجيب على هذا السؤال، تصور معي المثال التالي. تخيل لو كان لديك صندوق معزول له كتلة معينه m، بدأ باطلاق ضوء (طاقة) قدرها E في كل اتجاه. الآن، بعد اطلاق الصندوق لكميه كافيه من الطاقة، سنقوم بقياس كتلته. سنتفاجئ بأن كتلته قد قلت عن كتلته قبل اطلاقه للضوء أو للطاقه. والسؤال الذي يتبادر الى الذهن؛ أين ذهب فرق الكتله ذاك؟ ان قانون حفظ الكتله ينص على أن كتلة أي نظام تبقى محفوظه قبل التفاعل و بعده. اذن أي ذهب فرق الكتله؟ الجواب يكمن في معادلة تكافؤ الكتله والطاقه، ولو استطعنا ان نقيس بالظبط فرق الكتله المفقود بواسطة التجربه، سنجد أن القيمة تتفق مع:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

و هذا شيئ مثير حقا. لكن السؤال الآن، كيف يمكننا اجراء تجربه لنتأكد من ذلك؟ ان هذه العمليه ليست سهلة على الاطلاق. كيف نحرر طاقة كافية للقياس تجريبيا من جسم ما؟ في الحقيقه لم يكن هناك أي أمل لقياس الطاقه المتحررة من جسم ما، الا بعدما تم فهم شكل الذره، و تحديدا نواة الذره. بشكل عام تتكون الذره من نواه مركزيه تحتوي على عدد معين من البروتونات والنيترونات، وتدور حولها غيوم الكترونيه. تبلغ كتلة البروتون حوالي 0.00000000000000000000000001 من الجرام، و النيترون تقريبا له نفس الكتله، أثقل بقليل. لكن البروتون موجب الشحنه بينما النيترون متعادل ليس له شحنه. وكلما كان عدد البروتونات و النيترونات كبيرا، ستكون النواه كتلتها أكبر. ان أخف أنواع الأنويه هي نواة ذرة الهيدروجين، حيث تتكون من بروتون واحد فقط، في حين أن أثقل الأنويه هي نواة اليورانيوم حيث تحتوي على 92 بروتون و 146 نيترون.

أحد الأسئله التي كانت تطرح كثيرا آنذاك، هو كيفيه تلاحم تلك البروتونات مع بعضها؟ نحن نعلم بأن البروتونات موجبه الشحنه، اذا يجب ان يحدث لهما تنافر كهرومغناطيسي. لكن ليس هذا ما يحدث بالواقع، انهما متلاحمين بقوة كبيره جدا، يطلق على تلك القوة اسم طاقة الربط النووي nuclear binding energy. ان طاقة الربط النووي أقوى من طاقة التنافر الكهرومغناطيسي، الأمر الذي يجعل البروتونات متلاحمه رغم تشابه شحناتها. ان تحرير تلك الطاقة يتم بطريقتين؛ اما أن نشطر النواة الى أجزاء صغيره، أو أن ندمج الأنويه مع بعضها.

ان الفكرة تكمن في قياس كتلة نواة معينه قبل شطرها الى أجزاء و اطلاق طاقه، ومن ثم قياس كتل الأجزاء و مقارنة مجموع كتلها مع الكتلة الأصليه ونرى ان حدث فرق في الكتله ام لا. و اذا كان هناك فرق فعلا، فهل يتفق مع معادلة تكافؤ الكتلة والطاقه. ان الفكرة جميله، لكنها صعبة للغايه. عليك ان تعين كتلة النواة، ومن ثم تحطمها الى أجزاء بواسطه قذفها بجسيم معين، ومن ثم عليك أن تعين مقدار الطاقة المنطلقه و كتل كل الأجزاء الناتجه.

لكن في عام 1932 نجح كل من كوكروفت Cockeroft و والتون Walton، في اجراء تجربه مثيله جدا لما شرحناه للتو. فقد افلحا في قذف نواة الليثيوم ببروتون، مما أدى الى شطر النواة الى جزأين، هما في الواقع جسيمين من ألفا. وجسيمة ألفا ليست سوى نواة الهيليوم التي تحتوي على بروتونين و نيترونين. لنتدبر الأمر أكثر، لدينا تفاعل نووي قبل و بعد، الأنويه المتفاعله هي نواة ليثيوم تحتوي على ثلاث بروتونات وأربع نيترونات، وتم قذفها ببروتون، اذن لدينا أربع بروتونات وأربع نيترونات قبل التفاعل. بعد التفاعل أصبح لدينا نواتي هيليوم، أي لدينا أربع بروتونات وأربع نيترونات. اذن يبدوا بأن قيمة الكتله قبل التفاعل وبعده لم تتغير! لأنه لدينا أربع بروتونات وأربع نيترونات قبل التفاعل وبعد التفاعل. هذا صحيح، لكن قيمه الكتله قبل التفاعل اكبر من قيمتها بعد التفاعل. و السبب كما قلت أعلاه طاقة الربط النووي. ان البروتونات و النيترونات وهي مجتمعه تمتلك كتله أكبر من لو كانت متفرقه. فعلى سبيل المثال جزيئة الماء المكونه من ترابط ذرتي هيدروجين و ذرة أكسجين أثقل من ذرتي هيدروجين وذرة أكسجين وهما أحرار، و السبب طاقة الربط. اذن من تجربه كوكروفت و والتون يتضح أن هناك نقص في الكتله، أين ذهب؟ لقد تبادرت معادلة تكافؤ الكتلة و الطاقه مباشرتا الى ذهن كوكروفت و والتون. لقد أدركوا أن هناك جزء من الكتله قد فقد و تحول الى طاقه. لكن السؤال هو؛ الى أي نوع من الطاقة قد تحولت تلك الكتله المفقوده؟ هل تحولت الى ضوء أم الى حراره أم الى ماذا؟ في الحقيقه لقد دار جدل حول هذا الموضوع. لكن التفسير المقبول لدى جميع الفيزيائيين اليوم تقريبا، هو أن الكتلة قد تحولت الى طاقة حركه لجسيمين ألفا الناتجين. ان طاقة حركة نواة الليثيوم، على اعتبار أنها ساكنه، كانت تقريبا تقاس بالكيلو الكترون فولت، بينما طاقة حركة جسيما ألفا

الناتجين قد وصل الى 17 مليون الكترون فولت! و هذا نتيجه واضحة على تحول ذلك المقدار من الكتلة المفقود الى طاقة حركة لجسيمي ألفا الناتجين.

هناك مثال آخر شهير جدا على تحول الكتلة الى طاقة حركه، وهو ما يسمى فناء الزوجين Pair annihilation. ففي هذا التفاعل، يصطدم الكترون بضديده البيزترون تحت شروط معينه و ينتجان فوتونين. ان الفوتون طاقة مجردة، أي كتلته تساوي الصفر[7]. هنا نلاحظ بشكل مباشر أن كتلة الالكترون و البيزترون قد تحولت الى طاقة حركه مطلقه، أي فوتونين يتحركان بسرعة الضوء، لكن بدون كتله.

لكن ماذا عن القنابل النوويه؟ في الحقيقه تعمل على نفس المبدأ، تنشطر نواة اليورانيوم الى عدة أجزاء يكون وزن تلك الأجزاء أقل من وزن النواة الأم. الفرق يكون على شكل طاقة. لكن عنصر اليورانيوم ثقيل جدا، حيث تحتوي النواة الواحده على 92 بروتون و 143 نيترون، وبالتالي عند يشطرها ستنتج طاقة عاليه جدا على شكل حرارة و ضغط واشعاع. و هناك أيضا الاندماج النووي، و هو عكس الانشطار، حيث يتم دمج أنويه معينه و تنتج كذلك طاقة عاليه جدا، أعلى من طاقة الانشطار. و قد تم تحرير كميه هائله من هذه الطاقه على الأرض في عام 1952 عندما تم تفجير أول قنبله هيدروجينيه، حيث يتم ادماج مجموعه من ذرات الهيدروجين. لكن هذه العمليه تحتاج الى حرارة عاليه جدا جدا لدمج أنويه أثقل من الهيدروجين. لا تتوفر هذه الحراره في الأرض، لكنها تتوفر في النجوم. فعلى سبيل المثال، الشمس تدمج في باطنها باستمرار أربع ذرات هيدروجين، أي أربع بروتونات وتنتج الهليوم، أي بروتونين ونيترونين. لكن كتلة نواة الهليوم أقل من مجموع كتل نويات الهيدروجين الأربع وهي متفرقه، لذلك الفرق يتحول الى طاقه. و قد بذل العالم الألماني الكبير هانز بيته Hans Bethe و ويزاكر جهدا كبيرا في حساب كمية الطاقة المنطلقه من معادلة تكافؤ الكتلة والطاقه. و وجدوا أنها تتفق بشكل مذهل مع مقدار ما نستقبله تجريبيا من أشعه الشمس. و هكذا ومرة بعد مرة تثبت التجارب مدى تماسك معادلات النظرية النسبيه الخاصه.

ملاحظات الفصل الرابع

1. اذا أردت أن تعرف أكثر عن ميكانيكا الكم و مبدأ هايزنبيرغ (مبدأ عدم اليقين)، يمكنك قرائة كتابنا "ميكانيكا الكم بين الفلسفة والعلم" المنشور في موقع الشبكه الاستراتيحيه، قسم الأبحاث العلميه: http://www.t1t.net/index.php?action=view&id=729
2. السنه الضوئيه، هي المسافه التي يقطعها الضوء خلال سنه. أي أنها مقياس للمسافة وليس للزمن. تساوي بالمتر ($9.4607 \times 10^{15} m$).
3. الساعة الذريه تعتمد على الرنين الذري لقياس الوقت. وتعتبر من أدق الساعات على وجه الأرض. حيث تصل نسبة الخطأ فيها الى ثانيه كل ثلاثة ملايين عام تقريبا!
4. J. C. Hafele and R. E. Keating. "Around the World Atomic Clocks: Relativistic Time Gains" Science **177**, July 14. 1972. pp 166 – 168.
5. النانوثانيه تساوي واحد على مليار من الثانيه.
6. يانيش هوفمان، **النسبية وجذورها**، ترجمة: مروان عريف، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الأولى، 2000.
7. تشير الأبحاث الحديثه الى أن الفوتون يمتلك كتله صغيره جدا، لكنها غير صفريه! الأمر الذي قد يتطلب اعاده النظر في النسبيه.

المراجع

أولا: المراجع العربيه

1- آلبرت آينشتين، **النسبيه النظريه الخاصه والعامه**، ترجمة: د. رمسيس شحاته/ د. محمد مرسي احمد، نهضة مصر للطباعة والنشر.

2- آلبرت آينشتين/ ليوبولد انفلد، **تطور الأفكار في الفيزياء**، ترجمة: د. أدهم السمان، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الأولى، 1992.

3- يانيش هوفمان، **النسبية وجذورها**، ترجمة: مروان عريف، دار طلاس للدراسات والترجمه والنشر، الطبعه الأولى، 2000.

4- جيمس ا. كولمان، **النسبيه في متناول الجميع**، ترجمة: د. رمسيس شحاته، مراجعة: د. فهمي إبراهيم ميخائيل، دار المعارف المصريه.

5- د. عبدالرحيم بدر،**الكون الأحدب قصة النظرية النسبيه**، دار العلم للملايين، الطبعه الأولى، 1962.

6- د. هشام غصيب، **الطريق الى النسبيه من كوبرنيكوس الى آينشتاين**، الجمعيه العلميه الملكيه، الطبعه الأولى، 1988.

7- جون بروكمان، **آينشتاين كما عرفته**، ترجمة: محمد طه، مراجعة : فتح الله الشيخ، المركز القومي للترجمه، الطبعه الأولى، 2010.

ثانيا: المراجع الأجنبيه

أ- كتب

1- Newton, **Principia, Vols. I, II, III**, Univ. of California press, Berkeley, 1962.

2- Bernard, Cohen, **the Newtonian Revolution**, Cambridge Univ. Press, 1983.

3- Mach, Ernst, **the Science of Mechanics, a Critical and Historical account of it is development**, translation by Thomas H. Mocrmack, Published in 1906.

4- Barbour, Julian; and Pfister, Herbert, **Mach's Principle: From Newtton's Bucket to Quantum Gravity**, Boston.

5- Polivanov, k., **The Theory of Electromagnetic field**, Mir, Moscow, 1983.

6- Whittaker, Edmund Taylor (1910), **A History of the theories of aether and electricity**, 1 Ed, Dublin: Longman, Green and Co.

7- Albert Einstein, **Relativity the Special and General Theory**, translation by Robert W.

Lawson, edition published in the Taylor and Francis e-library, 2002.

8- Kenneth Krane, **Modern Physics**, john Wiely, 2^{ed} edition, 1996.

9- David Griffiths, **Introduction to Electrodynamics**, Prentice Hall, 3^{rd} edition, 1999.

10- David Bohm, **the Special Theory of Relativity, Taylor & Francis e-Library, 2009.**

11- Arthur Beiser, **the Concepts of Modern Physics,** Tata McGRAW-HiLL Edition, 6^{ed} edition, 2006.

12- B. Russel, **the ABC of Relativity**, New York, New American Library, 1958.

13- E. F. Taylor and J. A. Wheeler, **Spacetime Physics**, 2^{ed} edition, New York, freeman, 1992.

14- Serway, **Physics For Scientists and Engineers**, Saunders College Publishing, fourth Edition, 1996.

15- L. Bernet, **the Universe and Dr. Einstein**, New York, Time Inc., 1962.

16- R. Resnick, **Introduction to Special Relativiy**, New York, Wiely, 1968.

ب - بحوث و مقالات علميه

1- Albert Einstein, **On the Electrodynamics of Moving Bodies**, Annalen der physik17:891; English translation, Jun 30, 1905.

2- A. Einstein, Ann Phy. (Liepzig) 18, 639 (1905).

3- H. Lorentz, **The Theory of Electrons**, Brill, Leiden (1909; revised ed. 1916); Dover, New York, 1952.

4- Lorentz, Hendrik Antoon (1904), "**Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light**", Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences **6**: 809–83.

5- L. B Okun, "**The Concept of Mass**", Physics Today, 42 (6), pp. 31-36, 1989.

6- Brouwer, W., **Eienstein and Lorentz: the Structure of a Scientific Revolution**, 48 (6), pp. 425-431, Jun 1980

7- Rossi, B; Hall, D.B, **Variation of The Rate of Decay of Mestrons with Momentum**, Physical Review 59 (3), pp. 223-228, 1941.